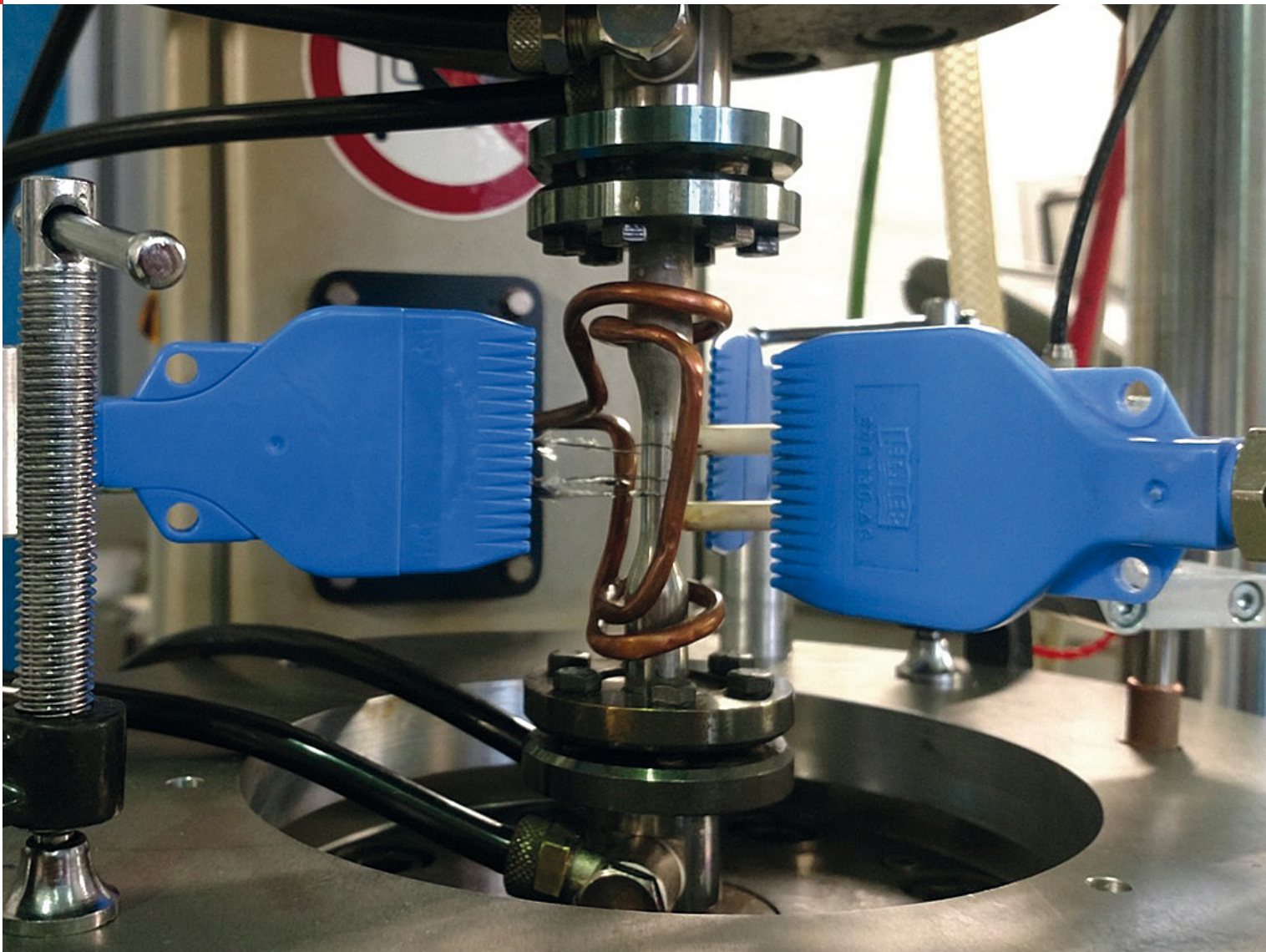




LOEWE

ABSCHLUSSBERICHT



LOEWE-Schwerpunkt ALLEGRO
Hochleistungskomponenten aus Aluminiumlegierungen
durch ressourcenoptimierte Prozesstechnologien

