

Metal-Keramik- Verbundwerkstoffe mit Durchdringungsgefüge

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Materialwissenschaftler, was Umweltverträglichkeit, Energieersparnis, Rohstoffverknappung, aber auch Kostenersparnis betrifft, werden seit rund 30 Jahren gezielt Werkstoffe für bestimmte Anforderungen entwickelt. Verbundwerkstoffe bestehen aus zwei oder mehreren festen Phasen unterschiedlicher Werkstoffklassen wie Polymere, Metall, Glas oder Keramik. Jeder kennt aus dem täglichen Gebrauch Werkstücke aus Verbundwerkstoffen wie glasfaser- oder kohlenstofffaserverstärkten Polymeren. Auch Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe sind vielen vertraut, wie etwa Werkzeuge aus Hartmetall.

► Ceramic – Metal Composites and their Application

In the last 30 to 40 years, materials scientists have been challenged to develop tailored materials to meet demands concerning environmental friendliness, energy savings, raw materials shortages as well as reducing production costs. Composites consist of two or more solid phases of different classes of materials, like polymers, metals, glasses and ceramics. Everyone is familiar with the everyday use of items made of composites, for example glass fibre or carbon fibre reinforced polymers. Many are also familiar with metal-ceramic composites, for example the so-called hard metals. They consist mostly of tungsten carbide, or more exactly tungsten carbide particles embedded in a cobalt matrix.

Jürgen Rödel, Ludwig Weiler, Jami Susan Winzer, Irene Mieskes • Ein wesentliches Motiv für die Entwicklung von Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen ist die Kombination von besonderen Eigenschaften der beiden Werkstoffklassen. Für hohe Verschleißfestigkeit, Zuverlässigkeit und Standzeit in Press- und Stanzwerkzeugen sowie in Bremsen sind die Zähigkeit von Metallen und die Härte von Keramik vorteilhaft. Für die Kühlung in der Leistungselektronik sind Teile hoher Wärmeleitfähigkeit und ein thermischer Ausdehnungskoeffizient nahe dem des Siliziums sehr günstig, zum Beispiel AlSiC, bestehend aus der Kombination von Aluminium und Siliziumcarbid. Allgemein lassen sich in der Verbindung verschiedener Werkstoffklassen Profile thermomechanischer Eigenschaften erreichen, die mit einer Werkstoffklasse nicht zu erzielen sind. Die Eigenschaften von Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen werden wesentlich von der chemischen Zusammensetzung, vom Volumenverhältnis und von Form und Größe der beiden Phasen bestimmt.

Gasdruckinfiltrations-
ofen zur Herstellung
von Metall-Keramik-
Verbundwerkstoffen.

Allgemein unterscheidet man Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe mit Metallmatrix (MMC), mit Keramikmatrix (CMC) und mit Durchdringungsgefüge (Abbildung 1).

Herstellung allgemein

Die Herstellungsverfahren von Bauteilen aus Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen werden hauptsächlich vom Typ des Verbundwerkstoffs bestimmt. Für Werkstoffe mit Metallmatrix sind dies schmelz- und pulvermetallurgische Prozesse und für Werkstoffe mit Keramikmatrix sind Keramikherstellungsverfahren mit Sintern dominierend. Die Vorteile von Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen im Vergleich zu Leichtmetallen liegen in der Tatsache begründet, dass Verbundwerkstoffe die guten Eigenschaften der Leichtmetalle beibehalten und einige der negativen Eigenschaften mindern. Im Aluminium-Motorblock des Porsche Boxster (seit 1996 auf dem Markt) sind anstelle herkömmlicher Grauguss-Büchsen Zylinderlaufflächen aus einem Aluminium-Silizium-Verbund. Die hochporöse Preform besteht nur zu etwa 25 Volumenprozent aus Silizium-Partikeln und bildet zusammen mit der Aluminium-Matrix im Motorblock eine äußerst abriebfeste Lauffläche. Die lokal verstärkten Bereiche im Gesamtbauteil erlauben eine kompaktere Bauweise, da die Stege zwischen den Zylindern auf weniger als 5 Millimeter reduziert werden können. Auch an anderer Stelle in der Automobilherstellung könnten die Leichtgewichte aus Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen schon bald herkömmliche Werkstoffe ablösen. Denkbar sind Keramik-Verstärkungen an Komponenten wie Bremsbelagträgerplatten (Gewicht), Lagern (Wärmedehnung), oder Pleuelstangen (Gewicht). Für die Elektroindustrie interessant sind Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe aus Siliziumcarbid und

