# Minimierung des elektrischen Kontaktwiderstands verzinnter Kupfer-Kontakte mittels Laserinterferenzstrukturierung

Trinh, K. E. (1, 2); Mücklich, F. (1, 2)

**Elektrische Steckverbinder in Kraftfahrzeugen müssen vielfältigen, teils konträren Anforderungen gerecht werden, wie beispielsweise einem stabilen, niedrigen elektrischen Kontaktwiederstand bei gleichzeitigen niedrigen Steck- und Ziehkräften. In dieser Studie wurde die Oberfläche feuerverzinnter Kupfer-Steckverbinder mittels der direkten Laserinterferenzstrukturierung modifiziert. Experimentell wurde eine Reduzierung des elektrischen Kontaktwiderstands um bis zu 81 % infolge der Laserstrukturierung nachgewiesen.**

Elektrische Steckverbinder sind während des Betriebs in Kraftfahrzeugen hohen Temperaturen, starken Temperaturschwankungen, Vibrationen sowie korrosiven Medien ausgesetzt. Um eine leichte Montage zu ermöglichen, werden zudem niedrige Steck- und Ziehkräfte gefordert, was sich nachteilig auf die elektrische Leitfähigkeit und die Beständigkeit gegen Vibrationsverschleiß (Fretting) auswirken kann [1-3]. Verschärft werden die Einsatzbedingungen von Steckverbindern zudem durch den Trend der Miniaturisierung in Kraftfahrzeugen und den damit verbundenen stärkeren Vibrationen sowie höheren Betriebstemperaturen, insbesondere im Motorraum. Somit ist eine höhere Verschleißbeständigkeit bei gleichzeitig steigender Anzahl an Einzelkontakten gefordert [4, 5].

Um diesen Anforderungen gewachsen zu sein, stehen neben rein konstruktiven Lösungen vor allem materialwissenschaftliche Ansätze im Fokus. Die Funktionseigenschaften eines Steckverbinders werden neben dem Basismaterial, bei dem es sich meist um Kupferlegierungen handelt, vor allem durch den Beschichtungswerkstoff bestimmt (z.B. Zinnlegierungen). Werkstofftechnische Maßnahmen zur Reduzierung der Steck- und Ziehkräfte sowie zur Stabilisierung des elektrischen Kontaktwiderstands sind u.a. die Legierungsverbesserung der Beschichtung oder des Basismaterials, das Aufbringen diffusionshemmender Zwischenschichten oder eine nachgeschaltete Wärmebehandlung [6].

Ein vielversprechendes Verfahren zur Optimierung von Werkstoffoberflächen stellt die topographische, periodische Strukturierung der Beschichtung oder des Basismaterials dar [7, 8]. Aufgabe der Struktur sind die Verbesserung der tribologischen Eigenschaften sowie die Stabilisierung und Reduzierung des elektrischen Kontaktwiderstands. Bei dem im Rahmen der aktuellen Studie verwendeten Werkzeug zur Erzeugung der periodischen Topographie handelt es sich um die sogenannte Laserinterferenzstrukturierung, mit deren Hilfe auf der Steckverbinderoberfläche ein periodisches Muster in der Größenordnung von wenigen µm erzeugt werden kann. Untersucht wird die lastabhängige Entwicklung des elektrischen Kontaktwiderstands der strukturierten Steckverbinderwerkstoffe unter stationären Bedingungen. Die den beobachteten Effekten zugrundeliegenden Mechanismen werden durch den Vergleich zwischen Referenz und laserstrukturierten Proben mittels detaillierter Materialanalyse (Topographie, Oberflächenchemie und Mikrostruktur) aufgeklärt.