Inhalt

- 2 Statement des Koordinators
- 3 Projektinhalte
- 3 Wissenschaftlich-technische Ausgangslage
- 3 Im Rahmen des LOEWE-Projekts erreichte Erkenntnisse und getätigte Entwicklungen
- 4 Erreichte Strukturentwicklung
- 4 Erreichte Bedeutung/Stellung im Themen-/Forschungsfeld
- 6 Wichtigste Meilensteine des Projekts
- 9 Weitere Informationsmöglichkeiten
- 10 Zahlen und Fakten
- 11 Kurzvorstellung der beteiligten Hochschulen und außeruniversitären Forschungsinstitute
- 12 Impressum

Das ALLEGRO-Team verfolgte das Ziel, die Mobilität von heute und morgen durch innovative Leichtbaukonzepte basierend auf nachhaltigen Hochleistungswerkstoffen sicherer und ressourcenschonender zu machen.

Bisherige Ansätze erforderten eine zeit- und kostenintensive nachträgliche Wärmebehandlung. Die bei ALLEGRO im Fokus stehenden hochfesten Aluminiumlegierungen wurden genutzt, um leichtere und festere Strukturen in nur einem Prozessschritt herzustellen.

Das ALLEGRO-Team bestand aus einer Gruppe von ausgewiesenen Forschern aus zwei hessischen Forschungsstandorten (Kassel und Darmstadt), die Schlüsselpositionen entlang der Prozesskette mit Fokus auf die Wechselwirkungen zwischen Prozessen, Materialien und Eigenschaften besetzten und so die Umsetzung der visionären Ziele ermöglichten. Das ALLEGRO-Team konnte zeigen, dass Aluminiumlegierungen die geeignete Wahl sind, um

- prozessintegrierte Bauteile mit lokal angepassten Eigenschaften für eine optimale Funktionsleistung zu entwickeln,
- ökologisch und ökonomisch hocheffiziente Prozesse zu realisieren und
- die hohen gesellschaftlichen Anforderungen, z. B. an eine hohe Schadenstoleranz des Produktes, zu erfüllen.

Durch in ALLEGRO eingebundene KMU-Verbundvorhaben konnten duale Promotionsstellen mit den beteiligten Unternehmen für einen zusätzlichen gegenseitigen Austausch zwischen Wissenschaft und Industrie genutzt werden.

Die Ergebnisse des LOEWE-Schwerpunkts wurden in mehreren internationalen Summerschools präsentiert und in über 50 Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften und Konferenzbeiträgen veröffentlicht.

Die erarbeiteten Erkenntnisse aus ALLEGRO fließen in den Schwerpunkt BiTWerk (Biologische Transformation technischer Werkstoffe) der Universität Kassel ein und sollen zudem in einem SFB/TRR „Sprechende Bauteile“ mit dem Fokus auf ressourceneffiziente Produktion und smarte Nutzung von Bauteilen aus Leichtbaulegierungen weiterverfolgt werden.



Professor Dr.-Ing. Stefan Böhm
Koordinator des LOEWE-Schwerpunkts ALLEGRO
Universität Kassel



Projekthinhalte

Wissenschaftlich-technische Ausgangslage

Aluminium und Aluminiumlegierungen sind bereits seit Jahrzehnten wichtige Konstruktionswerkstoffe und z. B. im Flugzeugbau unverzichtbar. Der Schlüssel zur Nutzung des vollen Leichtbaupotenzials von Aluminium liegt in der Steigerung der geometrischen und mikrostrukturellen Komplexität von Produkten, die bisher jedoch noch nicht technologisch umgesetzt werden kann.

