

VEREIN  
DEUTSCHER  
INGENIEUREKohlenstoffschichten  
Grundlagen, Schichttypen und Eigenschaften  
Carbon films  
Basic knowledge, film types and properties

VDI 2840

Ausc. deutsch/englisch  
Issue German/English*Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.**The German version of this guideline shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.*

Inhalt	Seite	Contents	Page
<b>Vorbemerkung</b> . . . . .	2	<b>Preliminary note</b> . . . . .	2
<b>Einleitung</b> . . . . .	2	<b>Introduction</b> . . . . .	2
<b>1 Anwendungsbereich</b> . . . . .	3	<b>1 Scope</b> . . . . .	3
<b>2 Begriffe</b> . . . . .	6	<b>2 Terms and definitions</b> . . . . .	6
<b>3 Abkürzungen</b> . . . . .	9	<b>3 Abbreviations</b> . . . . .	9
<b>4 Grundlagen</b> . . . . .	9	<b>4 Fundamental principles</b> . . . . .	9
4.1 Kristallgitter des Kohlenstoffs . . . . .	9	4.1 Crystal lattice of carbon . . . . .	9
4.2 Bindungstypen . . . . .	10	4.2 Bond types . . . . .	10
4.3 Atomnetzwerke der amorphen Kohlenstoffschichten . . . . .	11	4.3 Atomic networks of the amorphous carbon films . . . . .	11
4.4 Beschichtungsverfahren . . . . .	12	4.4 Coating methods . . . . .	12
<b>5 Schichttypen</b> . . . . .	15	<b>5 Film types</b> . . . . .	15
<b>6 Schichteigenschaften</b> . . . . .	27	<b>6 Coating properties</b> . . . . .	27
6.1 Hinweise für die Bestimmung der Schichteigenschaften . . . . .	28	6.1 Instructions on determining coating properties . . . . .	28
6.1.1 Adhäsivverschleißschutz . . . . .	28	6.1.1 Protection against adhesive wear . . . . .	28
6.1.2 Abrasivverschleißschutz . . . . .	29	6.1.2 Abrasive wear protection . . . . .	29
6.1.3 Schutz gegen Oberflächenzerrüttung . . . . .	30	6.1.3 Protection against surface fatigue . . . . .	30
6.1.4 Schutz gegen chemischen Verschleiß . . . . .	31	6.1.4 Protection against chemical wear . . . . .	31
6.1.5 Reibungsreduzierung . . . . .	31	6.1.5 Reduction in friction . . . . .	31
6.1.6 Benetzbarkeit . . . . .	32	6.1.6 Wettability . . . . .	32
6.1.7 Sonderfunktionen . . . . .	32	6.1.7 Special functions . . . . .	32
6.1.8 Schichtdicke . . . . .	32	6.1.8 Film thickness . . . . .	32
6.1.9 Schichtrauheit . . . . .	34	6.1.9 Film roughness . . . . .	34
6.1.10 Farbeindruck und Helligkeit . . . . .	35	6.1.10 Colour sensation and lightness . . . . .	35
6.1.11 Menge Dotierung/Zusatzstoffe . . . . .	36	6.1.11 Quantity of doping or additives . . . . .	36
6.1.12 Temperaturbeständigkeit . . . . .	36	6.1.12 Heat resistance . . . . .	36
6.1.13 Wärmeleitfähigkeit . . . . .	37	6.1.13 Thermal conductivity . . . . .	37
6.1.14 Wärmeausdehnung . . . . .	37	6.1.14 Thermal expansion . . . . .	37
6.1.15 Härte und Elastizitätsmodul . . . . .	37	6.1.15 Hardness and modulus of elasticity . . . . .	37
6.1.16 Spezifischer elektrischer Widerstand . . . . .	38	6.1.16 Specific electrical resistance (electrical resistivity) . . . . .	38
6.2 Beschichtbare Substratmaterialien . . . . .	38	6.2 Coatable substrate materials . . . . .	38
<b>Schrifttum</b> . . . . .	41	<b>Bibliography</b> . . . . .	41

VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (GPL)

Fachbereich Produktionstechnik und Fertigungsverfahren

VDI-Handbuch Produktionstechnik und Fertigungsverfahren, Band 3: Betriebsmittel  
VDI-Handbuch Werkstofftechnik

### Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser VDI-Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen ([www.vdi-richtlinien.de](http://www.vdi-richtlinien.de)), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser VDI-Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

### Einleitung

Aus vielen Bereichen sind Hartstoffschichten nicht mehr wegzudenken. Sie erfüllen vielfältige Zwecke in tribologisch hochbelasteten Anwendungen, z.B. zur Verschleiß- und Reibungsreduzierung. Die klassischen Hartstoffschichten, z.B. die titanbasierten Schichten TiN, TiCN und TiAlN, sind in der Industrie bereits weit verbreitet. Darüber hinaus existieren auch kohlenstoffbasierte Schichtsysteme, die noch nicht so bekannt sind. Erschwerend kommt hinzu, dass diese Schichten zum Teil einen sehr komplexen Aufbau haben. Außerdem existiert eine Vielzahl von verwirrenden Begriffen und Markennamen, die ein leichtes Verständnis für Nichtfachleute erschwert. Besonders schwierig ist dies bei Mehrlagenschichten, die unter einem Schichtnamen angeboten werden. Teilweise werden auch Schichten unter einer falschen Bezeichnung angeboten (z.B. amorphe Kohlenstoffschichten als „Diamantschichten“).

Über die Kohlenstoffschichten hinaus bieten die Richtlinien VDI 3824 Blatt 1 bis Blatt 4 einen generellen Überblick über verschiedene Aspekte der Hartstoffbeschichtung. Im Einzelnen behandeln die vier Blätter folgende Gesichtspunkte:

- Blatt 1 beschreibt die Eigenschaften und Anwendungsgebiete von Hartstoffbeschichtungen.
- Blatt 2 behandelt die beschichtbaren Werkstoffe und die Anforderungen an Werkzeuge und Bauteile aus diesen Werkstoffen.
- Blatt 3 bietet Informationen über die notwendigen Voraussetzungen für das erfolgreiche Qualitätsmanagement bei der PVD-/CVD-Hartstoffbeschichtung einschließlich vorangehender und nachfolgender Arbeitsschritte und Prozesse.

### Preliminary note

The content of this guideline has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the guideline VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this guideline without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions specified in the VDI Notices ([www.vdi-richtlinien.de](http://www.vdi-richtlinien.de)).

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this guideline.

### Introduction

In many fields hard coatings have become indispensable. In applications with high levels of tribological load they perform a wide range of duties such as the reduction of wear and friction. The “classic” hard coatings, such as the titanium-based coatings TiN, TiCN and TiAlN, are already in widespread industrial use. In addition, carbon-based coating systems also exist which are not so well known. To make matters more difficult, in some cases these films have a very complex structure. We also find a wide variety of confusing terms and brand names which impede a ready understanding of this field by the non-specialist. This is particularly difficult in case of multilayered films which are available under a single coating name. Sometimes coatings are even offered under an incorrect designation (amorphous carbon films, for example, as “diamond films”).

Going beyond carbon films, the four parts of series of guidelines VDI 3824 provide a general overview of different aspects of hard coating. Taken individually, the four parts of the guideline examine the following areas:

- Part 1 describes the characteristic profiles and fields of application of hard coatings.
- Part 2 deals with the materials which can be coated and the requirements which apply to tools and components made of these materials.
- Part 3 provides information about necessary conditions for successful quality management in PVD/CVD hard coating including upstream and downstream steps and processes.

- Blatt 4 geht auf die Planung qualitätssichernder Prüfungen und die Verfahren zur Prüfung und Kontrolle grundlegender Eigenschaften von Hartstoffschichten ein.

Speziell auf das Beschichten von Werkzeugen der Kaltmassivumformung sowie das CVD- und PVD-Verfahren ist die Richtlinie VDI 3198 ausgerichtet. Neben beschichtungstechnischen Anforderungen hinsichtlich der Vorbehandlung sowie konstruktiven Forderungen an diese Werkzeuge gibt sie Hinweise zur Prüfung der beschichteten Umformwerkzeuge. Diese Aspekte lassen sich auch für das Beschichten anderer Werkzeuge und Bauteile anwenden.