Literatur

Studart, A. R.; Gonzenbach, U. T.; Tervoort, E. & Gauckler, L. J., Processing Routes to Macroporous Ceramics: A Review, *J. Am. Ceram. Soc.*, 2006, 89, 1771–1789

Lange, F. F., Velamakanni, B. and Evans, A., Method for processing metal-reinforced ceramic composites. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1990, 73, 388–393

Travitzki, N. & Claussen, N., Microstructure and Properties of Metal Infiltrated RBSN Composites, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 1992, 9, 61–65



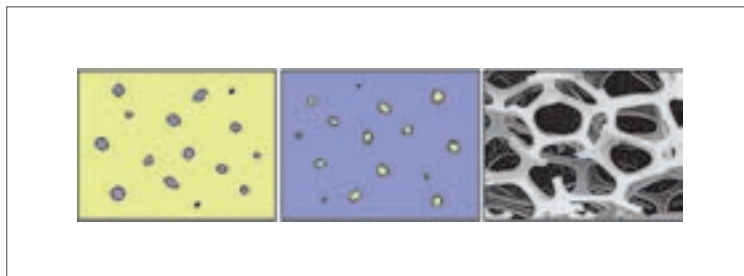


Abbildung 1

Schematische Darstellung der Typen von Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen.
links: Metallmatrix mit eingelagerten Keramikpartikeln (MMC),
Mitte: Keramikmatrix mit eingelagerten Metallpartikeln,
rechts: Durchdringungsgefüge.

Aluminium. Sie dienen dort zur Wärmeableitung und weisen gegenüber anderen Lösungen mit hoher Wärmeleitfähigkeit einen an das Aluminiumoxid- oder Aluminiumnitrid-Substrat angepassten Wärmeausdehnungskoeffizienten auf. Sie werden in der Raumfahrt, der Flugzeugindustrie, im Motorenbau und bei der Bahnindustrie angewandt.

Vorteile und Herstellung von Verbundwerkstoffen mit Durchdringungsgefüge

Im Vergleich zu CMC oder MMC haben Keramik-Metall-Verbundwerkstoffe mit Durchdringungsgefüge wesentliche Vorteile. Die Eigenschaften, die man kombinieren möchte, sind kontinuierlich durch das ganze Bauteil vorhanden, zum Beispiel hohe Steifigkeit in Kombination mit hoher Wär-

meleitfähigkeit. Dafür kann die Herstellung etwas komplizierter sein. Wenn Keramik und Metall mit ähnlichen Schmelzpunkten kombiniert würden, könnten beide in Pulverform zusammengemischt und anschließend gesintert werden. Kontinuität beider Phasen ist gewährleistet, wenn beide jeweils zu mindestens 30 Vol. % eingesetzt werden. Da aber in den meisten Fällen der Schmelzpunkt von Metall viel niedriger als der der Keramik-Komponente ist, wird zuerst eine poröse Keramik hergestellt und anschließend mit flüssigem Metall infiltriert. Eine empfehlenswerte Übersicht über verschiedene Herstellungsmethoden von porösen Keramiken geben Studart et al. Falls das Metall die Keramik benetzt, kann die Metallinfiltration unter Vakuum spontan erfolgen. Falls nicht, muss die Me-

