

kupfer_

Kupfer- Symposium 2023

29. bis 30. November 2023

Werkstofftagung in Jena

In Kooperation mit:

Friedrich-Schiller-Universität Jena /
Otto-Schott-Institut für Materialforschung



© Anne Günther / Universität Jena



Das „Otto-Schott-Institut für Materialforschung“ (OSIM) ist ein fakultätsübergreifendes Institut der Physikalisch-Astronomischen Fakultät und der Chemisch-Geowissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena, der größten Hochschule und der einzigen Volluniversität im Freistaat Thüringen. Im Fokus der Forschung steht die Korrelation zwischen Struktur und Eigenschaft unterschiedlicher Werkstoffklassen als Funktion ihrer Synthese- und Einsatzbedingungen. Der dort angesiedelte Lehrstuhl für Metallische Werkstoffe konzentriert sich in der Forschung auf Legierungsentwicklung, Charakterisierung von Gefüge und Eigenschaften metallischer Werkstoffe, Gefügebildung (Phasenumwandlungen flüssig/fest und fest/fest) und innere und äußere Grenzflächen.

Programmausschuss

- C. Blecking / Kupferverband e.V, Düsseldorf
Dr. P. Böhlke / KME Germany GmbH & Co. KG, Osnabrück
Dr. U. Hofmann / Wieland-Werke AG, Ulm
Dr. A. Jörg / HME Brass Germany GmbH, Berlin
Dr. S. Lippmann / Otto-Schott-Institut für Materialforschung, Universität Jena
Dr. K. Ockenfeld / Kupferverband e.V., Düsseldorf
J. Pesl / Montanwerke Brixlegg, Brixlegg
Dr. M. Rehse / Gebr. Kemper GmbH & Co. KG, Olpe
M. Sander / Kupferverband e.V., Düsseldorf
B. Schmitz M.A. / Kupferverband e.V., Düsseldorf
Dr. F. Seuß / Diehl Metall Stiftung & Co. KG, Röthenbach
Dr. L. Tikana / Kupferverband e.V., Düsseldorf

kupfer_

Die Veranstaltung bietet Forschungs-instituten, Hochschulen und Industrie die Möglichkeit, den Dialog zu intensivieren und die Zusammenarbeit zu optimieren. Der Kupferverband als zentraler Verband der Kupferindustrie mit europäischer Ausrichtung bündelt die unterschiedlichen fachspezifischen Interessen der kupferverarbeitenden Unternehmen und ist das Sprachrohr der Kupferindustrie.

Das verbandseigene Expertenteam aus unterschiedlichsten Fachbereichen wie Werkstoffwissenschaften, Umwelt und Gesundheit, Bauwesen, Marktanalyse sowie Kommunikation und Marketing, verfügt über ein profundes Kupfer-Wissen, das weltweit höchste Anerkennung genießt und zu allen Fragen der Anwendung und des Einsatzes von Kupferwerkstoffen, wissenschaftlichen Grundlagen und regulatorischen Aspekten kompetenter Ansprechpartner ist. Ingenieurleistungen zur Optimierung von Produkt und Produktion, Analyse und Fehler- Vermeidung, komplexe

Material- und Bauteiluntersuchungen sowie ein breit gefächertes Bildungsangebot runden das Portfolio ab.

Das Kupfer-Symposium ist die bedeutendste deutschsprachige Plattform für einen professionellen Erfahrungsaustausch zwischen Industrie und Hochschul-Forschung und eine der wichtigsten werkstoffwissenschaftlichen Veranstaltungen zum Thema Kupfer. Neben den hochwertigen Fachvorträgen wird von den Teilnehmern insbesondere die Möglichkeit geschätzt, sich überkünftige Entwicklungen innerhalb der Werkstoff- und Fertigungstechnik auszutauschen und neue Forschungsansätze zu definieren.



Tagungsprogramm - Tag 1

Mittwoch, 29. November 2023

Tagungsort: Steigenberger Esplanade Jena

WERKSTOFFTAGUNG

Tag 1

Mittwoch, 29. November 2023

9:00 Uhr
Eintreffen der Gäste

9:30 Uhr
Begrüßung
Dr.-Ing. S. Lippmann, Lehrstuhl für
Metallische Werkstoffe, Friedrich-
Schiller-Universität Jena und M. Sander,
Kupferverband e.V.

WASSERSTOFF GOES WERKSTOFF

Sessionleitung: Dr. Uwe Hofmann

9:40 Uhr
Wasserstoff - Energie der Zukunft oder Irrweg?
n.n.

Wasserstoff wird als die Lösung aller Energieprobleme propagiert. Welche Chancen, Grenzen und Herausforderungen sind mit dem Thema Wasserstoff verbunden?

10:10 Uhr
Materialverträglichkeit von Wasserstoff und Gasgemischen – Ergebnisse bisheriger Untersuchungen
M. Wiersig, DVGW H2-Kompetenzzentrum, Leipzig

Einer von vielen Aspekten zur erfolgreichen Umsetzung der „nationale Wasserstoff-Strategie“ ist die Sicherstellung der Materialverträglichkeit entlang der gesamten Gas-Kontakt-Infrastruktur. Zu berücksichtigen sind dabei neben Neubauten auch Bestandsanlagen im Bereich von Gasherstellung, -bevorratung, -transport und -verbrennung. Reinwasserstoff und Gasgemische interagieren u. U. unterschiedlich mit den verwendeten Werkstoffen in Industriebetrieben aber auch Wohngebäuden. Das DVGW H2-Kopetenzzentrum setzt sich intensiv mit diesen Fragen auseinander und gibt einen Überblick über die Ergebnisse bisheriger Forschungsaktivitäten

10:40 Uhr
Wasserstoff in Metallen - Schädigungsmechanismen, Analyse und mechanische Prüfung
J. Jürgensen, M. Pohl, Institut für Werkstoffe, Ruhr-Universität Bochum

Wasserstoff als Energieträger wird ein essenzieller Bestandteil sein, um die notwendige Reduktion von CO₂-Emissionen zu erreichen. Da hierzu große Mengen Wasserstoff erzeugt, transportiert und gespeichert werden müssen, stehen viele Bereiche der Technik vor der Herausforderung, wasserstoffresistente Bauteile und Komponenten zu konstruieren. Dies liegt darin begründet, dass Wasserstoff in Metallen versprödend wirken und somit die mechanischen Eigenschaften in kritischem Maße beeinträchtigen kann. Hiervon sind insbesondere hochfeste Stähle mit kubisch raumzentriertem (krz) Gitter betroffen, die durch „Wasserstoffversprödung“ spontan unter elastischer Belastung versagen können. Als weitgehend wasserstoffresistente Materialien haben sich kubisch flächenzentrierte (kfz) Metalle wie stabile austenitische Stähle und Nickellegierungen herauskristallisiert. Das allgemein tolerante Verhalten gegenüber wasserstoffinduzierter Schädigung ist auf die langsame Wasserstoffdiffusion in kfz-Werkstoffen sowie deren hohe Wasserstofflöslichkeit zurückzuführen. Erste Untersuchungen zeigen, dass auch Kupferwerkstoffe als wasserstoffresistente Materialien in Frage kommen können.