Im ALLEGRO-Konsortium wurden die im Bereich von Stahlwerkstoffen erfolgreich angewandten Methoden, z. B. das Pressformhärten, als ein erster Ansatz für die Herstellung ultraleichter Aluminiumkomponenten identifiziert.

Ein direkter Übertrag der Umformstrategien der Stahltechnologie auf Aluminiumlegierungen ist jedoch nicht möglich, da die in der Praxis genutzten Verfestigungsmechanismen in Stählen und Aluminiumlegierungen vollständig unterschiedlich sind. Nach dem Stand der Technik benötigen die für höchstfeste Aluminiumbauteile prinzipiell prädestinierten, aushärtbaren Aluminiumlegierungen der 7000er Serie (Al-Zn-Legierungen) eine Auslagerung nach dem Abschrecken, also mindestens zwei Prozessschritte. Ein dem Pressformhärten von Stahl vergleichbarer Ansatz in einem Prozessschritt existiert derzeit noch nicht.

Eine Warmformung von aushärtbaren Aluminiumlegierungen ist von höchstem Interesse, da in traditionellen Kaltformprozessen auftretende Probleme, wie eine nicht ausreichende Maßhaltigkeit, insbesondere durch eine Rückverformung aus der in der Werkzeugform eingestellten Geometrie, vermieden werden können. Die lokale Wärmebehandlung in einem Schritt birgt allerdings große wissenschaftliche Herausforderungen: Prozesszeiten für die Auslagerung sind zumindest in unverformten Zuständen sehr hoch. Zudem stellt die hervorragende thermische Leitfähigkeit des Aluminiums eine sehr anspruchsvolle prozesstechnische Herausforderung dar, weil die gezielte, energieeffiziente Einstellung von Temperatur-

feldern innerhalb der Bauteile bislang nicht gelingt. Im Sinne der produktionstechnischen Forschung fehlen bisher Ansätze, die notwendigen Stufen in einem Prozess integriert mit lokaler Varianz der Prozessführung und Eigenschaftsgenerierung aufzuzeigen.

Im Rahmen des LOEWE-Projekts erreichte Erkenntnisse und getätigte Entwicklungen

Im Rahmen des LOEWE-Schwerpunkts ALLEGRO wurde die Machbarkeit des Rollformens eines Rohrs aus der hochfesten Aluminiumlegierung AA7075 nachgewiesen und die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Profilformen, z. B. eines Hutprofils, aufgezeigt. Im Hinblick auf die hohe Rückfederung und das geringe Formänderungsvermögen sind je nach Anwendungsfall temperaturunterstützte Prozessrouten zu empfehlen. Die prozessintegrierte Wärmebehandlung ermöglicht sowohl eine Gradierung der Werkstoffeigenschaften als auch eine Verbesserung der Materialeigenschaften. Besonders bei geschweißten Bauteilen zeigt die prozessintegrierte Wärmebehandlung durch die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und der damit verbundenen höheren Bauteilperformance ihr Potenzial.

Es wurden zudem die Grundlagen für die mikro- und makrostrukturelle Herstellung von funktional gradierten Produktstrukturen aus höchstfesten Aluminiumlegierungen mit hoher Formgenauigkeit und Eigenschaftsvariabilität bei möglichst kurzen Prozessabläufen erarbeitet. Mit Hilfe des Laserstrahlschweißens (LBW), des Rührreißschweißens (FSW) und des Magnetpulsschweißens wurde jeweils die hochfeste Aluminiumlegierung EN AW-7075 prozesssicher gefügt. Die im LOEWE-Schwerpunkt ALLEGRO gewonnenen Erkenntnisse im Bereich der stoffschlüssigen Fügeverfahren werden bei zukünftigen Leichtbauanwendungen wie bspw. im Bereich der E-Mobilität ein hohes Leichtbaupotenzial ermöglichen und somit einen wichtigen Beitrag zur Verkehrswende leisten.

