

Michael Schubert

Die aerosolbasierte Kaltabscheidung von Aluminiumoxid:
Verfahren, Hintergründe,
Anwendungen

Die aerosolbasierte Kaltabscheidung von Aluminiumoxid: Verfahren, Hintergründe, Anwendungen

Der Fakultät für Ingenieurwissenschaften

der Universität Bayreuth

zur Erlangung der Würde eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Michael Schubert

aus

Bamberg

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen G. Heinrich

Tag der mündlichen Prüfung: 05.04.2019

Lehrstuhl für Funktionsmaterialien

Universität Bayreuth

2019

Bayreuther Beiträge zu Materialien und Prozessen

Band 11

Michael Schubert

**Die aerosolbasierte Kaltabscheidung von Aluminiumoxid:
Verfahren, Hintergründe, Anwendungen**

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bayreuth, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6725-5

ISSN 1866-5047

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort der Herausgeber

Mit dem Verfahren der aerosolbasierten Kaltabscheidung, das in der englischsprachigen Literatur auch als *Aerosol Deposition Method* (abgekürzt ADM) bekannt ist, können dichte keramische Schichten ohne Hochtemperaturprozesse direkt aus dem keramischen Pulver auf fast beliebige Substratmaterialien aufgebracht werden. Es handelt sich dabei um ein vollständig kaltes Verfahren, bei dem weder Trägergas noch Pulver oder Substrat beheizt werden müssen.

Bei der aerosolbasierten Kaltabscheidung wird aus einem Prozessgas und einem keramischen Ausgangspulver ein Pulver-Aerosol erzeugt, welches durch eine Druckdifferenz vom Aerosolherzeuger in eine Vakuumkammer befördert wird. Dort wird das Aerosol durch eine Düse auf nahezu Schallgeschwindigkeit beschleunigt und auf das zu beschichtende Substrat gelenkt. Damit können fest anhaftende, dichte Beschichtungen von etwa 1 µm bis 100 µm Dicke ohne jeglichen Sinterprozess erzeugt werden. Die Schichteigenschaften sind dabei ähnlich dem Ausgangsmaterial.

Diese Arbeit untersucht am Beispiel von Aluminiumoxidschichten, die auch eine hohe Anwendungsrelevanz haben, wie Pulver beschaffen sein müssen und welchen Prozessen sie unterworfen sein müssen, damit die Schichten erfolgreich abgeschieden werden können. Die Arbeit spannt einen weiten Parameterraum sowohl hinsichtlich der Pulverbeschaffenheit als auch hinsichtlich der verwendeten Substrate, Trägergase und anderer Prozessparameter auf und zeigt Wege auf, wie dichte Schichten prozesssicher mittels der aerosolbasierten Kaltabscheidung hergestellt werden können. Es wird demonstriert, wie hervorragend die erzeugten Schichten elektrisch isolieren, auch bis zu 900 °C. Schließlich kulminiert die Arbeit in der Anwendung der mittels der aerosolbasierten Kaltabscheidung hergestellten Aluminiumoxidschichten als Abdeckschichten für Platin-Temperatur Sensoren. Diese können höheren Temperaturbelastungen standhalten und sind temperaturwechselbeständiger als nach dem Stand der Technik hergestellte Sensoren.

Bayreuth im April 2019

Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos, Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer

Zusammenfassung

Aluminiumoxid (Al_2O_3) ist einer der am weitesten verbreiteten Werkstoffe für die Herstellung hochisolierender Schichten, da dieses Material auch bei hohen Temperaturen einen hohen spezifischen elektrischen Widerstand aufweist. Typischerweise werden für die Herstellung von Al_2O_3 -Schichten Temperaturen weit über $1200\text{ }^\circ\text{C}$ benötigt, weshalb keine niedrigschmelzenden Substratwerkstoffe verwendet werden können. Zudem kommt es bei den standardmäßigen PVD-Prozessen (Physical Vapour Deposition) zur Bildung von Al_2O_3 in der γ -Phase anstatt der favorisierten, thermodynamisch stabilen α -Phase, die sich erst bei Temperaturen über $1000\text{ }^\circ\text{C}$ bildet. Ein relativ neues Beschichtungsverfahren, bei dem die genannten Probleme nicht auftreten, ist die aerosolbasierte Kaltabscheidung. Mit diesem Verfahren können dichte keramische Schichten direkt aus dem Pulver bei Raumtemperatur abgeschieden werden, ohne dass das Beschichtungsmaterial eine Phasenumwandlung erfährt. Der gesamte Prozess findet bei Raumtemperatur statt und es können somit auf fast beliebigen Substratmaterialien keramische Schichten hergestellt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden mehrere Einflussparameter auf eine erfolgreiche Abscheidung der aerosolbasierten Kaltabscheidung untersucht. Im ersten Schritt wurden Kriterien für die Auswahl geeigneter Pulver gesucht. Dazu wurden an 15 Pulvern der mittlere Partikeldurchmesser d_{50} , die spezifische Oberfläche S_{BET} und der Carr-Index gemessen und die Pulver nach einer Mahlung auf zwei unterschiedliche Substratmaterialien abgeschieden. Es wurden die Abscheiderate, die Anhaftung an das Substrat und die Langzeitstabilität der Schichten untersucht. Es zeigte sich bei der Beschichtung von harten Al_2O_3 -Substraten, dass die Ausbildung einer ausreichenden Haftung an das Substrat der kritische Punkt der Abscheidung ist, da es bei den Schichten zu einer vermehrten Delamination nach der Abscheidung kam. Pulver mit einem kleinem mittleren Partikeldurchmesser d_{50} und gleichzeitig hoher spezifischer Oberfläche S_{BET} stellten sich als geeignet dafür heraus. Die Schichten, die eine gute Anhaftung zeigten, besaßen auch eine gute Langzeitstabilität. Auf den weicheren Glassubstraten wiederum ist die Ausbildung einer guten Anhaftung weniger kritisch, da durch die Duktilität des Substrates eine Verformung der Oberfläche stattfinden kann, wodurch es zu einer mechanischen Verklammerung der Schicht mit dem Substrat kommt. Als kritische Punkte sind hier das anschließende Schichtwachstum und die Langzeitstabilität der Schichten zu sehen.

Da das Substrat maßgeblichen Einfluss auf den Abscheideerfolg bei der aerosolbasierten Kaltabscheidung nimmt, wurden Untersuchungen zum Einfluss der Substrathärte und der Oberflächenrauheit durchgeführt. Es wurden dazu vier Substratmaterialien (LTCC, Saphir, 96 %iges und 99,6 %iges Al_2O_3) unterschiedlicher Härte mit variierender Oberflächenrauheit präpariert und beschichtet. Bei Auswertung der Abscheiderate zeigte sich bei allen Materialien ein Maximum in der Abscheiderate in Abhängigkeit der Substrathärte im Bereich des Mittenrauwertes R_a kleiner $0,2 \mu\text{m}$.

Der Einfluss des Trägergases auf den Prozess der aerosolbasierten Kaltabscheidung stellte eine weitere große Versuchsreihe dieser Arbeit da. Dazu wurden acht unterschiedliche Trägergase (N_2 , O_2 , He, Ne, Kr, Ar, SF_6 und CO_2) zur Abscheidung von Al_2O_3 -Schichten verwendet. Es zeigte sich dabei, dass mit steigender Schallgeschwindigkeit die Abscheiderate ansteigt. Es kommt bei Gasen mit hoher Schallgeschwindigkeit zu einer höheren Geschwindigkeit der Partikel, wodurch diese auch eine höhere kinetische Energie besitzen und somit mehr Energie für den Schichtbildungsmechanismus zur Verfügung steht. Weiterhin wurde der Einfluss des Trägergases auf die mechanischen Schichtspannungen untersucht. Bei Verwendung von He und N_2 entstanden dabei die größten, bei Ne und O_2 die geringsten Schichtspannungen. Durch eine Mischung von Sauerstoff und Helium kann die hohe Abscheiderate von Helium erreicht werden, wobei sich aber Schichtspannungen auf dem Niveau von reinem Sauerstoff einstellen. Ein Tempern der Schichten zeigt außerdem, dass es bereits bei einer moderaten Temperaturbehandlung von nur $300 \text{ }^\circ\text{C}$ zu einem vollständigen Abbau der mechanischen Spannungen kommt.