Zur Beurteilung des Materialverhaltens unter Wasserstoffeinfluss ist es unumgänglich, die grundlegen Mechanismen der Wasserstoffaufnahme, die Wirkung von Wasserstoff auf die mechanischen Eigenschaften sowie die dedizierte Wasserstoffanalyse und wasserstoffspezifische Werkstoffprüfung zu verstehen und anzuwenden. Der vorliegende Vortrag wird diese Zusammenhänge systematisch darstellen.

11:05 Uhr
Untersuchungen zur Stabilität von hochfesten Kupferbasis-Legierungen in wasserstoffhaltigen Umgebungen
A. Fehn, K. Ohla, S. Mack, W. Budweiser, Materion Brush GmbH, Stuttgart

Wasserstoff wird als Energieträger zukünftig global eine wichtige Rolle spielen. Dabei werden bei der Erzeugung, beim Transport und dann auch bei der Anwendung Materialien benötigt, die den negativen Auswirkungen des Wasserstoffs Widerstand bieten können. Ein möglicher Schadensmechanismus ist dabei die sogenannte Wasserstoffversprödung, die hauptsächlich bei der Verwendung hochfester Werkstoffe mit kubisch-raumzentriertem Kristallgitter in Kombination mit inneren oder äußeren

Tagungsprogramm - Tag 1

Tagungsort: Steigenberger Esplanade Jena

Mittwoch, 29. November 2023

Zugspannungen auftritt. Hochfeste Kupfer-Basiswerkstoffe sind hinsichtlich ihrer Festigkeitseigenschaften mit martensitischen Stählen zu vergleichen. Daher wurden in jüngster Zeit unter Beteiligung von zwei namhaften Instituten in Deutschland Untersuchungen an hochfesten Cu-Basiswerkstoffen durchgeführt, um die Stabilität gegenüber einer Wasserstoffversprödung zu überprüfen.

11:30 Uhr

Postersession

Sessionleitung: Dr. Catrin Kammer

SESSION WERKSTOFF-DESIGN

Sessionleitung: Prof. Alexander Hartmeier

12:45 Uhr

Konkurrenz der Festkörperumwandlungen in Messing

S. Lippmann, Otto-Schott-Institut für Materialforschung, Friedrich-Schiller-Universität Jena

Der Mechanismus einer Phasenumwandlung hängt von der Unterkühlung, der Diffusionskinetik und der Beschaffenheit der Grenzfläche ab. Bei der fcc/bcc-

Umwandlung in Messing konkurrieren verschiedene Mechanismen stark miteinander, was auf die parallelen Solvuslinien und die rasche Diffusion von Zn in Cu zurückzuführen ist. Unklar ist der Einfluss weiterer Komponenten, gezielt eingebracht oder als Verunreinigung durch den Recyclingprozess. Die experimentelle Untersuchung der Bedingung für das Auftreten der verschiedenen Mechanismen erfordert ein hohes Maß an Feinabstimmung. Mit Hilfe von ein- und mehrdimensionalen Mehrkomponenten-Konzentrationsgradienten und kontrollierter Erwärmung mit elektrischen Pulsen sind die Bedingungen für verschiedene Mechanismen zugänglich. Das Spektrum der Umwandlung reicht von rein diffusionsgesteuertem, gekoppeltem Wachstum, massiver Umwandlung bis hin zu ausschließlich grenzflächengesteuerter martensitischer Umwandlung.

13:10 Uhr

Potential niedriglegierter, ausscheidungsfähiger Hochleistungskupferlegierungen CuXCr (X=Sc, Hf)

J. Dölling¹, A. Zilly¹, O. Lypchanskyi², U. Prahl² – (1) Duale Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart, (2) TU Bergakademie Freiberg

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen, welche neben der zeit- und temperaturabhängigen Entwicklung von Werkstoffhärte sowie elektrischer Leitfähigkeit auch die thermische Analyse mithilfe der dynamischen Differenzkalorimetrie inkludiert, wird zunächst der reproduzierbare Einfluss der Elemente Chrom, Scandium und Hafnium mit weniger als 1 Gew.-% Legierungsgehalt betrachtet. Neben zügiger einsetzenden Ausscheidungseffekten durch beschleunigte Ausscheidungsbildung und optimierten mechanischen Eigenschaften zeigen die innovativen Legierungsansätze eine deutliche Verbesserung der Temperaturbeständigkeit mit weniger Überalterung und geringerer Neigung zur Rekristallisation. Die Ausscheidungsbildung und deren Wachstum wird nachhaltig durch das Zulegieren von Chrom modifiziert, was eine begleitende Metallografie lückenlos aufzeigt.

13:35 Uhr

Neuartiges Standardzerspanungsmessing - Herstellung, Mikrostruktur & Eigenschaften der bleifreien Legierung eZeeBrass

F. Seuß, Diehl Brass Solutions Stiftung & Co. KG, Röthenbach

Das Element Blei spielt in Messing eine große Rolle, da es den Spanbruch während der Bearbeitung fördert und somit eine hohe Wirtschaftlichkeit des Bearbeitungsprozesses sicherstellt. Allerdings wird Blei unter anderem als reproductionstoxisch eingestuft und ist deshalb auf der Kandidatenliste REACH der europäischen Chemikalienagentur gelistet. In dieser Arbeit wird eine neuartige bleifreie Messinglegierung vorgestellt, welche eine exzellente Zerspanbarkeit bei geringen Legierungskosten aufweist, und zudem gesundheitlich unbedenklich ist. Die Legierung mit der Bezeichnung eZeeBrass zeichnet sich durch geringe Zusätze eines innovativen Spanbrechers aus. Die resultierende Mikrostruktur setzt sich aus einem α/β Gefüge mit fein verteilten, intermetallischen Ausscheidungen zusammen, welche maßgeblich den Spanbruch fördern. Dies bestätigen entsprechende Kooperationen mit metallverarbeitenden Betrieben. Insbesondere zeigen betreffende Untersuchungen, dass die entwickelte bleifreie Legierung ohne wesentliche Anpassung der Schnittparameter im Vergleich zu bleihaltigen Standardzerspanungsmessing wie z.B. CW617N bearbeitet werden kann.