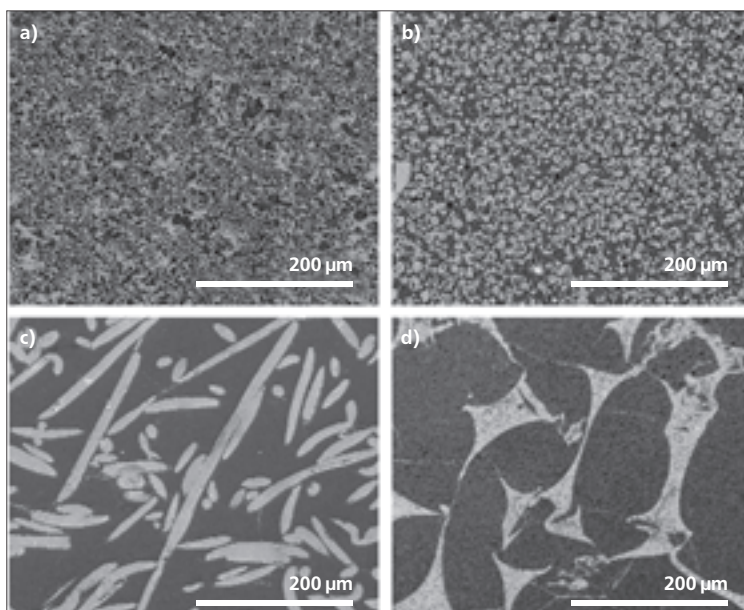


Abbildung 2

REM Gefügebilder von Al_2O_3 -Cu Verbundwerkstoffen. Der Al_2O_3 -Anteil wurde über
a) Teilsintern und die Verwendung diverser Opfervorformen sowie
b) Maisstärke,
c) Wollefilz und
d) PU-Schaum hergestellt.

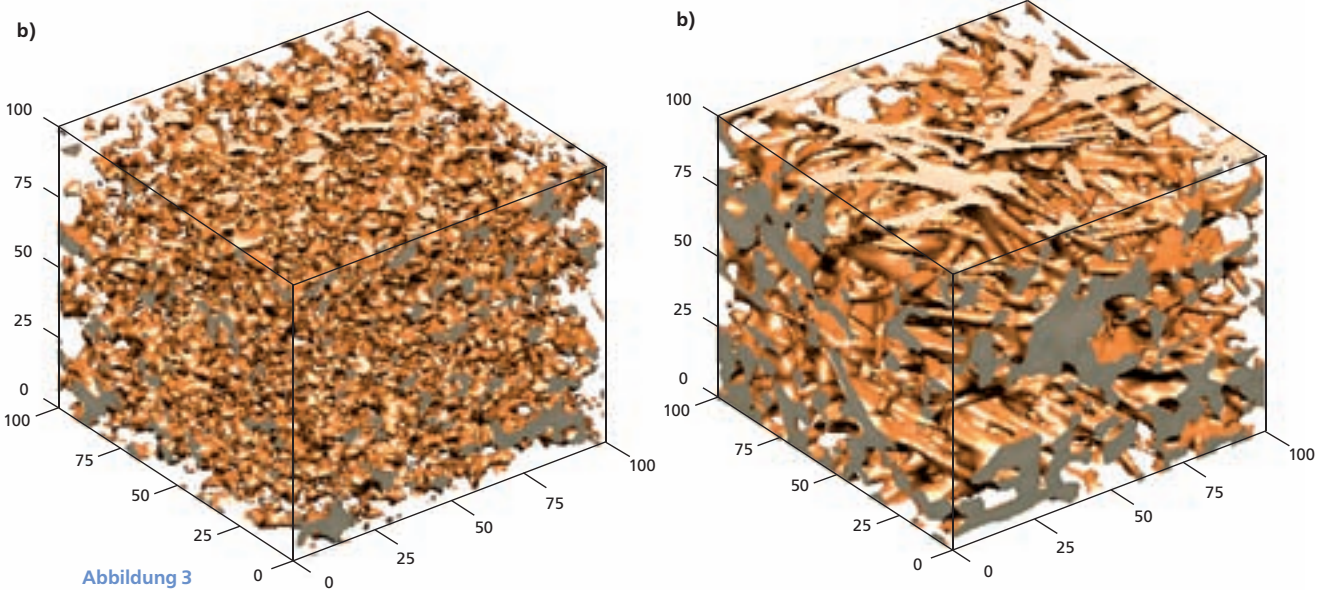


Abbildung 3
 Dreidimensionale Bilder des Kupfernetzwerkes von Al_2O_3 -Cu-Verbundwerkstoffen, hergestellt auf der Basis von
 a) Maisstärke und
 b) Wollefilz.
 Beide Verbundwerkstoffe enthalten 30 Vol. % Kupfer.