## Experimente und Methodik

Untersucht wurde kommerziell erhältliches, feuerverzinntes Band, dessen Grundwerkstoff aus einer Kupfer-Zinn-Legierung bestand. Die Banddicke betrug dabei ca. 320 µm und die Schichtdicke ca. 2 µm. Ein Teil der Proben wurde unmittelbar nach Reinigung im Ultraschallbad einer Laserbehandlung unterzogen. Das Prinzip der Laserinterferenzstrukturierung ist in Bild 1 dargestellt. Bei diesem Verfahren werden mindestens zwei Laserstrahlen auf der Probenoberfläche überlagert. Infolge der Interferenz der Einzelstrahlen entsteht eine periodische Intensitätsverteilung. Je nach Laser-Leistung können zwischen den Intensitätsmaxima und –minima Temperaturunterschiede von mehr als 1.000 °C vorliegen. Daraus resultiert ein starker Gradient der Oberflächenspannungen, der über Konvektion des schmelzflüssigen Materials und rascher Wiedererstarrung zur Entstehung einer periodischen Oberflächenstruktur führt. Auf diese Weise lassen sich Oberflächen mit Geschwindig-

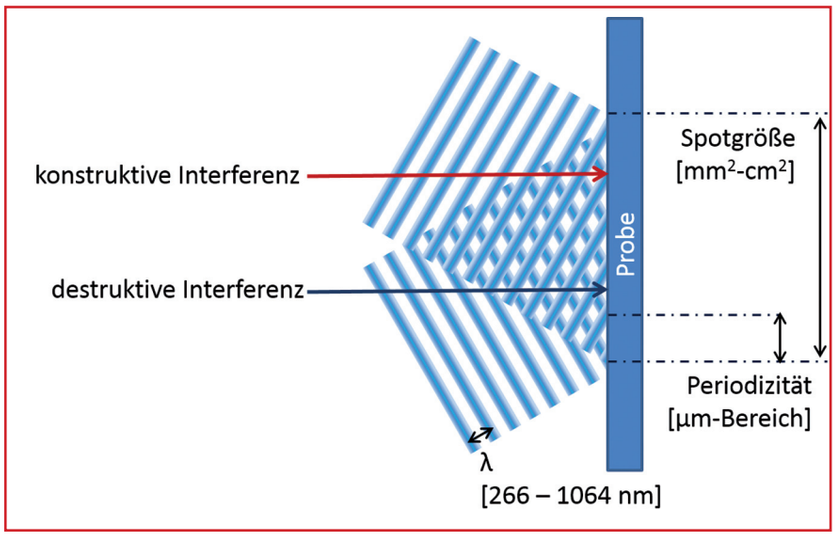


**Bild 1: Prinzip der direkten Laserinterferenzstrukturierung (schematische Darstellung)**

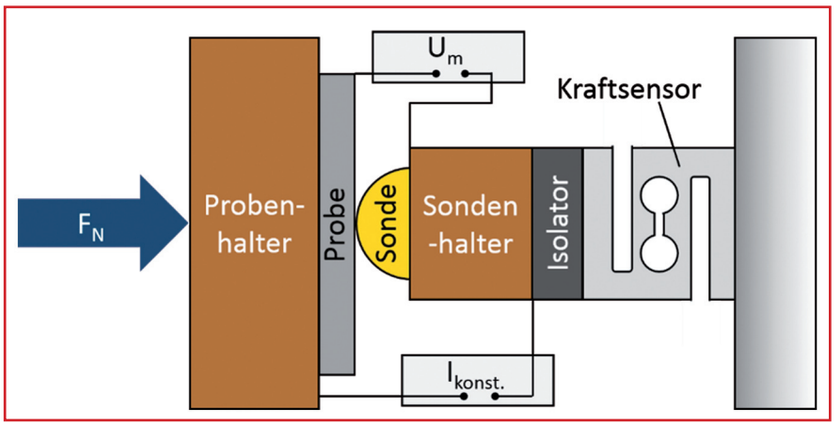


**Bild 2: Prüfstand zur Messung des elektrischen Kontaktwiderstands (schematische Abbildung) [10]**

keiten von bis zu mehreren $cm^2/s$ strukturieren. Eine detaillierte Beschreibung dieses Verfahrens kann der entsprechenden Veröffentlichung von Mücklich et al. entnommen werden [9].