Die Beschichtung der Umformwerkzeuge zur Warmumformung von Aluminiumlegierung zur Vermeidung von Adhäsion des Aluminiums zum Werkzeug konnte signifikant reduziert werden.

Im LOEWE-Schwerpunkt ALLEGRO wurden zudem die Zusammenhänge zwischen Prozessverlauf, Mikrostrukturentwicklung und mechanischen Eigenschaften ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass aufgrund der beschleunigten Ausscheidungskinetik sowohl die Prozessroute über eine simultan zu den Wärmebehandlungen durchgeführte Verformung, als auch eine spannungsüberlagerte Auslagerung großes Potenzial zur Realisierung eines ökologisch und ökonomisch höchst effizienten Fertigungsprozesses bietet. Es wurde zudem ein umfassender Beitrag zur Betriebsfestigkeitsbewertung von umgeformten und geschweißten Strukturen (LBW, FSW, MPW) aus hochfesten Aluminiumknetlegierungen geleistet. So konnten unter Berücksichtigung der Geometrie mit lokalen Bewertungskonzepten die Lebensdauer für Laserstrahlschweißverbindungen der Aluminiumknetlegierung zuverlässig abgeschätzt werden.

Da eine Gefügeveränderung infolge integrierter Umformung und Wärmebehandlung durch Rohrformung und Längsverschweißung von Blechen sich nicht vermeiden lässt, wurde deren Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit der hochfesten Komplexlegierungen EN AW-7075, EN AW-7020 und EN AW-6082 untersucht und bewertet.

Erreichte Strukturentwicklung

Die Zusammenführung der vorhandenen Einzelexperten in den international ausgewiesenen Forschungsgruppen an den Forschungsstandorten Kassel und Darmstadt entlang der gesamten Prozesskette vom Werkzeugdesign und der Formgebung hin zu den Bauteileigenschaften wurde sehr erfolgreich umgesetzt. Da die einzelnen Teilprojekte sehr stark miteinander verzahnt waren, arbeiteten Arbeitsgruppen eines Standortes auch temporär am jeweils anderen Standort. Durch die durchgeführten Schwerpunktversammlungen und SummerSchools sowie durch die Kooperation mit dem Industriearbeitskreis wurden sowohl eine Vielzahl einzelner, öffentlich geförderter Projekte initiiert als auch die Thematik für eine Vertiefung in Form eines DFG SFB/Transregio erarbeitet. Am Standort Kassel wurde der universitäre Forschungsschwerpunkt „Molekulare, Nano- und

Mikrokomponenten für multifunktionale Werkstoffe, Bauelemente und Systeme“ durch ALLEGRO etabliert und findet in diesem seine Fortführung.

Die im Rahmen des ALLEGRO-Projekts gewonnenen Erkenntnisse und das aufgebaute strukturelle Netzwerk werden nicht nur die Herstellung von Aluminiumlegierungen mit den gewünschten Eigenschaften, sondern auch die Entwicklung von Leichtbaulegierungen und schließlich die Reduzierung der CO₂-Emissionen in der Zukunft erleichtern.

Erreichte Bedeutung/Stellung im Themen-/Forschungsfeld

Innerhalb des Förderzeitraums von Januar 2018 bis Juni 2022 wurden im LOEWE-Schwerpunkt ALLEGRO verschiedene Verarbeitungsverfahren wie z. B. Presshärten, Walzprofilieren und Schweißen erfolgreich zur Herstellung von ultraleichten Aluminiumbauteilen eingesetzt. Die aushärtbaren Aluminiumlegierungen der 7000er Serie (Al-Zn-Legierungen) und der 6000er Serie standen im Mittelpunkt des ALLEGRO-Projekts. Die mikrostrukturelle Entwicklung, die Veränderungen der mechanischen Eigenschaften und das Korrosionsverhalten bei verschiedenen thermomechanischen Behandlungen wurden eingehend analysiert.