Tagungsprogramm - Tag 1

Tagungsort: Steigenberger Esplanade Jena

Mittwoch, 29. November 2023

14:00 Uhr

Bestimmung der Relaxation an hochfesten Cu-Folien

J. Seeger, S. Theobald, J. Riedle,
Wieland-Werke AG, Ulm

Der anhaltende Trend zur Miniaturisierung in den verschiedenen Branchen wie der Konsumgüter-, Computer- und Automobilindustrie wirkt sich auf die Anforderungen an Produkt, Produktion, Material und Prüfung gleichermaßen aus. So erfordert beispielsweise das für die Herstellung von Mikroprozessorsockeln (z. B. CPU) verwendete Bandmaterial aus Kupferlegierung bereits Dicken unter 80 µm. Um die geringere Dicke zu kompensieren und eine ausreichende Kontaktkraft der einzelnen Federn zu gewährleisten, werden zunehmend hochfeste CuNiSi-Legierungen verwendet. Die Ringmethode, die heute für die Relaxationsmessung von Materialien in Standarddicken verwendet wird, wurde überarbeitet und für Folendicken qualifiziert. Für die Messungen wurden Materialien aus der CuNiSi-Legierung K58/C70250 mit 70 µm sowie 50 µm Dicke verwendet. Die Auswirkungen der Belastung, der Orientierung und der Temperaturen sowie die Auswirkungen der Probendicke wurden untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Folienrelaxation mit den bereits bekannten Daten für dickere Bänder übereinstimmt.

14:25 Uhr

Legierungsentwicklung für die Herstellung von zinkfraßfreien Metallblasinstrumenten

S. Berndorf, M. Kirschner, S. Guk,
U. Prahl, TU Bergakademie Freiberg

In der Herstellung von Metallblasinstrumenten wird herkömmlich die Messinglegierung CuZn30 verwendet. Allerdings kann diese Legierung Probleme mit Zinkfraß aufweisen, was die Haltbarkeit und Optik der Instrumente wesentlich beeinträchtigt. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde die Standardlegierung im Hinblick auf zinkfraßhemmende Eigenschaften weiterentwickelt. Um die optischen und akustischen Eigenschaften für die Musikinstrumente zu erhalten, sollte die Legierungszusammensetzung im Mikrolegierungsbereich verändert werden. Hierzu wurde der Einfluss verschiedener Legierungselemente auf die Phasenzusammensetzung mit Hilfe von ThermoCalc simuliert. Basierend auf den Ergebnissen der Simulation wurden geeignete Legierungselemente ausgewählt und eine modifizierte CuZn30X Legierung mit jeweils 0,1% P, Sn und Ni in Massenanteilen zu produziert. Diese Legierung wurde anschließend hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften,

mikrostrukturellen Zusammensetzung und Korrosionseigenschaften untersucht und bewertet.

14:50 Uhr

Kaffeepause

SESSION ADDITIVE FERTIGUNG

Sessionleitung: Dr. Stefanie Lippmann

15:10 Uhr

Technologieentwicklung zur draht- und lichtbogenbasierten additiven Fertigung von Kupfer-Zink-Legierungen

M. Schop, T. Ungethüm, H. C. Schmale,
TU Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Fügetechnik und Montage, Dresden

Die wirtschaftliche Herstellung metallischer Bauteile in Kleinserien oder als Prototypen gewinnt in der Produktion immer größere Bedeutung. Bisher ist die endkonturnahe Herstellung von Komponenten aus Kupfer-Zink-Legierungen (Messing) auf Gießprozesse oder das Binder-Jetting beschränkt. Dabei ist für das Gießen die geringe Wirtschaftlichkeit bei kleinen Stückzahlen, für das Binder-Jetting die nicht ausreichende Dichte der hergestellten Bauteile nachteilig. Daher

werden im Rahmen dieses Beitrages die ersten Ergebnisse des IGF-Projektes Nr. 22077 BR vorgestellt. In diesem Forschungsvorhaben werden Möglichkeiten zur draht- und lichtbogenbasierten additiven Fertigung (WAAM) von Messingbauteilen untersucht.

15:35 Uhr

Modifikation der elektrischen Eigenschaften und mechanischen Eigenschaften von additiv gefertigtem CuCr1Zr (CW106C) durch gezielte Nachbehandlungen

S. Gruber, F. Klemm, A. Marquardt,
L. Stepien, E. Lopez, F. Brückner,
C. Leyens, Fraunhofer-IWS, Dresden

Die Kupferlegierung CuCr1Zr ist aushärtbar und somit lassen sich die Leitfähigkeit und die mechanischen Eigenschaften durch eine nachgelagerte Wärmebehandlung und damit durch Ausscheidungshärtung gezielt einstellen. Bei konventionell verarbeitetem CuCr1Zr wird üblicherweise eine zweistufige Wärmebehandlung bestehend aus Lösungsglühen und Auslagern vorgenommen. Durch die hohen Abkühlgeschwindigkeiten beim Laser Powder Bed Fusion (LPBF) Prozess entsteht bereits bei der additiven Fertigung eine

Tagungsprogramm - Tag 1

Tagungsort: Steigenberger Esplanade Jena

Mittwoch, 29. November 2023

Kupfermatrix mit zwangsgelösten Legierungselementen, sodass der Schritt des Lösungsglühens hier zukünftig vielleicht ausgelassen werden kann. Im Rahmen dieses Beitrages wurde systematisch die Auslagerungstemperatur und -zeit variiert, um den Einfluss auf die Mikrostruktur und damit auf die resultierenden Eigenschaften wie die Leitfähigkeit, Festigkeit und Duktilität von CuCr1Zr durch direktes Auslagern zu untersuchen. Eine gezielte Einstellung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften durch die Anwendung des erstellten empirischen Modells scheint möglich.

16:00 Uhr

Lithografiebasierte Herstellung von endformnahen dispersionsverfestigten Kupferbauteilen durch Reduktion von Kupfer(I)-Oxid

J. Scheibler, T. Studnitzky, T. Weißgärber, Fraunhofer-IFAM, Dresden

Die Dispersionsverstärkung von Kupfer ermöglicht die Kombination hoher Festigkeit und hoher Leitfähigkeit. Dies ist bei Anwendungen mit kombinierter thermischer und mechanischer Belastung, wie beispielsweise Kontaktwerkstoffen, Schweißelektroden oder hoch belasteten Wärmesenken vonnöten. Aktuell werden

hauptsächlich durch innere Oxidation hergestellte Produkte (z. B. Höganäs Glidcop®) verwendet. Diese Herstellungsroute ist jedoch komplex und führt lediglich zu geometrisch einfachen Halbzeugen. Mithilfe von additiver Fertigung können geometrisch komplexe Bauteile hergestellt werden. Weiterhin wird die Integration zusätzlicher Funktionen wie beispielsweise Kühlkanäle ermöglicht. Der hier vorgestellte Ansatz basiert auf der Kombination von Kupferoxid und Aluminiumoxid. Die elektrische Leitfähigkeit erreicht Werte von bis zu 78 % IACS. Die Vickershärte übertrifft die von reinem Kupfer, bleibt jedoch bisher hinter den Vergleichswerten für dispersionsverfestigte Werkstoffe aus der Literatur zurück. Gründe dafür sind unzureichende Verdichtung und suboptimale Dispersoidverteilung. Daher sind weitere Optimierungen erforderlich, um das Potenzial dieses Ansatzes voll auszuschöpfen.