Des Weiteren gibt es die Richtlinienreihe VDI 3823, in deren Blättern neben anderen Schichten auch Polymerschichten behandelt werden, die durch Vakuumbeschichten auf Kunststoffen abgeschieden werden. Die verschiedenen Blätter umfassen die Teilbereiche „Eigenschaften, Anwendungen und Verfahren“, „Anforderungen an die zu beschichtenden Kunststoffe“, „Fertigungsabläufe und -tätigkeiten“ sowie „Prüfungen an vakuumbeschichteten Kunststoffteilen“.

## 1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie behandelt Beschichtungen aus Kohlenstoff, die mit den Verfahren der Vakuumbeschichtungstechnik (PVD oder CVD) abgeschieden werden. Diese modernen Schichtsysteme reichen von den extrem harten Diamantschichten über die große Vielfalt der meist wasserstoffhaltigen amorphen Kohlenstoffschichten bis zu den weichen Grafit-schichten. Die Richtlinie verfolgt zwei Ziele: Sie soll zum einen eine einheitliche Einteilung und Nomenklatur der Kohlenstoffschichten schaffen. Zum anderen soll sie dem potenziellen Nutzer von beschichteten Werkstücken eine Vorauswahl von geeigneten Kohlenstoff-Schichttypen ermöglichen.

Die vorliegende Richtlinie wendet sich in erster Linie an potenzielle Anwender von Beschichtungen für tribologische Belastungsfälle und stellt für diese Nutzergruppe das grundlegende Fachwissen über Kohlenstoffschichten zur Verfügung. Sie kommt damit dem Wunsch nach, Informationen zu erhalten, um die verschiedenen auf dem Markt angebotenen Kohlenstoffschichten eindeutig identifizieren und vergleichen zu können. Die Richtlinie enthält dazu eine Klassifikation aller Kohlenstoffschichten, mit der alle bekannten Schichttypen auf der Basis der physikalischen und chemischen Beschaffenheit eingeteilt werden. Ein potenzieller Anwender kann so im Gespräch mit Beschichtern den konkreten Typ der angebotenen Schicht oder bei Schichtsystemen die Typen

- Part 4 deals with the planning of quality inspections and with procedures for inspecting and monitoring the basic properties of hard coatings.

Guideline VDI 3198 is particularly concerned with the coating (CVD, PVD) of cold-forging tools. In addition to the technical requirements of the coating procedure as regards pre-treatment and also the design requirements applicable to these tools, it provides practical information about inspection of the coated forming tools. These aspects can also be applied to the coating of other tools and components.

Furthermore the series of guidelines VDI 3823 is published, whose various parts, in addition to dealing with other coatings, also include an examination of polymer films deposited on plastics by means of vacuum coating. The different parts of the guideline cover characteristics, applications and procedures, demands on plastics to be coated, production sequence and job steps, and testing of vacuum-coated plastics.

## 1 Scope

The subject of the present VDI Guideline is carbon films which are deposited by the vacuum deposition method (PVD or CVD). These modern coating systems extend from extremely hard diamond films at one end of the scale, passing through a wide variety of mostly hydrogenated amorphous carbon films before reaching soft graphite films at the other end. This guideline pursues two aims: firstly, it should provide a uniform classification and nomenclature for carbon films; secondly, it should enable the prospective user of coated workpieces to make a preliminary selection of suitable carbon film types.

The present guideline is primarily intended for those considering using coatings for tribological loading cases and provides this user group with basic technical knowledge about carbon films. Thus it supplies the required information to allow the user to unambiguously identify the carbon films which are available on the market and also to compare them. For this purpose the guideline contains a classification of all carbon films which subdivides all known film types on the basis of their physical and chemical nature. This means that in discussions with a coating company a potential user will be able to identify the precise type of a specific coating being offered him or the types of the individual layers in case of coating systems. When presenting their products, coating

der Einzelschichten klären. Den Beschichtern wird empfohlen, bei der Darstellung ihrer Produkte neben dem Verkaufsnamen auch die Bezeichnung gemäß dieser Klassifikation anzugeben. Es sollte vermieden werden, bei amorphen Kohlenstoffschichten nur den Gattungsbegriff DLC (Diamond-like carbon) anzugeben. Vielmehr sollte stets der konkrete Schichttyp, z. B. „a-C:H:Me“ oder „ta-C“ genannt werden.