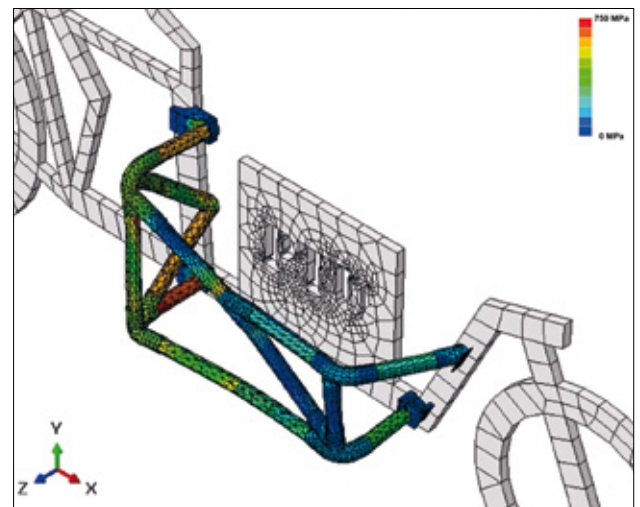
Dem ALLEGRO-Konsortium ist es dabei gelungen, nationale Alleinstellungsmerkmale sowie größte internationale Sichtbarkeit zu erarbeiten und sich dabei mit weiteren national und international bestens ausgewiesenen Arbeitsgruppen (so u. a. der Arbeitsgruppe von Prof. O. Keßler, Universität Rostock) intensiv zu vernetzen. Mit Blick auf die aktuelle internationale Literatur zur thermomechanischen Prozessierung von hochfesten Aluminiumlegierungen zeigt sich eine sehr dominierende Rolle des ALLEGRO-Teams. Auf Basis der exzellenten Sichtbarkeit ist es bereits gelungen, in hochkompetitiven Programmen weitergehende Forschungsmittel zu akquirieren. Während des Abschlusskolloquiums, veranstaltet im Rahmen des international weithin bekannten Kongresses „Materials Science and Engineering (MSE 2023)“, erfreute sich das ALLEGRO-Symposium einer sehr regen Teilnahme. Das Feedback der Teilnehmenden



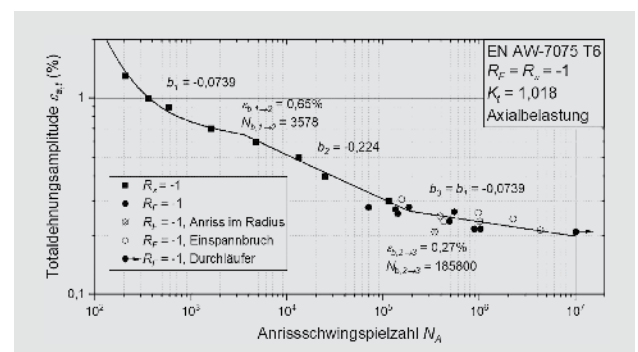
Projektbearbeiter Timon Suckow an der Rollformanlage (Rohreinformung).

hob die exzellenten Beiträge der ALLEGRO-Mitarbeitenden hervor, auf Basis der geführten Diskussionen mit international ausgewiesenen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sind weitergehende Planungen zur Beantragung koordinierter Forschungsprojekte gestartet. Die Förderung des ALLEGRO-Projekts hat somit alle beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, d.h. sowohl die projektleitenden Professorinnen und Professoren als auch den gesamten wissenschaftlichen Nachwuchs, im Forschungsfeld in weithin national und international sichtbare Positionen gerückt (die Geschäftsführerin der ersten Förderabschnitte des ALLEGRO-Projekts hat den Ruf auf eine Professur erhalten und angenommen).