16:25 Uhr

Ausscheidungshärtende Kupferlegierungen und additive Fertigungsverfahren Möglichkeiten, Eigenschaften und Grenzen

J. Barz, Schmelzmetall Deutschland GmbH, Steinfeld-Hausen

Kupferlegierungen und insbesondere ausscheidungshärtende Kupferlegierungen sind aufgrund ihrer hohen Reflektivität eine echte Herausforderung für die Verarbeitung über Lasertechnologien, da hier in den allermeisten Fällen rote Laser im Einsatz sind. Entsprechend gibt es zu dem Thema zahlreiche Forschungsprojekte, die sich mit dieser Verarbeitung beschäftigen. Neben der Entwicklung der Prozessparameter für den Pulver-Bett-Prozess (PBF-LB) wurden unterschiedliche Wärmebehandlungsstrategien entwickelt, um auf die Anforderungen der Anwendung angepasste Eigenschaften einstellen zu können. Der Prozess des Laserauftragschweißen wird eingesetzt, um gezielt Bauteile, die konventionell aus einer Hovadur®-Legierung hergestellt werden, lokal dort verschleißgeschützt auszuführen, wo es für die Funktionalität des Bauteils notwendig ist und die Standzeiten der Bauteile deutlich verbessert werden. Die Möglichkeiten und Grenzen des DED-Prozesses werden ebenso erläutert wie das Laserdispergiere.

16:50 Uhr

Wire Electron Beam Additive Manufacturing von niedriglegierten Zinnbronzen – Erreichbare Bauteileigenschaften und Prozessmerkmale

J. Raute, M. Biegler, Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK, Berlin
M. Rethmeier, TU Berlin, Fraunhofer-IPK, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Die Additive Fertigung gewinnt zunehmend an Bedeutung für die Verarbeitung von Kupferwerkstoffen im industriellen Umfeld. Hierbei wird verstärkt auch auf drahtförmige Ausgangswerkstoffe gesetzt, da diese Vorteile im Handling bieten, bereits aus der Schweißtechnik bekannt sind und sich in der Regel durch geringere Beschaffungskosten auszeichnen. In den letzten Jahren entwickelte sich neben den bereits im großen Umfeld untersuchten Verfahren der Directed-Energy-Deposition (DED) auch eine Prozessvariante unter Nutzung des Elektronenstrahls zur industriellen Marktreife. Dabei zeigt die Technologie Wire Electron Beam Additive Manufacturing (W-EBAM) besondere Vorteile gegenüber anderen, zumeist Laser- oder Lichtbogen-basierten DED-Prozessen für die Anwendung mit Kupfer. Um das Verfahren einem breiten Anwenderkreis in der Industrie zugänglich zu machen, fehlen jedoch übergreifende Daten zu Leistungsfähigkeit, Prozessgrenzen und Anwendungsmöglichkeiten. Die vorlie-

Tagungsprogramm - Tag 1

Mittwoch, 29. November 2023

Tagungsort: Steigenberger Esplanade Jena

gende Untersuchung beschäftigt sich mit dieser Problemstellung am Beispiel von der Legierung CuSn1MnSi.

FÜGEN UND FERTIGUNG

Sessionleitung: Prof. Ulrich Prahl

17:15 Uhr
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit von Kupferblechen auf das Metall-Ultruschallschweißen

E. Helfers, F. W. Müller, A. Schiebahn, U. Reisgen, Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der RWTH Aachen

Das Metall-Ultruschallschweißen (M-USS) ist ein industriell verbreitetes stoffschlüssiges Fügeverfahren. Aufgrund des geringen Wärmeeintrags ist das Verfahren vor allem für anspruchsvolle Anwendungen wie elektrotechnische Bauteile geeignet. Im Rahmen der zunehmenden Elektrifizierung von Fahrzeugen gewinnt die industrielle Anwendung des Verfahrens in der Batterietechnik, für Litzen- und Leiterkonfektionierung sowie der Leistungselektronik stetig weiter an Bedeutung. Trotz aller bisherigen Bemühungen treten im Industrieinsatz Prozessschwankungen auf. Im Rahmen des AiF-Forschungspro-

jets „Laser-Pro-M-USS - Effiziente und gezielte Oberflächenbehandlung mittels Laserstrahlung für prozess-sicheres Metall-Ultruschallschweißen“ (AiF IGF-Nr.: 22.475 N) untersucht das ISF Möglichkeiten zur Verbesserung der Prozessstabilität des M-USS durch vorherige Behandlung der Bauteiloberflächen mittels Laserstrahlung. Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Entwicklung einer effizienten und robusten Laserbehandlung, die von wechselnden Prozesseingangsgrößen weitestgehend unbeeinflusst bleibt und zugleich eine gute Basis zum Ultruschallschweißen bietet. Dazu werden Wechselwirkungen von Schweißprozess und Oberflächenbehandlung untersucht und der Einfluss auf die Prozessfähigkeit dargestellt. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Laserbehandlung der typischerweise blanken Kupferoberflächen dar. Im Rahmen des Vortrags sollen bisherige Erkenntnisse zum Einfluss von Walzrichtung, Oberflächenrauheit und -sauberkeit auf das M-USS von Kupferbauteilen zusammenfassend dargestellt werden. Darauf aufbauend werden die ersten Versuchsreihen zur Laserbehandlung von Kupferblechen und anschließend deren Schweißbarkeit mittels M-USS dargestellt.

17:45 Uhr
Auswirkungen subatmosphärischer Druckbedingungen auf das Laserstrahlschweißen von Kupfer mit grüner Laserstrahlung

F. Kaufmann, Bayerisches Laserzentrum GmbH, Erlangen

Die rasante Entwicklung von Laserstrahlquellen und angepassten Schweißtechnologien in den letzten Jahren hat dazu geführt, dass Laserstrahlschweißverfahren in der automatisierten Produktion heute exponentiell an Bedeutung gewinnen. Vor allem die Präzision ohne Werkstückkontakt sowie der geringe Energieeintrag sind wesentliche Enabler für z.B. Fügeanwendungen im Karosseriebau und in der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge. Die Schweißverbindungen erfüllen dabei sowohl mechanische als auch elektrische Anforderungen als stromführende Verbindungen, wobei die verwendeten Kupferwerkstoffe im Vergleich zu Stahl schwierig zu fügen sind. Ein stabiler Prozess mit geringsten Nahtfehlern ist daher nur in einem begrenzten Prozessfenster realisierbar, was auf die hohe Wärmeleitfähigkeit, das hohe Reflexionsvermögen im festen Zustand für typische Laserwellenlängen ($\lambda = 1 \mu\text{m}$) und die geringe Schmelzviskosität von Kupfer zurückzuführen ist. Um

diese Herausforderung zu meistern, ist die Erarbeitung von Prozessverständnis zu Wirkzusammenhängen in der Interaktionszone von großem Interesse. In den Untersuchungen wurde festgestellt, dass beim Kupferschweißen unter reduziertem Umgebungsdruck die Einschweißtiefe effektiv erhöht, die Schmelzbadstabilität verbessert und die Spritzermenge reduziert werden kann, um so qualitativ hochwertige Schweißnähte für eine effiziente Produktion zu generieren.