Um darüber hinaus dem Nutzer zusätzlich eine Auswahl des geeigneten Schichttyps für seine spezifische tribologische Anwendung zu ermöglichen, enthält die Richtlinie einen charakterisierenden Teil, in dem wichtige Eigenschaften der einzelnen Schichttypen aufgeführt sind.

Unter den Kohlenstoffschichten, die im klassifizierenden Teil dieser Richtlinie aufgeführt sind, werden diejenigen Schichten verstanden, in denen Kohlenstoff der überwiegende Bestandteil ist und die mit PVD- oder CVD-Verfahren abgeschieden werden. Dazu gehören die Schichten aus den beiden kristallinen Kohlenstoffvarianten Grafit und Diamant, die amorphen Kohlenstoffschichten sowie die Plasmapolymerschichten. Bei den beiden letzteren Schichtklassen sind in der Schicht teilweise auch nennenswerte Anteile anderer Elemente, z. B. Wasserstoff, enthalten.

Der Richtlinienenteil mit den charakterisierenden Schichteigenschaften (Abschnitt 6) enthält die Diamantschichten und die amorphen Kohlenstoffschichten. Die Grafitsschichten und die Plasmapolymerschichten sind dort nicht enthalten. Die Plasmapolymerschichten sind so vielfältig, dass sie im Rahmen dieser Richtlinie nicht erschöpfend behandelt werden können. Die Grafitsschichten wiederum sind industriell nicht sehr stark vertreten, sodass eine Berücksichtigung nicht sinnvoll ist.

Es sind in dieser Richtlinie im Wesentlichen die Schichten behandelt, die industriell hergestellt werden. Nicht enthalten sind daher z. B. die a-C:X- und die ta-C:X-Schichten ( $X = \text{Si, O, F, N, B} \dots$ ), die sich noch in der industriellen Entwicklung befinden oder zurzeit nur eine sehr eingeschränkte Verwendung finden.

Nicht enthalten sind außerdem die industriell noch nicht sehr verbreiteten Graphenschichten – einatomige Grafitsschichten für elektronische Anwendungen – sowie Kohlenstoffnanoröhren (Carbon Nanotubes, CNT), die mit PVD- und CVD-Verfahren abgeschieden werden können, aber nicht als Beschichtung sondern einzeln oder als Schüttgut, z. B. als Füllmaterial für Kompositwerkstoffe, eingesetzt werden.

companies are also recommended to provide alongside the commercial name the corresponding designation according to this classification. In case of amorphous carbon films, suppliers should refrain from providing only the generic term DLC (diamond-like carbon). Instead the specific film type should be indicated – for example, “a-C:H:Me” or “ta-C”.

The guideline also includes a section with descriptions of the important properties of the individual film types. This should allow the user to pick the most suitable film type for his particular tribological application.

The carbon films which are listed in the classificatory section of this guideline are taken to mean those coatings in which carbon is the predominant constituent part and which are deposited by the PVD or CVD process. This group includes coatings consisting of graphite and diamond (the two crystalline variants of carbon), amorphous carbon films, and also plasma polymer films. In case of the latter two classes, the coating sometimes also contains not inconsiderable proportions of other elements, such as hydrogen, for example.

That part of the guideline dealing with characteristic coating properties (Section 6) includes diamond films and amorphous carbon films. It does not cover graphite films nor plasma polymer films. The latter are so diverse that an exhaustive treatment of them is simply not possible within the bounds of this guideline. The graphite films on the other hand are not very widespread in industrial applications and their inclusion therefore would not serve any useful purpose.

Essentially this guideline deals with those coatings which are produced on an industrial scale. This means we must, for example, exclude a-C:X and ta-C:X films ( $X = \text{Si, O, F, N, B}$ , and so on) which are yet under industrial development or which currently have only a very limited application.

Also not included are industrial barely-used graphene layers – single atom graphite layers for electronic applications – as well as carbon nanotubes (CNTs) that can only be deposited by processes using PVD (physical vapour deposition) and CVD (chemical vapor deposition) and are not used as coatings but individually or in bulk, e.g. as fillers for composite materials.