Ein weiteres großes Kapitel umfasst die Messung der Isolationseigenschaften von Al_2O_3 -Schichten aus der aerosolbasierten Kaltabscheidung. Dazu wurden Proben gemäß DIN EN 62631-3-1 im Schutzringaufbau hergestellt und vermessen. Dadurch kann der Einfluss von Oberflächenströmen ausgeschlossen werden. Der spezifische Widerstand der Al_2O_3 -Schichten wurde bis $900 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen. Die Proben zeigen bereits beim ersten Aufheizen einen sehr hohen spezifischen Widerstand von $2,2 \cdot 10^{11} \Omega\text{cm}$ bei $400 \text{ }^\circ\text{C}$, der durch Tempern bei $900 \text{ }^\circ\text{C}$ sogar noch auf $1,8 \cdot 10^{12} \Omega\text{cm}$ erhöht werden konnte. Bei beiden Messzyklen ist im Arrhenius-artigen Diagramm des spezifischen Widerstandes ein Wechsel der Aktivierungsenergie von $0,9 \text{ eV}$ im Bereich niedriger Temperaturen zu $1,8 \text{ eV}$ bzw. $1,7 \text{ eV}$ im Bereich hoher Temperaturen vorhanden. Die Temperatur, bei der dieser Wechsel auftritt, kann durch Tempern der Probe von $750 \text{ }^\circ\text{C}$ hinunter zu $550 \text{ }^\circ\text{C}$ verschoben werden. Das lässt darauf schließen, dass der spezifische Widerstand, bzw. die elektrische Leitfähigkeit bei niedrigen Temperaturen auf einer elektrischen Leitung an den Korngrenzen basiert, während bei hohen Temperaturen das gesamte Korn an der Leitfähigkeit teilnimmt. Durch ein Kornwachstum bei $900 \text{ }^\circ\text{C}$ sinkt der Anteil der Korngrenzen in der Schicht, wodurch der spezifische Widerstand weiter zunimmt. Da weniger Korngrenzen zur

Verfügung stehen, sinkt auch die Temperatur des Wechsels im Mechanismus zu geringeren Temperaturen. Im Vergleich mit Werten aus der Literatur ist der spezifische Widerstand der kaltabgeschiedenen Al_2O_3 -Schichten sehr hoch und kann nur von einem hochreinen Al_2O_3 -Substrat überboten werden.

Des Weiteren wurden elektrische Impedanzspektroskopie-Messungen an den Al_2O_3 -Schichten vorgenommen. Hier zeigt sich, dass die Proben direkt nach der Abscheidung ein stark ungeordnetes Verhalten aufweisen, was durch eine nachfolgende Temperaturbehandlung deutlich verbessert werden kann. Die dielektrischen Verluste im Material nehmen dadurch ab. Die Ursache hierfür liegt möglicherweise im Schichtbildungsmechanismus, da durch das Aufbrechen in nanokristalline Bruchstücke eine große Anzahl ungeordneter Defekte entstehen, die durch die Temperaturbehandlung abgebaut werden können.

Im letzten Abschnitt dieser Arbeit wurde der mögliche Einsatz kaltabgeschiedener Al_2O_3 -Schichten als Passivierungsschichten zur Abdeckung von Platinstrukturen untersucht. Es wurde in einem standardmäßigen Aufbau eines Pt-Dünnschicht-Temperaturensors eine Diffusionssperrschicht aus einem PVD-Prozess durch eine Al_2O_3 -Schicht der aerosolbasierten Kaltabscheidung substituiert. Dadurch wird es möglich, eine Al_2O_3 -Schicht aufzubringen, die im Gegensatz zum PVD-Prozess ohne nachfolgendes Tempern bereits in der α -Phase vorliegt und somit keine Phasenumwandlung stattfindet. Es wurden Sensormuster mit einer solchen Diffusionssperrschicht aus Al_2O_3 hergestellt. Die hergestellten Schichten zeigten keine Delaminationen auf den Strukturen oder Risse innerhalb der Schicht. REM-Bilder zeigen außerdem, dass die Schicht dicht ist und eine sehr gute Anhaftung an das Substrat und die Pt-Struktur aufweist. An den Mustersensoren wurden zwei Testreihen durchgeführt. Zum einen eine 500-stündige bestromte Auslagerung der Sensoren bei 950 °C und zum anderen ein Temperaturwechseltest, bei dem die Sensoren 12.000-mal schlagartig von 950 °C abgekühlt wurden. Im Anschluss an die beiden Versuche wurde die Widerstandskennlinie aufgenommen und mit der Kennlinie vor den Versuchen verglichen. Dabei zeigte sich bei beiden Versuchen, dass die Sensoren mit Schichten der aerosolbasierten Kaltabscheidung sowohl in der Widerstandsänderung als auch beim Widerstandsdrift besser oder zumindest gleichgut im Vergleich zu PVD-Schichten abgeschnitten haben. Vor allem beim Temperaturwechseltest konnte die Stabilität der Sensoren durch die Schicht der aerosolbasierten Kaltabscheidung deutlich verbessert werden.