18:05 Uhr
Ende Teil I

18:45 Uhr
Entdecken Sie Jena!
Stadtührung zum Planetarium

19:45 Uhr
Dinner unterm Sternenhimmel im Planetarium Jena
Willkommen in der Raumzeitmaschine Zeiss-Planetarium Jena, dem dienstältesten Projektionsplanetarium der Welt. Überreichung des Kupferpreises.

23:15 Uhr
Ende

Tagungsprogramm - Tag 2

Tagungsort: Steigenberger Esplanade Jena

Donnerstag, 30. November 2023

WERKSTOFFTAGUNG

Tag 2

Donnerstag, 30. November 2023

8:30 Uhr
**Kurzvorstellung Otto-Schott-Institut
für Materialforschung**
Dr.-Ing. S. Lippmann, Lehrstuhl für
Metallische Werkstoffe, Friedrich-
Schiller-Universität Jena

8:40 Uhr
Vortrag Preisträger

SESSION SIMULATION UND DIGITALISIERUNG

Sessionleitung: Dr. Dirk Helm

9:00 Uhr
**Mikrostruktur-sensitive Modellierung
mechanischer Eigenschaften und
Bestimmung von Materialparametern
über inverse Methoden**
A. Hartmaier, ICAMS, Ruhr-Universität
Bochum

Die mikromechanische Modellierung ist ein leistungsfähiges Instrument zur Untersuchung der Beziehungen zwischen Mikrostruktur und Eigenschaften von Metallen. Dieser Ansatz basiert auf realistischen Darstellungen von Mikrostrukturen in Finite-Elemente-Modellen und der Anwendung der Kristallplastizität als grundlegendes konstitutives Modell. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass sie eine relativ große Anzahl von Materialparametern erfordert, die in der Literatur nicht ohne weiteres verfügbar und im Experiment nur schwer direkt zu ermitteln sind. Daher werden in der Regel inverse Methoden zur Ermittlung von Materialparametern verwendet. Der Einsatz inverser Methoden auf Daten von Zug- oder Ermüdungsversuchen birgt allerdings die Problematik, dass die Ergebnisse oft nicht eindeutig sind und zudem sind die Daten über die ganze Messlänge gemittelt. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass inverse Methoden auf der Grundlage von Indentationsmessungen zur robusten Bestimmung von Materialparametern unter Berücksichtigung lokaler Variationen der Mikrostruktur oder der chemischen Zusammensetzung verwendet werden können.

9:25 Uhr
**Mikrostruktursimulation mit Open-
Phase**
R. Schiedung, OpenPhase Solutions
GmbH, Jena

OpenPhase Studio ist eine leistungsstarke Mikrostruktursimulationssuite für metallische Werkstoffe, Keramiken und Mineralien. Es verwendet Multiphysikmodelle, die in die Phasenfeldmethode für Vergrößerung, Diffusion, endliche Dehnung, Plastizität, Beschädigung und Strömung eingebettet sind. Ein breites Spektrum von Materialprozessen wie Erstarrung, Wärmebehandlung, mechanische Prüfung, Festphasensintern und vieles mehr kann simuliert werden.

9:50 Uhr
**Optimierung von Durchsatz und Energieeffizienz eines Haubenofens durch
den Einsatz eines integrierten Prozess-
modells**
S. Künne, Prosik GmbH

Haubenöfen dienen der diskontinuierlichen Wärmebehandlung von Kupferbändern in Form von Coils. In der Praxis wird dabei die Ofenatmosphäre auf einer Temperatur nur knapp über der gewünschten Materialtemperatur gehal-

ten, um ein Überhitzen des Materials zu verhindern. Dies führt aufgrund der immer kleiner werdenden Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Material zu relativ langen Aufheizzeiten von circa 10 Stunden. Mithilfe eines in die Anlagensteuerung integrierten Prozessmodells kann die Temperaturverteilung innerhalb der Coils in Echtzeit simuliert und mitverfolgt werden. Dies erlaubt es, die Temperatur der Ofenatmosphäre anzuheben, ohne dabei ein Überhitzen des Materials zu riskieren.

10:15 Uhr
**Charakterisierung und Modellierung
des Langzeitverhaltens von Kupfer-
werkstoffen und Anwendung: Effiziente
Identifikation von Materialparametern
im Cantilever-Versuch**

L. Morand¹, M. Weber¹, A. Butz¹, D. Helm¹,
B. Schlay², F. Bauer², M. Eisenbart²,
K. Pfeffer², U. E. Klotz² – (1) Fraunhofer-
Institut für Werkstoffmechanik IWM,
Freiberg, (2) Forschungsinstitut Edelme-
tal + Metallchemie (fem), Schwäbisch-
Gmünd

Das Langzeitverhalten von Steckverbindern und elektrischen Kontakten aus Kupferwerkstoffen unter thermischer und mechanischer Beanspruchung

Tagungsprogramm - Tag 2

Tagungsort: Steigenberger Esplanade Jena

Donnerstag, 30. November 2023

gewinnt für die Bauteilauslegung zunehmend an Bedeutung. Dies liegt primär an den steigenden Anforderungen bezüglich Funktionalität, Materialausnutzung, Lebensdauer und weiteren Randbedingungen. Die daraus resultierenden komplexen Optimierungsaufgaben sind zunehmend nur noch mit Hilfe numerischer Verfahren wie z.B. Finite-Elemente-Simulationen zu bewältigen. Für eine belastbare Bauteilsimulation ist neben der Bauteilgeometrie, der Bauteilbelastung und weiteren Randbedingungen die Beschreibung der Werkstoffeigenschaften mit einem geeigneten Materialmodell von zentraler Bedeutung. Es wird gezeigt, wie die Methoden des maschinellen Lernens die Anpassung der Materialparameter für einen Werkstoff signifikant beschleunigen und die Materialparameter zeitnah für die Nutzung zur Bauteilauslegung bereitgestellt werden können. Die entwickelte Vorgehensweise ist auf den optimierten Cantilever-Versuchsstand abgestimmt. Die darin ermittelten Messdaten können für die Parameteranpassung mit dem neuen Ansatz direkt genutzt werden. Die Materialcharakterisierung und Materialmodellierung für das Langzeitverhalten von Kupferwerkstoffen können somit präzise und effizient in einem durchgängigen Workflow realisiert werden.