Der elektrische Kontaktwiderstand wurde experimentell mit dem in Bild 2 dargestellten Prüfstand über die Vier-Leiter-Methode unter dry-circuit-Bedingungen (U < 20 mV, I < 100 mA) bestimmt. Eine detaillierte Beschreibung des Prüfstands kann [8] entnommen werden. Prinzipiell wird ein konstanter Strom angelegt und der Spannungsabfall zwischen einer goldbeschichteten Sonde und der Probe (Referenz bzw. strukturiert) in Abhängigkeit von der Normallast gemessen (von 0,25 bis 10,00 N). Anhand des Spannungsabfalls und dem Prüfstrom wird der elektrische Kontaktwiderstand kalkuliert.

Die durch Laserstrukturierung erzeugte Topographie wurde mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und fokussierter Ionenstrahl-Mikroskopie (engl. Focused Ion Beam, FIB) studiert. Weiterhin wurde eine Phasenanalyse durch Röntgendiffraktometrie (engl. X-Ray Diffraction, XRD) durchgeführt, um potentiell durch die Laserbestrahlung ausgelöste Änderungen der chemischen Zusammensetzung zu untersuchen.

## Ergebnisse und Diskussion

Die Werkstoffoberfläche und der Querschnitt des Bandes vor und nach Laserstrukturierung sind in Bild 3 dargestellt. Auf der Oberfläche der Referenz sind zahlreiche Kratzer erkennbar. Die intermetallische Phase, die zwischen dem Kupferband und der Zinnschicht sichtbar ist, weist eine unregelmäßige Dicke auf (Bild 3 b). Durch die Laserstrukturierung wird auf der Oberfläche ein Punktmuster mit hexagonaler Anordnung erzeugt. Kratzer sind anschließend nicht mehr auf der Oberfläche vorhanden, wohl aber wiedererstarrte Schmelztröpfchen (Bild 3 c). Durch den Wärmeeintrag der Laserstrukturierung wurde die Morphologie der intermetallischen Phase verändert. XRD-Analysen zeigen jedoch, dass keine neuen Phasen erzeugt wurden. Sowohl im Referenz- als auch im texturierten Zustand lag die η-Phase ($Cu_6Sn_5$) vor [10]. Die in der Literatur vielfach beobachtete ε-Phase ($Cu_3Sn$) konnte nicht nachgewiesen werden. Auf der Probenoberfläche lag zudem eine im FIB-Querschnitt nicht sichtbare, elektrisch isolierende Zinnoxidschicht vor (Dicke < 10 nm), die über Raman-Spektroskopie als SnO identifiziert werden konnte [11].

Das Ergebnis der Kontaktwiderstandsmessungen ist in Bild 4 dargestellt. Zunächst wird der Kurvenverlauf der Referenzprobe diskutiert. Der elektrische Widerstand nimmt bei Belastung ab und bei Entlastung wieder zu. Die Ursache hierfür ist die lastabhängige Variation der leitfähigen Kontaktfläche. Mit zunehmender Last nimmt die Anzahl leitfähiger a-Spots zu, was wiederum eine Abnahme des elektrischen Kontaktwiderstands zur Folge hat [12]. Zudem liegt zwischen Be- und Entlastung eine Hysterese vor. Dies kann auf eine permanente Erhöhung der realen Kontaktfläche aufgrund plastischer Deformation innerhalb der Kontaktzone zurückgeführt werden, die bei Belastung auftritt [12].