Bei den Anwendungen werden alle bekannten tribologischen Einsatzfälle der behandelten Kohlenstoffschichten berücksichtigt, also diejenigen, bei denen Verschleißschutz und/oder Reibung im Vordergrund stehen. Es sind somit sowohl Werkzeugbeschichtungen als auch Bauteilbeschichtungen einbezogen. Kohlenstoffschichten werden darüber hinaus auch für andere Zwecke eingesetzt, z.B. für optische Anwendungen.

Alle Angaben in dieser Richtlinie beziehen sich auf typische Ausprägungen der Schichttypen. Reale Schichten können individuell davon abweichen, da es eine Vielzahl von Parametern gibt, die die Schichteigenschaften beeinflussen. Die Angaben beziehen sich weiterhin, soweit nicht anders vermerkt, auf Einschichtsysteme. Gerade bei den amorphen Kohlenstoffschichten gibt es oftmals Mehrschichtsysteme (Multilag, Multilayerschichten). Deren Eigenschaften können von denen der Einschichtsysteme abweichen.

Ebenfalls unberücksichtigt bleiben Zwischenschichten (z.B. Haftvermittlerschichten), die oft vor den amorphen Kohlenstoffschichten abgeschieden werden. Die Angaben gelten außerdem nur für Erstbeschichtungen. Eine Entschichtung und Wiederbeschichtung der Kohlenstoffschichten ist zwar prinzipiell möglich, es kann jedoch zu Einbußen der Leistungsfähigkeit gegenüber einer Erstbeschichtung kommen. Gleiches gilt für eine Nachbeschichtung, das heißt für eine erneute Beschichtung ohne vorherige Entschichtung.

Nicht zu den Kohlenstoffschichten gezählt werden Lacke und thermische Spritzschichten, die zwar auch zum überwiegenden Teil aus Kohlenstoff bestehen können, aber nicht mit PVD- oder CVD-Verfahren abgeschieden werden. Weiterhin nicht behandelt werden Oberflächenmodifikationsverfahren. Hierbei gibt es Verfahren, bei denen Kohlenstoff auf das Substrat gelangt, z.B. das Karburieren. Jedoch wird in diesem Fall der Kohlenstoff nicht abgeschieden, sondern dringt in die Randzone ein und stellt somit keine Beschichtung im eigentlichen Sinne dar.

Zu den Kohlenstoffschichten im weiteren Sinne kann man auch Schichten zählen, die Verbindungen von Kohlenstoff und Stickstoff enthalten, die sogenannten  $CN_x$ -Schichten. Sie werden hier ebenfalls nicht behandelt. Literatur dazu, siehe [1 bis 3].

Die spezielle Anwendung von CVD-Diamantschichten für Werkzeuge wird in der Richtlinienreihe VDI 2841 erläutert.

In the applications we will take into consideration all known tribological application cases for the carbon films dealt with – in other words, those cases where wear protection and/or friction are of prime importance. This means that both tool coatings and component coatings will be included. Carbon films are used for other purposes as well, such as in optical applications, for example.

All data provided in this guideline relate to typically encountered forms of the film types. Real coatings may vary from these on an individual basis since the range of parameters which affect coating properties is very wide. Furthermore, the details provided relate to single-layer systems, unless stated otherwise. In fact, amorphous carbon films frequently have multilayer systems. Their properties may differ from those of the single-layer systems.

We shall not be concerned either with intermediate layers (such as adhesion promotion coatings, for example) which are often deposited before the amorphous carbon films. Furthermore, the information applies only to first coatings. Stripping and reapplication of carbon films is possible in principle but may have an adverse effect on performance in comparison with a first coating. The same applies to overcoating – in other words, applying a fresh coating without stripping the previous coating first.

Paints and sprayed-on thermal coatings are not to be included amongst carbon films: although they can consist predominantly of carbon, they are not deposited by the PVD or CVD processes. Nor will we be dealing with surface modification methods. These include processes whereby carbon comes into contact with the substrate – as is case with hardening, for example. In this case, however, the carbon is not deposited but rather diffuses into the substrate surface and thus cannot correctly be regarded as a coating.

Carbon films in the broader sense can also include films which contain compounds of carbon and nitrogen – the so-called  $CN_x$  films. This guideline will not deal with them either, but for relevant literature, see [1 to 3].

The specific application of CVD diamond coatings for tools is described in the series of guidelines VDI 2841.