Die internationale Vernetzung mit führenden Instituten und Industrieunternehmen wurde über die bereits benannten SummerSchools sowie den Industriebeirat weitergehend gestärkt. Somit ist in der Summe der dargelegten wissenschaftlichen und anwendungstechnischen Erfolge dem ALLEGRO-Konsortium eine exzellente Sichtbarkeit im Feld zu attestieren, sowohl in der Akademie als auch in der Industrie.



Crashsimulation am ausgewählten Demonstrator in Form eines Ladekorbes.



Fatigue Life Curve für EN AW-7075 T6 Blech mit 1,5 mm Dicke.

Wichtigste Meilensteine des Projekts



Hessen schafft Wissen, Stand des ALLEGRO-Projektes beim Hessentag 2018 in Korbach.



Prof. Böhm stellt Schülerinnen und Schülern das ALLEGRO-Projekt beim Hessentag 2018 vor.



Vorstellung des ALLEGRO-Projekts vor dem Universitätspräsidenten Prof. Finkeldey beim Campusfest 2018 Universität Kassel.



Vorführung von höchstfesten Aluminiumproben mit gradierten Eigenschaften am ProLOEWE Stand auf dem Hessentag (Bad Hersfeld), 2019 – Staatssekretärin Ayse Asar im Gespräch mit Direktoriums-Sprecher von ProLOEWE Prof. Heim.



30. September – 3. Oktober 2019: Zweite SummerSchool des LOEWE-Schwerpunkts ALLEGRO im schwedischen Ulricehamn.

Wer rettet die Mars-Mission?

Loewe-Exzellenzprojekte laden beim Campusfest zu Wissenschafts-Escape-Room ein

VON KATJA RUDOLPH

Kassel – Die Mars-Mission droht in einer Katastrophe zu enden: Der schusselige Raumschiff-Hausmeister hat sich auf die Tastatur gesetzt, und nun wird ein Mars-Roboter mit Künstlicher Intelligenz aufgeladen und droht die Erde zu zerstören. Da sind kluge Köpfe gefragt, um das Desaster abzuwenden. Das ist das Szenario, mit dem am Donnerstag beim Campusfest der Uni Kassel das Interesse an hessischer Spitzenforschung geweckt werden soll.

Dafür bedienen sich die Wissenschaftler aus drei Projekten der „Loewe-Forschungsförderung des Trendspiels Escape Room, bei dem die Teilnehmer in einen Raum eingesperrt werden und Rätsel lösen müssen, um sich zu retten. Spontan würden wohl wenige Menschen stehen bleiben, wenn sie hören, dass es um skalierbare molekulare Quantenbits geht. Ein gefährlicher Marsianer macht da schon eher neugierig. Die Aufgaben, die Gäste der fiktiven „Pro-Loewe-



Wissenschaft spielerisch entdecken: Die Loewe-Mitarbeiter Dr. Seyedvahn Sajjidifar (von links), Muhammad Shaharukh, Özlem Urcan, Stephan Völkers und Dr. Ingo Köhne bei einem Probelauf für den Escape Room.

FOTO: DIETER SCHACHTSCHNEIDER

Mars-Mission“ lösen müssen, um das Unheil zu verhindern, haben Bezug zu den Forschungsthemen.

Um das Schloss zum Notstopp-Knopf zu öffnen, gilt es die richtige Zahlenkombination zu errätseln. Auf dem Weg dahin muss ein Puzzle zusammengefügt werden, dass viele

überzählige Teile hat. Um die richtigen herauszufiltern, hilft das Wissen über eine grundlegend unterschiedliche Eigenschaft von Aluminium und Eisen. Die Kasseler Wissenschaftler des Projekts „Allegro“ wären da gute Tippgeber. Sie forschen zu hochfesten Aluminiumverbindun-

gen, die ein geringes Gewicht haben. Sie könnten Bauteile aus Stahl ersetzen, etwa im Flugzeugbau. „Auch für eine Mars-Station wäre das interessant“, sagt Allegro-Mitarbeiter Stephan Völkers.