Auch die mit dem hexagonalen Punktmuster strukturierten Proben zeigen das gleiche lastabhängige Verhalten, wobei sich die Absolutwerte der Ergebnisse unterscheiden (Bild 4, rote Kurve). Drei wesentliche Unterschiede zwischen Referenz und strukturiertem Zustand sind erkennbar:

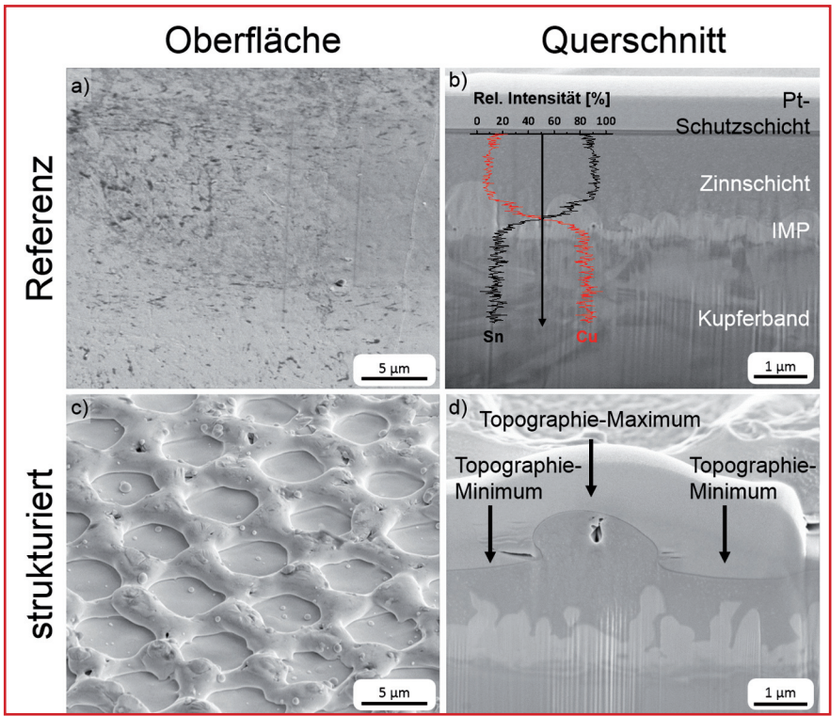


**Bild 3: : REM-Abbildungen der verzinnten Kupferbänder. Oberfläche der Referenz (a) bzw. der strukturierten Probe (c) (Beobachtungswinkel 52°). FIB-Querschnitt der entsprechenden Proben (b: Referenz, d: strukturiert). In b) zeigt ein EDX-Linescan die chemische Zusammensetzung der Probe über den Querschnitt. IMP – intermetallische Phase [10].**