tallinfiltration unter Druck geschehen. Zwei verschiedene Methoden sind Gießpressen und Gasdruck-Infiltration. Im Fachgebiet NAW wird poröses Aluminiumoxid entweder durch Teilsintern oder mit Hilfe einer Opfervorform (Porenbildner) hergestellt. Als Opfervorform wurde Stärke (sphärische Partikel) mit verschiedenen Korngrößen, Wollefilz und Polyurethan (PU)-Schaum verwendet. Die Opfervorform wurde mit einem Al_2O_3 -Schlicker (Pulver in Wasser dispergiert) gemischt und getrocknet. Danach wurde diese pyrolysiert, sodass nur noch Al_2O_3 -Matrix übrig blieb, und anschließend gesintert. Das resultierende Porennetzwerk bildet dann ein Replika der Opfervorform. Die porösen Keramiken wurden sodann mit Kupfer unter Gasdruck (10 MPa) infiltriert (Abbildung 2). Röntgentomographie er-

möglicht die Darstellung des Gefüges in drei Dimensionen. In Abbildung 3 sind die Kupfernetzwerke von a) stärke- und b) wollefilzbasierten Ver-

Fachgebiet Nichtmetallisch-Anorganische Werkstoffe
 Prof. Dr. Jürgen Rödel
 Tel. 06151/16-6315
 E-Mail: roedel@ceramics.tu-darmstadt.de

Dr. Ludwig Weiler
 Tel. 06151/16-6268
 E-Mail: weiler@ceramics.tu-darmstadt.de

Irene Mieskes
 Tel. 06151/16-6313
 E-Mail: mieskes@ceramics.tu-darmstadt.de

Jami Susan Winzer
 Tel. 06151/16-5542
 E-Mail: winzer@ceramics.tu-darmstadt.de
www.mawi.tu-darmstadt.de/nav/

Abbildung 4
 R-Kurven:
 a) schematisch und
 b) für Al_2O_3 -Cu-Verbundwerkstoffe mit verschiedenen Kupfer-Volumenanteilen.

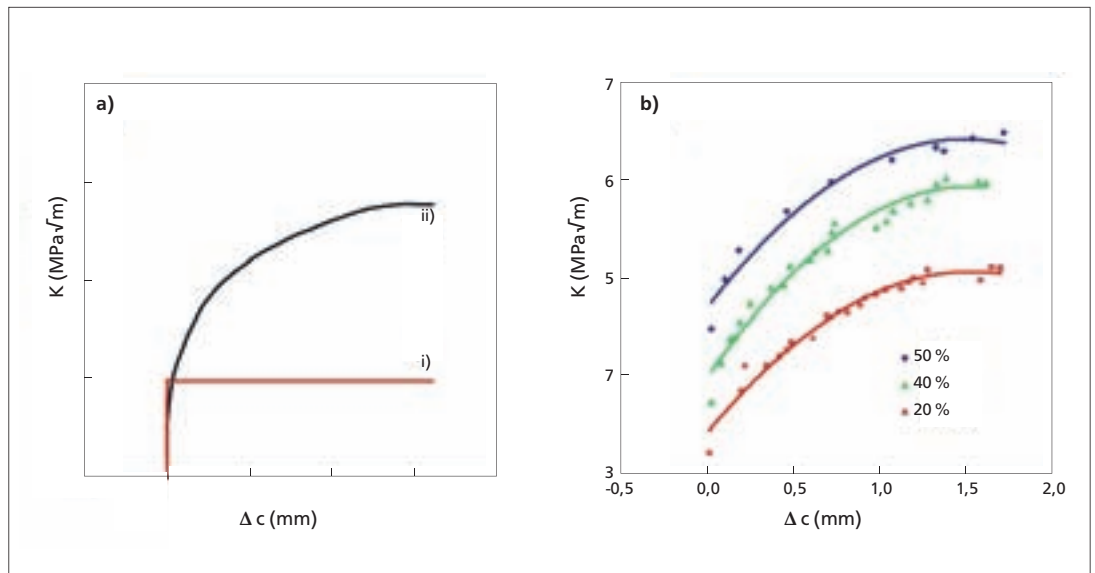


Abbildung 5
Fractographische
Bilder eines
wollebasierten
 Al_2O_3 -Cu-Verbund-
werkstoffs
a) von der Seite
und
b) von oben.