Summary

Alumina (Al_2O_3) is one of the most widely used materials for the production of highly insulating coatings, as this material has a high specific electrical resistance even at high temperatures. Typically, Al_2O_3 coatings require temperatures well above $1200\text{ }^\circ\text{C}$, which is why low-melting substrate materials cannot be used. In addition, the standard PVD (Physical Vapour Deposition) processes result in the formation of Al_2O_3 in the γ -phase instead of the favored thermodynamically stable α -phase, which first forms at temperatures above $1000\text{ }^\circ\text{C}$. A relatively new coating process in which these problems do not occur is the Aerosol Deposition Method (ADM). With this process, dense ceramic layers can be deposited directly from the raw powder at room temperature without the coating material undergoing a phase transformation. The entire deposition process takes place at room temperature and ceramic coatings can thus be produced on almost any substrate material.

In the present work, several influencing parameters on a successful deposition of the Aerosol Deposition were investigated. In the first step, criteria for the selection of suitable powders were searched. The mean particle diameter d_{50} , the specific surface area S_{BET} , and the Carr-index were measured on 15 powders and after grinding, the powders were deposited on two different substrate materials. The deposition rate, the adhesion to the substrate, and the long-term stability of the layers were investigated. The coating of hard Al_2O_3 substrates showed that the formation of sufficient adhesion to the substrate is the critical point of deposition, as the layers were subject to increased delamination after deposition. Powders with a small mean particle diameter d_{50} and a simultaneously high specific surface area S_{BET} proved to be suitable for this purpose. The layers, which showed good adhesion, also had good long-term stability. On the softer glass substrates, the formation of good adhesion is less critical, since the ductility of the substrate can cause deformation of the surface, resulting in mechanical adhesion of the layer to the substrate. The critical points here are the subsequent layer growth and the long-term stability of the layers.

As the substrate has a significant influence on the deposition success in Aerosol Deposition, investigations were carried out into the influence of substrate hardness and

surface roughness. Four substrate materials (LTCC, sapphire, 96 % and 99.6 % Al_2O_3) of different hardness with varying surface roughness were prepared and coated. When evaluating the deposition rate, a maximum in the deposition rate was found for all materials in the range of the average roughness value R_a less than $0.2 \mu\text{m}$, depending on the substrate hardness.

The influence of the carrier gas on the Aerosol Deposition process was another major experimental series of this work. Eight different carrier gases (N_2 , O_2 , He, Ne, Kr, Ar, SF_6 , and CO_2) were used to deposit Al_2O_3 -layers. It turned out that the deposition rate increases with increasing sound velocity. In the case of gases with high sound velocity, the particles reach a higher velocity, which means that they also have a higher kinetic energy and thus more energy available for the film-formation mechanism. Furthermore, the influence of the carrier gas on the mechanical film stress was investigated. When He and N_2 were used, the highest stress was generated, the lowest stress was generated with Ne and O_2 . A mixture of oxygen and helium can achieve the high deposition rate of helium, but the film stress is at the level of pure oxygen. In addition, a moderate heat treatment of only $300 \text{ }^\circ\text{C}$ is sufficient to a completely diminish the measurable stresses.