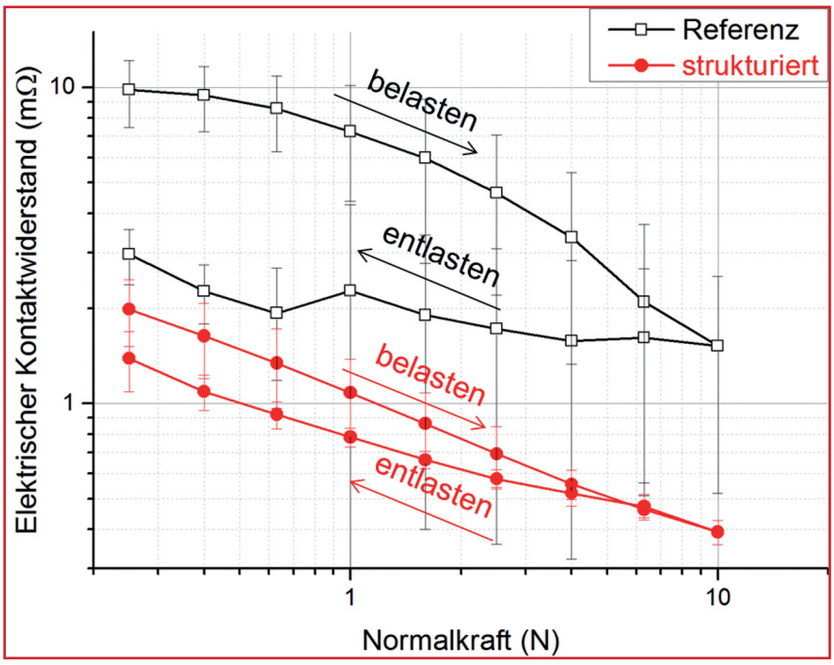


**Bild 4: Elektrischer Kontaktwiderstand als Funktion der Normalkraft. Doppeltlogarithmische Darstellung des Referenz- und des strukturierten Zustands (hexagonales Punktmuster, Periode 7,5 µm) [8].**

1. Kleinere Streuung der Ergebnisse (eine Größenordnung),
2. Kleinere Hysterese des Kontaktwiderstands (eine Größenordnung),
3. Geringerer elektrischer Kontaktwiderstand (Belastung: Faktor 4,5 – 6,9; Entlastung: Faktor 2,1 – 3,4).

Ursache für die geringere Streuung der Ergebnisse ist die Homogenisierung der Oberfläche durch das Aufbringen einer Laserstruktur. Die in Bild 3 a) erkennbaren, zufällig verteilten Kratzer auf der Oberfläche haben einen signifikanten Einfluss auf die leitfähige Kontaktfläche, die sich während der Messung des Kontaktwiderstandes ausbildet. Je nachdem, ob der Kontaktwiderstand in einem Areal mit oder ohne Kratzern gemessen wird, kann es zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Nach der Laserbehandlung liegt jedoch eine periodisch strukturierte, glatte Oberfläche ohne Kratzer vor, sodass sich die Kontaktwiderstände sich weniger stark unterscheiden als auf der Referenz.

Die Gründe für die kleinere Hysterese und die geringeren Absolutwerte des Kontaktwiderstands liegen in einem durch die periodische Struktur verursachten, geänderten plastischen Deformationsverhalten. Durch die aufgebrachte Topographie wird die lokale Flächenpressung im Kontakt stark erhöht, was das Fließen der Zinnschicht erleichtert und somit ein Aufreißen der oberflächlich vorliegenden, isolierenden Zinnoxidschicht erleichtert. Diese Oxidschicht besitzt im Vergleich zu metallischem Zinn eine um sechs Größenordnungen niedrigere elektrische Leitfähigkeit und stellt eine wichtige Einflussgröße für den elektrischen Kontaktwiderstand dar [13, 14].

Die Kontaktfläche nach unterschiedlichen Belastungen zeigt Bild 5. Es ist erkennbar, dass die Zinnschicht mit zunehmender Last von den topographischen Maxima in die Minima fließt. Bei der maximalen Normalkraft von 10,0 N ist die Oberfläche im Zentrum der Kontaktfläche vollständig eingeebnet (Bild 5 c). Die Reste der ursprünglichen Struktur sind noch erkennbar. Kontaktphysikalische Simulationen beweisen, dass zum Durchbrechen der Oxidschicht auf der strukturierten Probe eine um bis zu 20 % reduzierte minimale Flächenpressung notwendig ist, wodurch die elektrisch leitfähige Kontaktfläche gegenüber der unstrukturierten Referenz mehr als verdoppelt werden kann und der elektrische Kontaktwiderstand entsprechend abnimmt [15].

Da die Oxidschicht auf den strukturierten Proben schon bei geringen Belastungen durchbrochen werden kann, liegt der Unterschied im Kontaktwiderstand bei Be- und Entlastung nur in der Änderung der realen Kontaktfläche aufgrund der plastischen Deformation begründet. Der Einfluss der Oxidschicht spielt auf der strukturierten Probe im Vergleich zur Referenz eine untergeordnete Rolle, was nicht nur die Ursache für die Reduzierung des elektrischen Kontaktwiderstands, sondern auch für die geringere Hysterese ist.