11:10 Uhr
Kaffeepause

SESSION OBERFLÄCHEN- UND NANOTECHNIK

Sessionleitung: Prof. Frank Mücklich

11:30 Uhr
Von hydrophil bis hydrophob – Über das Benetzungsverhalten von Reinkupfer
S. M. Löblein¹, D. W. Müller¹, F. Mücklich¹, R. Merz², M. Kopnarski² – (1) Universität des Saarlandes, (2) Institut für Oberflächen- und Schichtanalytik GmbH, Technische Universität Kaiserslautern

Das Benetzungsverhalten von Kupfer ist für zahlreiche Anwendungen von Bedeutung: Nicht nur die Korrosionsbeständigkeit, auch das tribologische Verhalten und die antibakterielle Wirksamkeit hängen stark vom Kontaktwinkel zwischen der Flüssigkeit und der Kupferoberfläche ab. Obwohl die Messung statischer Kontaktwinkel simpel erscheint, existieren zahlreiche potentielle Fehlerquellen, die zu einer Missinterpretation der experimentellen Daten führen können. Eine systematische Untersuchung verschiedenster Parameter wurde durch-

geführt, um zu beurteilen, wie diese die Ergebnisse der Benetzungsanalyse von Wasser auf Kupfer beeinflussen. Nur mit einem fest etablierten Versuchspraktikum für die Benetzungsanalyse, das auf Basis der vorgestellten Studie aufgebaut werden kann, können reproduzierbare und vergleichbare Untersuchungen durchgeführt werden. Insbesondere für grundlegende Fragestellungen zur Klärung der Zusammenhänge zwischen dem Benetzungsverhalten von Kupfer und seiner topographischen und chemischen Ausprägung sind standardisierte Messmethoden von Bedeutung. Sie bilden die Grundlage für das zielgerichtete Design von Kupferoberflächen mit einer gewünschten Benetzung.

11:55 Uhr
Diffusion und Phasenbildung in nanoskaligen Au/Ni/Cu-Schichtsystemen als lötfähige Metallisierung von Mikrochips
M. Seyring¹, R. Knechtel¹, M. Göbel², D. Thiedke², V. Götz², K. Freiberg³, S. Lippmann³ – (1) Hochschule Schmalkalden, (2) X-FAB MEMS Foundry GmbH Erfurt, (3) Friedrich-Schiller-Universität Jena

Für die elektrische Kontaktierung besitzen Mikrochips, soweit sie aus den immer wichtiger werdenden Wafer Level

Packaging Prozessen stammen, lötfähige Metallsysteme. Diese lötfähigen Metallisierungen (engl. Under Bump Metallization, UBM) bestehen aus einem Stapel verschiedener metallischer Schichten, die jeweils eine spezifische Funktion besitzen. Lötfähige Metallisierungen sind bisher sehr dick und werden galvanisch mit umweltkritischen Chemikalien abgeschieden. Dünnschichtsysteme sind dagegen ressourcen- und umweltschonender herzustellen und können mit Standardprozessen der Halbleiterfabriken (z.B., Sputtern) erzeugt werden. Die deutlich geringeren Schichtdicken der gesputterten Au/Ni/Cu-Dünnschichtsysteme erfordern jedoch ein detaillierteres Verständnis der ablaufenden diffusionsgesteuerten Prozesse.

12:20 Uhr
Herstellung und Charakterisierung poröser, kaltplasmagespritzter Kupferschichten
A. Würzl, INNOVENT e.V. Technologieentwicklung, Jena

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer porösen Kupfermatrix mittels Kaltplasmaspersitzen, die als Grundlage für die Entwicklung eines funktionalisierten Schichtsystems aus

Tagungsprogramm - Tag 2

Donnerstag, 30. November 2023

Tagungsort: Steigenberger Esplanade Jena

Kaltplasmaspritzschicht und nasschemischer Beschichtung mittels Sol oder Lack dienen soll. Dabei fungieren die offenen Poren der Kaltplasmaspritzschicht als Depot für die funktionalisierte nasschemische Beschichtung. Sowohl die Kaltplasmaspritzschicht als auch die nasschemische Folgebeschichtung sollen aufeinander abgestimmte antimikrobielle Wirkstoffe enthalten. Die Einstellung und Quantifizierung der Porosität erfolgte in Abhängigkeit von geeigneten Beschichtungsparametern. Mittels mikroskopischer und spektroskopischer Verfahren wurden Schichtdicke, Morphologie sowie chemische Zusammensetzung der Kupferspritzschichten untersucht. Weiterhin wurde zur Gewährleistung der Haftfestigkeit die Zugfestigkeit für verschiedene Beschichtungsparameter mittels Abreißversuch getestet. Für die Bestimmung der antibakteriellen Wirkung wurden die Standardmethoden BacTiterGlo® (BTG) und Koloniebildende Einheiten (KBE) gegenüber dem gram-negativen Bakterienstamm Escherichia coli DSM 1607 angewandt. Für alle untersuchten Kupferschichten wurde eine starke antibakterielle Wirkung gegenüber Escherichia coli DSM 1607 nachgewiesen.

12:45 Uhr

Antimikrobielle Eigenschaften von Kupferlegierungen und deren Modifikation durch Oberflächenbearbeitung

A. S. Ahmed^{1,2}, D. W. Mueller¹,
J. F. Pierson², F. Muecklich¹ – (1) Functional Materials, Saarland University, Saarbrücken, (2) Université de Lorraine, CNRS, IJL, Nancy

Im Laufe der Zeit hat der übermäßige Einsatz von Antibiotika zum Auftreten von multiresistenten Mikroorganismen (MDR) geführt. Deren rasche Zunahme in den vergangenen Jahren ist mit ein Grund für die steigende Zahl nosokomialer Infektionen mit fatalem Krankheitsverlauf. Eine Strategie zu deren Eindämmung, ist die Vermeidung einer Verbreitung über berührbare Kontakt-oberfläche, wobei die Kombination von antimikrobiellen Materialien und innovativer Oberflächentechnologie von großem Nutzen sein kann. Die wohlbekannten antibakteriellen Eigenschaften von Kupfer bieten hier ein besonderes Potential, wobei das Metall in seiner Reinform durch niedrige mechanische Abrasionsbeständigkeit in seiner Anwendbarkeit eingeschränkt wird. Diesem Manko kann durch gezieltes Legieren entgegengewirkt werden, wobei ein

gleichzeitiger Erhalt der antibakteriellen Kapazitäten sichergestellt werden muss. Dieser Aspekt ist im Rahmen dieser Forschungsarbeit insbesondere in Bezug auf die Eignung der Legierungssysteme zur laserbasierten Oberflächenfunktionalisierung näher beleuchtet worden. Hierbei wurden Oberflächen verschiedener Kupferlegierungen mithilfe von ultrakurz gepulstem Direct Laser Interference Patterning (USP-DLIP) modifiziert, um periodische Strukturen in der Größenordnung einzelner Bakterienzellen mit potentiell steigerndem Effekt auf die bakteriziden Eigenschaften zu erzeugen.