Ebenso hat das Kasseler Loewe-Vorhaben Smolbits, das sich mit molekularer Da-

tenspeicherung befasst, Aspekte seiner Themen in Rätseln des Escape Rooms umgesetzt. Dabei spielen Lanthanoide eine Rolle, das sind Seltene Erden. Unter UV-Licht fluoreszieren sie in verschiedenen Farben. Doch wo ist die UV-Lampe versteckt? Wer weiß, was man im Labor trägt und dann noch ein wenig Chemie-Grundwissen hat und sich erinnert, dass die einzelnen Elemente im Periodensystem mit Ordnungszahlen versehen sind, hat gute Chancen, einen wichtigen Code zu knacken.

Nicht alle Aufgaben hätten direkt mit den Forschungsvorhaben zu tun, sagt Dr. Ingo Köhne, der am Projekt Smolbits beteiligt ist. Vor allem gehe es darum, Besucher zu ermutigen, nach dem Spiel Fragen zu stellen. Am Ende geht es weniger darum, ob die Mars-Mission gerettet ist. Sondern, dass der eine oder andere eine grobe Vorstellung davon mitnimmt, was Quantencomputer sind.

Der Escape-Room ist am 30. Juni ab 15 Uhr Campus Center aufgebaut. **ARTIKEL RECHTS**

Auf dem Campusfest der Universität Kassel wurde von drei LOEWE-Schwerpunkten ein ESCAPE ROOM ausgerichtet, in denen ALLEGRO-Inhalte dem breiten Publikum halfen, den ESCAPE ROOM zu bezwingen.

Weitere Informationsmöglichkeiten

- <https://proloewe.de/de/loewe-vorhaben/nach-themen/allegro/>
Projekt-Homepage des LOEWE-Schwerpunkts ALLEGRO im ProLOEWE Netzwerk
- <https://www.uni-kassel.de/forschung/allegro/projektbeschreibung>
Projekt-Homepage des LOEWE-Schwerpunkts ALLEGRO der Universität Kassel
- https://www.ptu.tu-darmstadt.de/mu_forschung/mu_prozesskettenundanlagen_1/menu_pa_aktuelleforschungsprojekte_1/allegro___hochleistungskomponenten_aus_aluminiumlegierungen_durch_ressourcenoptimierte_prozesstechnologien/index.de.jsp
Projektpartnerin Technische Universität Darmstadt
- <https://www.lbf.fraunhofer.de/content/dam/lbf/de/documents/presse/presseinfo-allegro.pdf>
- <https://2018.lbf-jahresbericht.de/leistungen/uebersicht-projekte/leichtbau/allegro-hochleistungskomponenten-aus-aluminiumlegierungen/>
Projektpartner Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF
- <https://www.uni-kassel.de/maschinenbau/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=4294&token=c0c31e71354e594693b5cb30d385444b8c2f928d>
Bericht in der HNA zum ESCAPE ROOM auf dem Campusfest 2022 der Universität Kassel

Zahlen und Fakten¹

Förderzeitraum	01.01.2018 – 30.06.2022
Bewilligte LOEWE-Mittel in Euro	4.680.656
Bewilligte Drittmittel in Euro	15.343.721
Beschäftigte insgesamt ²	11
darunter LOEWE-finanziert	4
Erfolgreich abgeschlossene Promotionen	3
Erfolgreich abgeschlossene Habilitationen	–
Wissenschaftliche Publikationen	35
Fachvorträge auf wissenschaftlichen Tagungen/Konferenzen	14
Angemeldete Patente	–
darunter bereits erteilt	–

¹ Die Angaben beziehen sich mit Ausnahme der Beschäftigten auf die gesamte Projektlaufzeit.

² Die Anzahl der Beschäftigten bezieht sich auf alle Beschäftigten, die an dem LOEWE-Projekt mitgearbeitet haben, in Vollzeitäquivalenten, unabhängig von ihrer Finanzierung, Stichtag 31.12. des letzten Förderjahres.