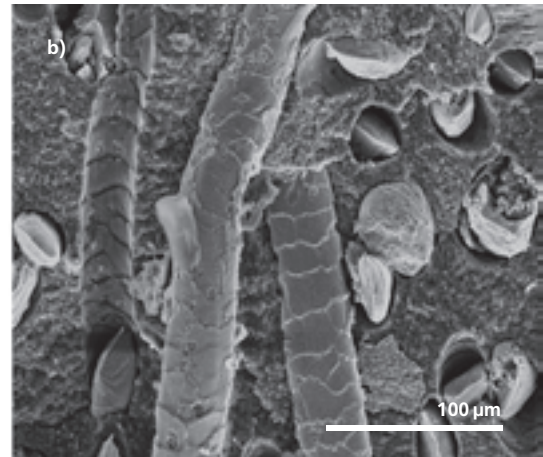
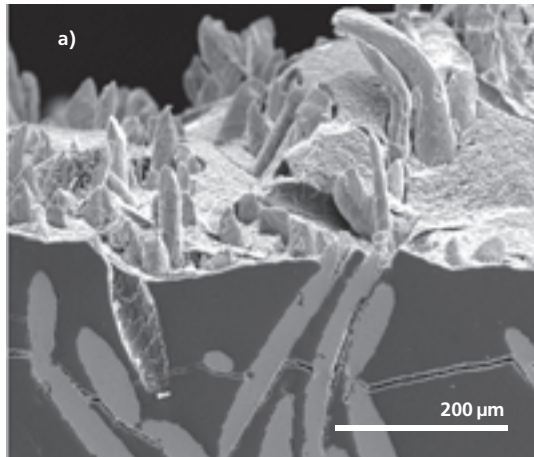
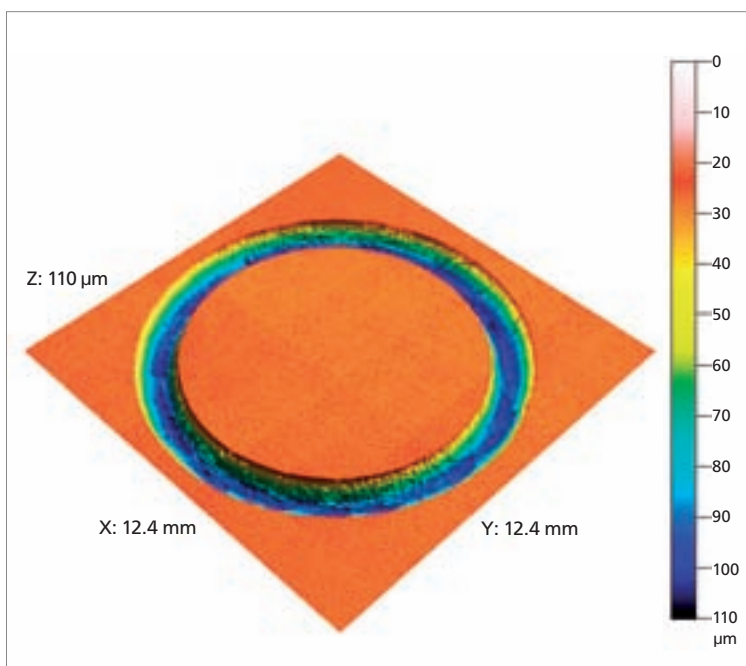


Abbildung 6
Verschleißspur
eines
 Al_2O_3 -Cu-Verbund-
werkstoffs,
aufgenommen
mit einem
konfokalen Weiß-
lichtmikroskop.



bundwerkstoffen zu sehen. Der durchsichtige Teil ist Al_2O_3 .