Another large section covers the measurement of the insulation properties of Al_2O_3 -layers from Aerosol Deposition. For this purpose, samples were produced and measured in a three-electrode setup with guard ring in accordance with DIN EN 62631-3-1. This allows the influence of surface currents to be excluded. The resistivity of the Al_2O_3 -layers was measured up to $900 \text{ }^\circ\text{C}$. The samples already show a very high specific resistance of $2,2 \cdot 10^{11} \Omega\text{cm}$ at $400 \text{ }^\circ\text{C}$, which can be even increased by tempering at $900 \text{ }^\circ\text{C}$ up to $1,8 \cdot 10^{12} \Omega\text{cm}$. Visible in the Arrhenius-like plot of the specific resistance of both measuring cycles, a change of the activation energy from $0,9 \text{ eV}$ in the range of low temperatures to $1,8 \text{ eV}$ and/or $1,7 \text{ eV}$ in the range of high temperatures. The temperature at which this change occurs shifts from $750 \text{ }^\circ\text{C}$ down to $550 \text{ }^\circ\text{C}$ by annealing the sample. This suggests that the resistivity or electrical conductivity at low temperatures is based on an electrical conduction at the grain boundaries, while at high temperatures the entire grain participates in the conductivity. Grain growth at $900 \text{ }^\circ\text{C}$ reduces the proportion of grain boundaries in the layer, further increasing the resistivity. As fewer grain boundaries are available, the temperature of the change also decreases to lower temperatures. Compared to values from literature, the resistivity of the aerosol deposited Al_2O_3 -films is very high and can only be surpassed by a high purity Al_2O_3 -substrate.

Electrical impedance measurements were also carried out on the Al_2O_3 -films. Here, it can be seen that the samples show a strongly disordered behavior after the deposition, which can be significantly improved by a subsequent heat treatment. The dielectric loss in

the material thus decreases. The reason for this may be the layer formation mechanism, since the break-up into nanocrystalline fragments results in a large number of disordered defects that can be eliminated by heat treatment.

In the last section of this thesis, the possible use of aerosol deposited Al_2O_3 -layers as passivation layers to cover platinum temperature sensor structures was investigated. A diffusion barrier layer from a PVD process was substituted with an Al_2O_3 -layer from the Aerosol Deposition Method in a standard platinum thin film temperature sensor. This makes it possible to apply an Al_2O_3 -layer which, in contrast to the PVD process, is already present in the α -phase without subsequent annealing and therefore no phase transformation takes place. Sensor patterns with a diffusion barrier layer made of Al_2O_3 were produced. The layers showed no delamination on the structures or cracks within the layer. SEM images also show that the layer is dense and has very good adhesion to the substrate and the Pt structure. Two series of tests were carried out on the sensors. The sensors were exposed to a measurement current for 500 hours at 950 °C. In addition, a temperature cycling test in which the sensors were abruptly cooled down from 950 °C for 12,000 times. Following the two tests, the resistance characteristic curve was recorded and compared with the characteristic curve before the tests. Both tests showed that the sensors with layers from the Aerosol Deposition Method performed better or at least equal to PVD layers both in terms of resistance change and resistance drift. Especially in the temperature cycling test, the stability of the sensors could be significantly improved when covering the sensor by a layer made with the Aerosol Deposition Method.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Summary	v
Inhaltsverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung der Arbeit	7
3 Grundlagen der aerosolbasierten Kaltabscheidung	9
3.1 Prozessablauf und Aufbau einer Beschichtungsanlage	9
3.2 Abscheidemechanismus	12
3.3 Schichtstruktur und –morphologie	15
3.4 Modellierung des Aufprallvorganges	18
3.5 Materialien für die aerosolbasierte Kaltabscheidung und deren funktionellen Eigenschaften und Anwendungen	21
3.6 Co-Deposition unterschiedlicher Materialien	23
3.7 Aerosolbasierte Kaltabscheidung am Lehrstuhl für Funktionsmaterialien	25
4 Untersuchungen zum Schichtbildungsmechanismus und Einfluss der Prozessparameter	29
4.1 Pulverauswahl, -vorbereitung und Einfluss der Pulvereigenschaften auf die Abscheiderate und Schichtstabilität	29
4.1.1 Pulverauswahl und –vorbereitung	31
4.1.2 Pulvercharakterisierung	32
4.1.3 Schichtabscheidung und Langzeitstabilität	37
4.1.4 Korrelation der Pulvereigenschaften mit dem Abscheideverhalten auf Al ₂ O ₃ -Substraten	39
4.1.5 Korrelation der Pulvereigenschaften mit dem Abscheideverhalten auf Glas-Substraten und die Schichtstabilität	41
4.2 Einfluss der Substrathärte und Oberflächenbeschaffenheit auf die Abscheidung	44
4.2.1 Vermessung der Substrathärte und Einstellung der Oberflächenrauheit	44
4.2.2 Abhängigkeit der Abscheiderate von der Substrathärte und der Oberflächenrauheit	46