13:10 Uhr

Posterprämiierung

13:15 Uhr

Ende / Mittagessen

14:00 Uhr

Exkursionen

16:00 Uhr

Ende

Anmeldung

Kupfer-Symposium 2023 in Jena

Zeitraum:
29.-30. November 2023

Tagungsort:
Steigenberger Esplanade Jena
Carl-Zeiss-Platz 4
D-07743 Jena

Anmeldeschluss:
17. November 2023. Bitte beachten Sie,
dass die Teilnehmerzahl begrenzt ist.

Anmeldungen per E-Mail oder Fax:
kupfersymposium@kupfer.de
oder +49 211 239469-10.

Hiermit melde ich mich zum Kupfer-Symposium 2023 verbindlich an:

Name _____

Firma _____

Anschrift _____

Telefon _____

E-Mail _____

Teilnahmegebühren:

- 935,00 Euro Nicht-Mitglieder des Kupferverband e.V.
(Frühbucherrabatt bis 15.08.2023: 835,00 €)
- 795,00 Euro Mitglieder des Kupferverband e.V.
(Frühbucherrabatt bis 15.08.2023: 695,00 €)
- 675,00 Euro Hochschulen / Universitäten, Wissenschaftliche Institute
(Frühbucherrabatt bis 15.08.2023: 575,00 €)
- 350,00 Euro Referenten
- 100,00 Euro Studenten

Leistungen: Teilnahme am Programm inkl. Tagungsunterlagen, Tagungsbewirtung, Exkursionen, Abendveranstaltung. Die Teilnahmegebühren sind umsatzsteuerfrei.

Zusätzliche Programmpunkte

Bitte Teilnahme ankreuzen. Die Teilnehmerzahl für die einzelnen Exkursionen ist auf jeweils 20 Personen begrenzt. Die Platzvergabe erfolgt nach Eingang.

29. November 2023:

- Stadtführung Altstadt Jena
- Dinner unter'm Sternenhimmel im Planetarium Jena

30. November 2023:

Exkursionen (bitte nur eine Option auswählen, da Parallelveranstaltungen):

- Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik am Beutenberg
Von Arrayprojektoren im Automotive-Bereich über Echtzeitscanner in der Produktion bis hin zu Quantentechnologien für die Mikroskopie und Kommunikationssicherheit – das Fraunhofer IOF entwickelt innovative Lösungen mit Licht für ein breites Anwendungsspektrum. Schwerpunkt der Besichtigung sind die Themenfelder Oberflächencharakterisierung und -funktionalisierung.
- Bustransfer
- Institut für Angewandte Physik am Beutenberg
Das Institut für Angewandte Physik (IAP) betreibt Grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung auf den Gebieten des Optikdesigns, der Mikro-, Nano- sowie Quantenoptik, der Faser- und Wellenleiteroptik sowie der Ultraschnellen Optik. Die Exkursion fokussiert auf Additive Fertigung mit Ultrakurzzeitlasern mit denen u.a. Kupferpulver verarbeitet werden kann.
- Bustransfer
- Historisches Institut
Die „Sammlung für Vor- und Frühgeschichte“ ist in Umfang und Art einmalig in Deutschland. Denn sie zählt zu den größten universitären Lehrsammlungen zur Frühgeschichte. Die Sammlung vereint mehr als 45000 Fundstücke von etwa 1500 Ausgrabungsorten innerhalb und außerhalb Europas. Wer sich für die Geschichte von Kupfer interessiert, der findet hier eine Vielzahl von Informationen u.a. zu Bronzefunden. Das Institut liegt fußläufig zum Tagungshotel im Zentrum Jenas.

Zusätzliche Programmpunkte werden auf der nächsten Seite fortgeführt.

Anmeldung

Kupfer-Symposium 2023 in Jena

Ausstellung

Präsentationsoptionen

Institut für Optik und Quantenelektronik

Das Institut für Optik und Quantenelektronik bearbeitet das Feld der Wechselwirkung extrem intensiver Laserstrahlung mit Materie in großer Vielfalt. Die Bandbreite reicht dabei von phasenstabilisierten Einzelzyklenpulsen bis hin zur Petawatt-Leistungsklasse und von der Photoelektronen-Spektroskopie bis zur Röntgenspektroskopie, -polarimetrie and -mikroskopie. Das Institut verfügt in mehreren dieser Gebiete über eine einzigartige technologische Kompetenz. Im Mittelpunkt dieser Exkursion steht die Röntgenmikroskopie. Das Institut liegt fußläufig zum Tagungshotel im Zentrum Jenas.

Jenoptik

Der global agierende Technologie-Konzern ist auf optische Technologien fokussiert. Mit dem überwiegenden Teil des Leistungsspektrums ist er im Photonik-Markt tätig. Zu den Kunden gehören vor allem Unternehmen der Halbleiterausrüstungsindustrie, der Automobil- und Automobilzulieferindustrie, der Medizintechnik, der Sicherheits- und Wehrtechnik sowie der Luftfahrtindustrie. Erfahren Sie mehr dazu im Showroom von Jenoptik. Der Showroom liegt fußläufig zum Tagungshotel im Zentrum Jenas.

Bei Rücktritt von der Anmeldung bis zum 17.11.2023 wird die Teilnahmegebühr abzüglich 50,00 Euro für die Bearbeitung zurückgestattet. Bei späterem Rücktritt bzw. Nichterscheinen wird die volle Teilnahmegebühr erhoben. Namensänderungen sind jederzeit kostenlos möglich. Rücktrittsmeldungen müssen schriftlich erfolgen. Die Zahlung erfolgt nach Rechnungsstellung.

Bitte beachten Sie: Unter dem Stichwort „Kupfer-Symposium“ bietet das Steigenberger Esplanade Jena ein limitiertes Zimmerkontingent zu ermäßigten Preisen an: bei einer Buchung bis 16. Oktober 2023 gilt ein Sonderpreis von 132,00 € (Einzelzimmer) bzw. 152,00 € (Doppelzimmer) inkl. Frühstück. Danach kann nicht gewährleistet werden, dass noch Zimmer zu diesem Preis zur Verfügung stehen. Bitte reservieren Sie dort bei Bedarf selbst Ihr Zimmer: Reservierungen unter +49 3641 800-115. Beachten Sie, dass die Raten nicht über Online-Systeme buchbar sind.