## Fazit

Die direkte Laserinterferenzstrukturierung stellt ein flexibles Werkzeug zur Optimierung des elektrischen Kontaktwiderstands dar. Die erzeugte periodische Oberflächentopographie führt zu einer erhöhten Flächenpressung im Kontaktpunkt und erleichtert somit das Aufbre-

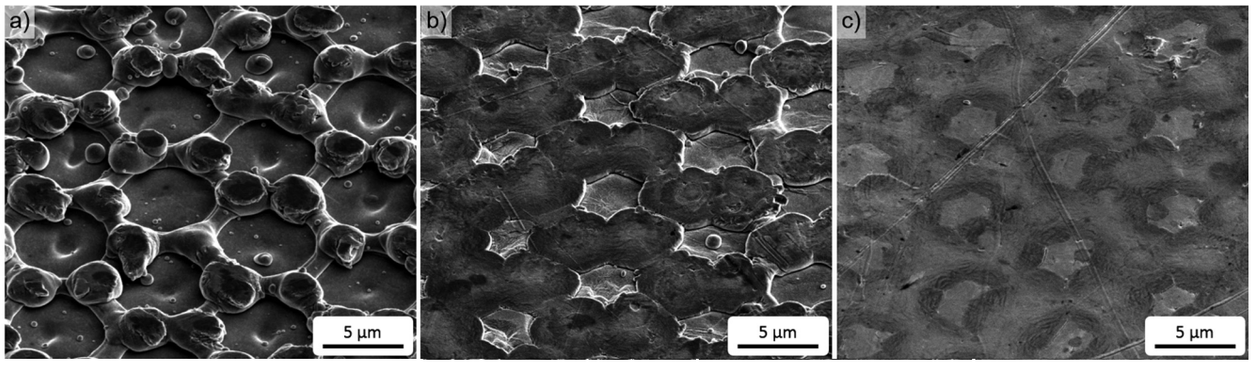


**Bild 5: REM-Aufnahmen der verzinnten Oberfläche nach unterschiedlichen Belastungen (Beobachtungswinkel 52°). a) Normalkraft FN = 0,1 N, b) FN = 4,0 N; c) FN = 10,0 N.**

chen von schlecht leitenden Oxidschichten auf der Zinnoberfläche. Durch die Laserinterferenzstrukturierung kann der elektrische Kontaktwiderstand um bis zu 86 % reduziert werden.

## Literatur


[1] R. S. Mroczkowski, „Contact Finishes“, in Electronic connector handbook: theory and applications, McGraw-Hill, 1998, pp. 3.1-3.49.

[2] M. Braunovic, V. V. Konchits and N. K. Myshkin, Electrical contacts: fundamentals, applications and technology, CRC Press, 2006, pp. 205-259.

[3] M. Antler and P. G. Slade, Electrical Contacts - Principles and Applications, pp. 309-401.

[4] I. Buresch, A. Möck and F. Bubeck, „Traditionelle Steckverbinderwerkstoffe – hochfest und gut umformbar“, VDE-Fachbericht-Kontaktverhalten Und Schalten, 2007.

[5] Y. W. Park, T. S. N. Sankara Narayanan and K. Y. Lee, „Effect of temperature on the fretting corrosion of tin plated copper alloy contacts“, Wear, vol. 262, pp. 320-330, 2007.

[6] I. Buresch, „Möglichkeiten der Eigenschaftsoptimierung von Zinnoberflächen für Steckkontakte“, Kontaktverhalten und Schalten, 2013.

[7] M. Leidner, M. Myers, H. Schmidt, S. Sachs and S. Thoss, „Enhancing the contact interface by matching the surface pressure and current density distribution,“ in Proceedings of the 27th International Conference on Electrical Contacts, Dresden, 2014, pp. 1-6.

[8] K. E. Trinh, F. Muecklich and E. Ramos-Moore, „The role of microstructure and surface topography in the electrical behavior of Sn-coated Cu contacts,“ in Proceedings of the 27th International Conference on Electrical Contacts, Dresden, 2014, pp. 243-248.