Eigenschaften von Aluminiumoxid-Kupfer

Die Kombination Aluminiumoxid-Kupfer wurde ausgewählt, um die hohe Steifigkeit und Härte von Aluminiumoxid mit der hohen Wärmeleitfähigkeit und Risszähigkeit von Kupfer zu vereinen. Von besonderem Interesse für die Zuverlässigkeit eines

Werkstoffes ist die Risszähigkeit. In Abbildung 4a sind zwei schematische R-Kurven dargestellt – der Spannungsintensitätsfaktor K gegen Änderung der Risslänge c . Kurve i) zeigt keine Erhöhung des K -Wertes mit zunehmender Risslänge. So eine Kurve ist typisch für spröde, unverstärkte Gläser oder Keramiken. Bei Werkstoffen, die mit Metallligamenten verstärkt sind, erhöht sich der K -Wert mit zunehmender Risslänge, da der Riss nach und nach durch Metallligamente überbrückt wird, die dem Risswachstum widerstehen. Irgendwann reißt das erste Ligament, und wenn der Riss in die weiteren Ligamente wächst, brechen die Ligamente am Ende des Risses. Es entsteht eine Gleichgewichtszahl von Ligamenten, die den Riss überbrücken, und es gibt ein Plateau in der R-Kurve.

In Abbildung 4b sieht man die R-Kurven eines Al_2O_3 -Cu-Verbundwerkstoffs mit verschiedenen Kupferanteilen (in Volumenprozent). Je mehr Kupfer enthalten ist, desto höher wird die R-Kurve, da mehr Energie verbraucht wird, um die Kupferligamente plastisch zu verformen. Der Plateauwert wird in allen Fällen nach ca. 1,5 mm Risswachstum erreicht. Abbildung 5 zeigt die Bruchfläche a) von der Seite und b) von oben. Die Kupferligamente haben sich sehr weit gedehnt, bevor sie rissen und/oder herausgezogen wurden. Man sieht auch Einschnürungen in den Ligamenten und Delaminationen zwischen Cu-Ligamenten und der Al_2O_3 -Matrix. Es ist auch interessant zu beobachten, wie genau die Kupferligamente die Struktur des Wollefilzes übernommen haben: nicht nur die Form, sondern auch sogar die Oberflächenstruktur (Abbildung 5b). Die

Verschleißfestigkeit einer Auswahl von Al_2O_3 -Cu-Verbundwerkstoffen wurde getestet. Abbildung 6 zeigt eine Verschleißspur. Es gibt eine Korrelation zwischen Risszähigkeit und Verschleißbeständigkeit: je höher die Risszähigkeit, desto höher die Verschleißbeständigkeit.

Offene Fragen und weitere Entwicklung

Die Entwicklung neuer Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe wird hauptsächlich bestimmt durch gewünschte und notwendige höhere Leistungsprofile und durch die Notwendigkeit, gebräuchliche Werkstoffe zu ersetzen, soweit deren Verfügbarkeit, Umweltverträglichkeit usw. begrenzt sind. Weitere Bereiche der MKV-Forschung betreffen die Erzielung feinerer Gefüge durch Verwendung kleinerer Partikel (Nanopartikel), die Vertiefung des Verständnisses der makroskopischen Eigenschaften in Abhängigkeit von den chemischen und physikalischen Eigenschaften/Charakteristika der einzelnen Phasen und insbesondere der Phasengrenzen sowie – daraus folgend – die gezielte Einstellung bestimmter makroskopischer Eigenschaften.



Jürgen Rödel ist Professor für Materialwissenschaften an der TU Darmstadt. Er ist Leibniz-Preisträger 2009, forscht im Bereich der Piezokeramiken und Metall-Keramik-Verbundwerkstoffe.



Ludwig Weiler ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Darmstadt. Er ist Wissenschaftler i. R. und arbeitet am EU-Projekt MATRANS.



Irene Mieskes ist wissenschaftliche Mitarbeiterin an der TU Darmstadt. Die Diplom-Physikerin arbeitet am EU-Projekt MATRANS an Aluminiumoxid-Kupfer gradierten Verbundwerkstoffen.



Jami Susan Winzer ist Doktorandin an der TU Darmstadt. Sie steht kurz vor der Vollendung der Promotionsarbeit zum Thema Herstellung und Charakterisierung von Aluminium-Kupfer-Verbundwerkstoffen.

— ANZEIGE



PWT

Wasser ist unsere Leidenschaft



*dazu brauchen wir
Sie als Ingenieur/in*

PWT Wasser- und
Abwassertechnik GmbH

Platanenallee 55
64673 Zwingenberg

Telefon: 06251 980-0
Telefax: 06251 980-498
hoffmann.monika@pwt.de
www.pwt.de