Die Steigenberger Hotels and Resorts bieten Ihnen in Kooperation mit der Deutschen Bahn eine umweltfreundliche und preisgünstige An- und Abreise zum Kupfer-Symposium. Mit dem Veranstaltungsticket sparen Sie bis zu 59 % vom regulären Preis – abhängig von der Strecke und der Buchungsklasse.

Einfache und individuelle Buchungsabwicklung über www.steigenberger.com/veranstaltungsticket.

Es besteht die Möglichkeit, im Rahmen der Veranstaltung sein Unternehmen / seine Hochschule zu präsentieren. Falls Sie Interesse an einer dieser Optionen haben, senden Sie uns die verbindliche Anmeldung dazu bitte umgehend zurück an: technik@kupfer.de oder per Fax an 0211 239469-10

Hiermit melden wir uns verbindlich für die Ausstellung an:

Beschränkte Platzkapazität. Die Platzvergabe erfolgt nach Eingang. Sie erhalten eine Bestätigung über Ihre Buchung.

Name

Firma

Anschrift

Telefon

E-Mail

Unterschrift / Stempel

Präsentationsoptionen:

- Wissenschaftliches Poster – kostenlos
- Gold-Sponsor – 2.500 €
Standfläche für einen Schnellbaustand / Tisch, 2 Teilnehmer, Nennung als Sponsor
- Silber-Sponsor – 1.500 €
Aufstellung eines Roll-Ups / Tisches, 1 Teilnehmer, Nennung als Sponsor
- Wissenschafts-Special (für Uni, Institut) – 1.250 €
Standfläche für ein Roll-Up / Tisch, Poster, 2 Teilnehmer, Nennung als Sponsor

Im Falle einer möglichen Online-Veranstaltung werden entsprechende Anpassungen vorgenommen.

Jena

Jena ist eine deutsche Universitätsstadt und kreisfreie Großstadt in Thüringen in der Metropolregion Mitteldeutschland. Sie liegt an der Saale zwischen Muschelkalkhängen der Ilm-Saale-Platte und ist nach der Landeshauptstadt Erfurt die zweitgrößte Stadt Thüringens und eines der drei Oberzentren des Freistaats.



Steigenberger Esplanade Jena

Carl-Zeiss-Platz 4, 07743 Jena



Zeiss-Planetarium Jena

Am Planetarium 5, 07743 Jena



Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik am Beutenberg

Albert-Einstein-Straße 7, 07745 Jena



Institut für Angewandte Physik am Beutenberg

Albert-Einstein-Straße 15, 07745 Jena



Historisches Institut

Fürstengraben 13, 07743 Jena



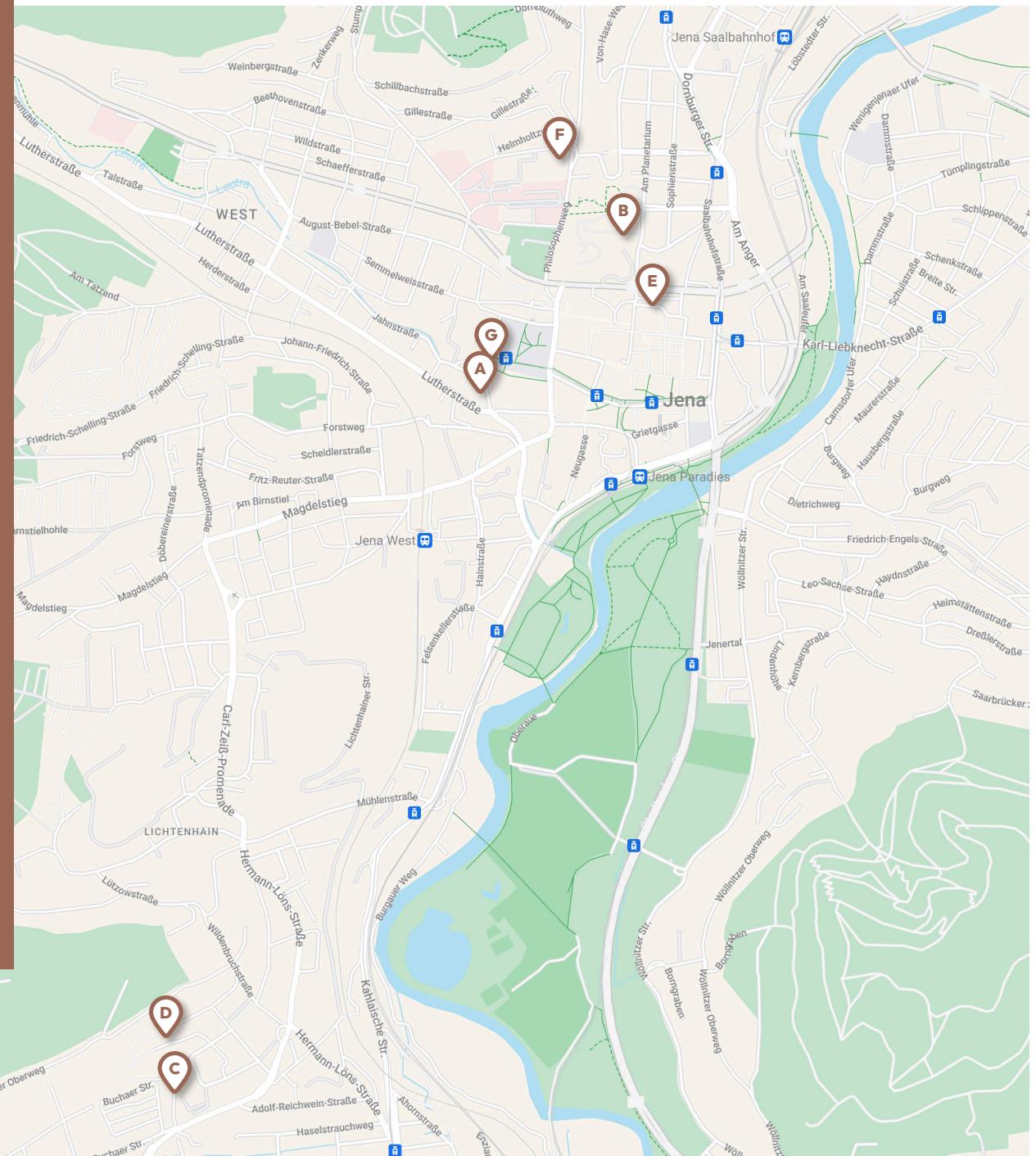
Institut für Optik und Quantenelektronik

Max-Wien-Platz, 107743 Jena



Jenoptik AG

Carl-Zeiss-Straße 1, 07743 Jena



kupfer_

Kupferverband e.V.

Emanuel-Leutze-Straße 11
D-40547 Düsseldorf

Telefon: +49 211 239469-0
Fax: +49 211 239469-10
info@kupfer.de
www.kupfer.de