[9] F. Mücklich, A. Lasagni and C. Daniel, „Laser Interference Metallurgy–using interference as a tool for micro/nano structuring“, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 97, pp. 1337-1344, 2006.

[10] K. E. Trinh and F. Muecklich, „Laserinterferenzstrukturierung als Werkzeug zur Optimierung elektrischer Steckverbinder“ in 23. Fachtagung Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2015, .

[11] K. E. Trinh. „Laserinterferenztexturierung elektrischer Steckverbinder für die Automobilindustrie“, Saarbrücken, 2015, Dissertation.

[12] R. S. Timsit, „Electrical contact resistance: Properties of stationary interfaces“, IEEE Trans. Compon. Packag. Technol., vol. 22, pp. 85-98, 1999. . DOI: 10.1109/6144.759357.

[13] R. C. Weast, M. J. Astle and W. H. Beyer, „CRC handbook of chemistry and physics“, CRC press Boca Raton, FL, 1988.

[14] P. S. Patil, R. K. Kawar, T. Seth, D. P. Amalnerkar and P. S. Chigare, „Effect of substrate temperature on structural, electrical and optical properties of sprayed tin oxide (SnO2) thin films“, Ceram. Int., vol. 29, pp. 725-734, 2003.

[15] K. E. Trinh, M. Leidner, H. Schmidt and F. Muecklich, „Der Einfluss von Lasertexturierung auf die Mikrostruktur und das elektrische Verhalten von verzinnten Kupferkontakten.“ in Symposium Connectors, Lemgo, 2015.



*1) Lehrstuhl für Funktionswerkstoffe, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Deutschland*

*(2) Material Engineering Center Saarland, Saarbrücken, Deutschland*


# MKM: Die Sieger des Architekturwettbewerbs für das neue Verwaltungsgebäude stehen fest – Nachhaltigkeit, Funktionalität und Denkmalschutz verbunden

MKM Mansfelder Kupfer und Messing GmbH (MKM), Hettstedt, hat die Sieger des mit insgesamt 12.700 Euro dotierten Architekturwettbewerbs gekürt. Jenny Rüssel und Teresa Stenger überzeugten mit ihrem Entwurf für ein neues Verwaltungsgebäude sowie für die Landschaftsarchitektur des Unternehmensgeländes überzeugt. 80 Studenten der Hochschule Anhalt in Dessau unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Rudolf Lückmann hatten insgesamt 40 Vorschläge erarbeitet. Die beiden zweiten Plätze erreichten die Entwürfe von Jan Niklas Höhne und Palle Frens sowie von Alexander Tim Roeskens und Dominik Keul. „Die Wahl ist uns nicht leicht gefallen. Die Studenten hatten zahlreiche ausgezeichnete Entwürfe entwickelt und unsere Anforderungen an Nachhaltigkeit, Funktionalität und Denkmalschutz im historischen Ensemble berücksichtigen“, betont Roland Harings, CEO von MKM. Die Entscheidung über die Realisierung des Neubaus soll in der zweiten Jahreshälfte fallen. Mit den Siegerentwürfen hat die Entscheidung eine hervorragende architektonische Grundlage.

Foto: MKM

**Die Jury mit den Siegerinnen (v.l.n.r.): Prof. Dr.-Ing. Rudolf Lückmann, Hochschule Anhalt, Ian Howard, Aufsichtsratsvorsitzender, CFO Gerhard Bickmann, CEO Roland Harings; Sachsen-Anhalts Wissenschafts- und Wirtschaftsminister Hartmut Möllring; Siegerin Teresa Stenger; Siegerin Jenny Rüssel; Landeskonservatorin Dr. Ulrike Wendland; Ian Hannam, Partner bei MKM-Eigentümer Hannam&Partners und Prof. Dr. Dr. h.c. Dieter Orzessek, Präsident der Hochschule Anhalt.**