4.2.3 Bewertung der Schichtanhaftung auf unterschiedlichen Substrathärten	47
4.3 Modularer Schichtaufbau mit zwei unterschiedlichen Pulvern	49
4.4 Variation der Pulvervorbereitung zur Vermeidung von Verunreinigungen	54
4.4.1 Identifikation der Pulververunreinigungen	54
4.4.2 Umstellung der Pulverpräparation zur Vermeidung von Verunreinigungen	57
4.5 Trägergasvariation und Einfluss auf die Schichteigenschaften	62
4.5.1 Einfluss auf die Abscheiderate	64
4.5.2 Mechanische Schichtspannungen	68
4.5.3 Mechanische Schichtspannungen bei der Mischung zweier Trägergase	71
4.5.4 Entwicklung der mechanischen Schichtspannungen bei einer Temperaturbehandlung bis 800 °C	73
4.5.5 Transmission	76
4.6 Berechnung der benötigten Pulvermenge zur Herstellung einer Beschichtung	81
5 Untersuchung der Isolationseigenschaften von Aluminiumoxid-Schichten	85
5.1 Grundlagen der dielektrischen Eigenschaften von Feststoffen	86
5.2 Grundlagen des spezifischen Widerstandes von Isolatoren	87
5.3 Prinzip der Schutzringanordnung: Widerstandsmessung von Isolatoren	89
5.4 Messung des spezifischen Widerstandes kaltabgeschiedener Al ₂ O ₃ -Schichten	91
5.4.1 Probenherstellung und Kontaktierung	92
5.4.2 Messaufbau	97
5.4.3 Polarisationsverhalten im Zeitbereich	99
5.4.4 Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes	100
5.4.5 Untersuchung zum Einfluss von Oberflächenströmen	102
5.4.6 Vergleich der Ergebnisse mit Literaturwerten	104
5.4.7 Einfluss von Verunreinigungen auf den spezifischen Widerstand	107
5.5 Einfluss des Sauerstoffpartialdrucks auf den spezifischen Widerstand	110
5.5.1 Messprogramm der Sauerstoffpartialdruck-Messungen	110
5.5.2 Temperaturabhängige Messung des Einflusses des Sauerstoffpartialdruckes auf die elektrische Leitfähigkeit	111
5.5.3 Defektchemische Betrachtung der gewonnenen Ergebnisse	114
5.6 Impedanzspektroskopie an kaltabgeschiedenen Al ₂ O ₃ -Schichten	117
5.6.1 Grundlagen der Impedanzspektroskopie an dielektrischen Materialien	117
5.6.2 Auswirkung einer Temperaturbehandlung auf den Verlustfaktor	119
5.6.3 Vergleich des spezifischen Wechselstromwiderstandes mit dem spezifischen Gleichstromwiderstand	122

6 Kaltabgeschiedene Passivierungsschichten zur Abdeckung von Platinstrukturen	125
6.1 Herstellungsprozess von Pt-Dünnschicht Temperatursensoren	126
6.2 Aufbau von Sensormustern mit Diffusionssperrschichten aus der aerosolbasierten Kaltabscheidung	127
6.3 Vergleich der Sensorkennlinien	131
7 Zusammenfassung, Fazit und Ausblick	137
A Anhang	143
Abkürzungen und Symbole	147
Urheberrechtshinweise	153
Literaturverzeichnis	155
Verzeichnis eigener Publikationen	
Danksagung	