Kurzvorstellung der beteiligten Hochschulen und außeruniversitären Forschungsinstitute

Universität Kassel

www.uni-kassel.de

An der Universität Kassel werden Offenheit, Initiative, fächerübergreifendes und unkonventionelles Denken gewünscht und gefördert. Ideen zu entwickeln, zu überprüfen und umzusetzen ist hier der Anspruch – auch wenn sich diese noch nicht im Mainstream befinden. Die Universität Kassel zeichnet sich durch ein außergewöhnlich breites Profil mit den Kompetenzfeldern Natur, Technik, Kultur und Gesellschaft aus und trägt so zur nachhaltigen Entwicklung der Gesellschaft bei – durch relevante und zukunftsgerichtete Forschung ebenso wie durch die zeitgemäße Ausbildung von Absolventinnen und Absolventen und durch Wissenstransfer in die Region. Engagement und Initiative sind willkommen und werden unterstützt. Zugleich ist die Hochschule eingebettet in ein Netzwerk von Partnern und Freunden. Mit über 300 Professorinnen und Professoren und über 23.000 Studierenden ist die Universität sowohl international vernetzt als auch – als einzige Hochschule Nordhessens – regional verankert.

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T

Technische Universität Darmstadt

<https://www.tu-darmstadt.de>

Die TU Darmstadt zählt zu den führenden Technischen Universitäten in Deutschland. Ihre rund 320 Professorinnen und Professoren, 4.700 wissenschaftlichen und administrativ-technischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, Auszubildenden und wissenschaftlichen Hilfskräfte sowie 25.000 Studierenden widmen sich entscheidenden Zukunftsfeldern wie Energie, Mobilität, Kommunikation und Information sowie Bauen und Wohnen. Die vielfältigen Disziplinen der Universität konzentrieren sich alle auf Technik – aus der Perspektive der Ingenieur-, Natur-, Geistes- und Gesellschaftswissenschaften – von der Erkenntnis bis zur Anwendung im Alltag.



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

www.lbf.fraunhofer.de

Das Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF in Darmstadt steht für innovative Lösungen in der Schwingungstechnik, im Leichtbau, in der Zuverlässigkeit und in der Polymertechnik. Schwerpunkte liegen auf sicherheitsrelevanten Systemen, auf Material- und Komponentenfunktionen sowie auf strukturmechanischen Eigenschaften. Über 500 Mitarbeitende forschen auf mehr als 11.560 Quadratmetern Labor- und Versuchsfläche.

 **Fraunhofer**
LBF

HESSEN



Das Forschungsförderungsprogramm LOEWE ist eine Förderinitiative des Hessischen Ministeriums für Wissenschaft und Forschung, Kunst und Kultur.

Impressum

Herausgeber:

Hessisches Ministerium
für Wissenschaft und Forschung, Kunst und Kultur
Rheinstraße 23 – 25
65185 Wiesbaden

Inhalt:

LOEWE-Schwerpunkt ALLEGRO
Hochleistungskomponenten aus Aluminiumlegierungen
durch ressourcenoptimierte Prozesstechnologien

Redaktion:

LOEWE-Geschäftsstelle im Hessischen Ministerium
für Wissenschaft und Forschung, Kunst und Kultur

Layout:

Christiane Freitag, Idstein

Fotos und Grafiken:

LOEWE-Schwerpunkt ALLEGRO
Hochleistungskomponenten aus Aluminiumlegierungen
durch ressourcenoptimierte Prozesstechnologien
S. 2: © Holger Jenss & Nicolas Wefers; S. 6 Abb. 1 und 2: © ProLOEWE/
Tanja Desch, Abb. 3: © ProLOEWE/ Marc Guddorp; S. 7 Abb. 1:
© ProLOEWE/Lukas Schell