

Center for Applied Energy Research



Trends in der zerstörungsfreien Prüfung im Bereich der Thermophysik für die Grand Challenges

Jürgen Hartmann
Center for Applied Energy Research e.V
Magdalene Schoch Str. 3
97074 Würzburg
Cae-zeroarbon.de

- **Grand Challenges und Stand der zerstörungsfreien Prüfung**
- **Zerstörungsfreie Prüfung für die Grand Challenges – wie geht es weiter?**
- **Wichtige neue Trends in der zerstörungsfreien Prüfung**

Grand Challenges und Stand der zerstörungsfreien Prüfung

Grand challenges

Gesundheit und Sicherheit
Globale Erwärmung
Energieversorgung
Moderne Fertigungstechniken
Digitalisierung

Gemäß der Thermometry- Roadmap des EURAMET TC-T

Machin, G., Bojkovski, J., del Campo, D. *et al.* A European Roadmap for Thermometry. *Int J Thermophys* **35**, 385–394 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10765-013-1554-4>



Werkstoffe und Materialien für die Energiewende

Acatech MATERIALIEN

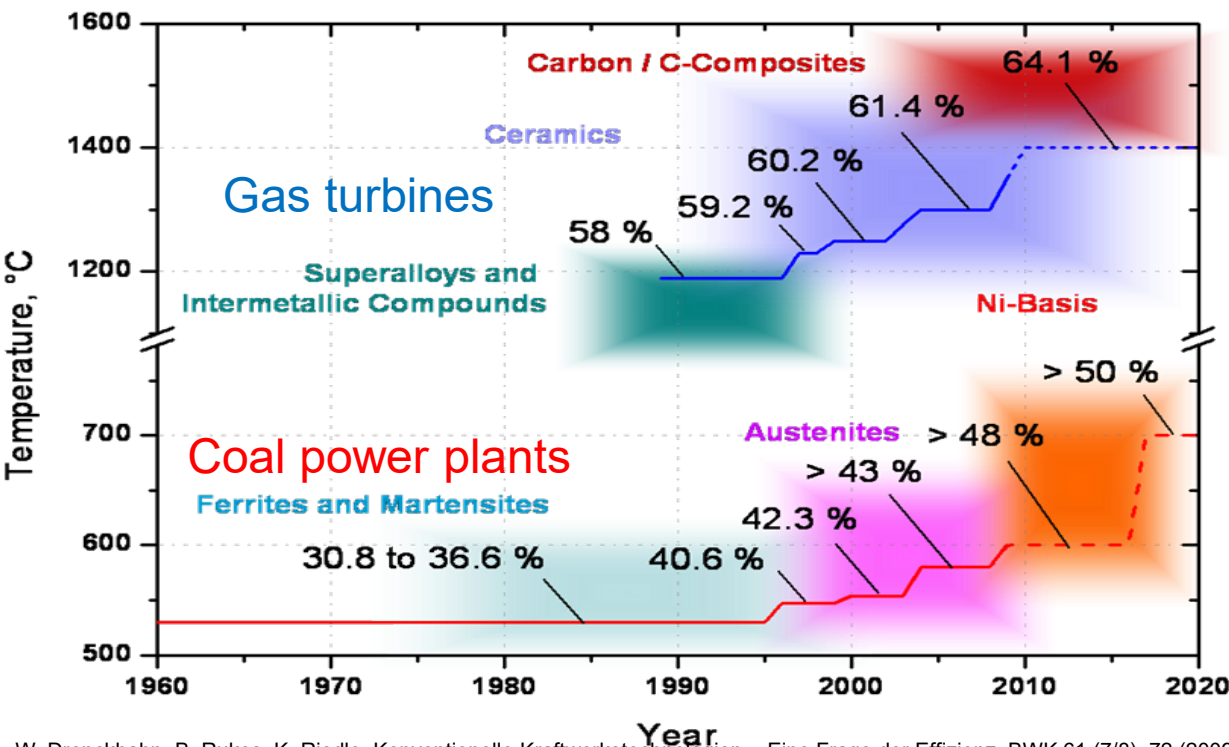
Veröffentlicht: 16. März 2017:

„Ein wesentlicher Schlüssel für die Entwicklung und Beurteilung von Materialien und Werkstoffen besteht in der **detaillierten Charakterisierung der Materialstrukturen und -eigenschaften**. Hierzu werden Methoden eingesetzt, welche die gesamte **Spannweite von der Mikroskopie mit sub-atomarer Auflösung bis hin zu großskaligen mechanischen Bauteiluntersuchungen abdecken**.“

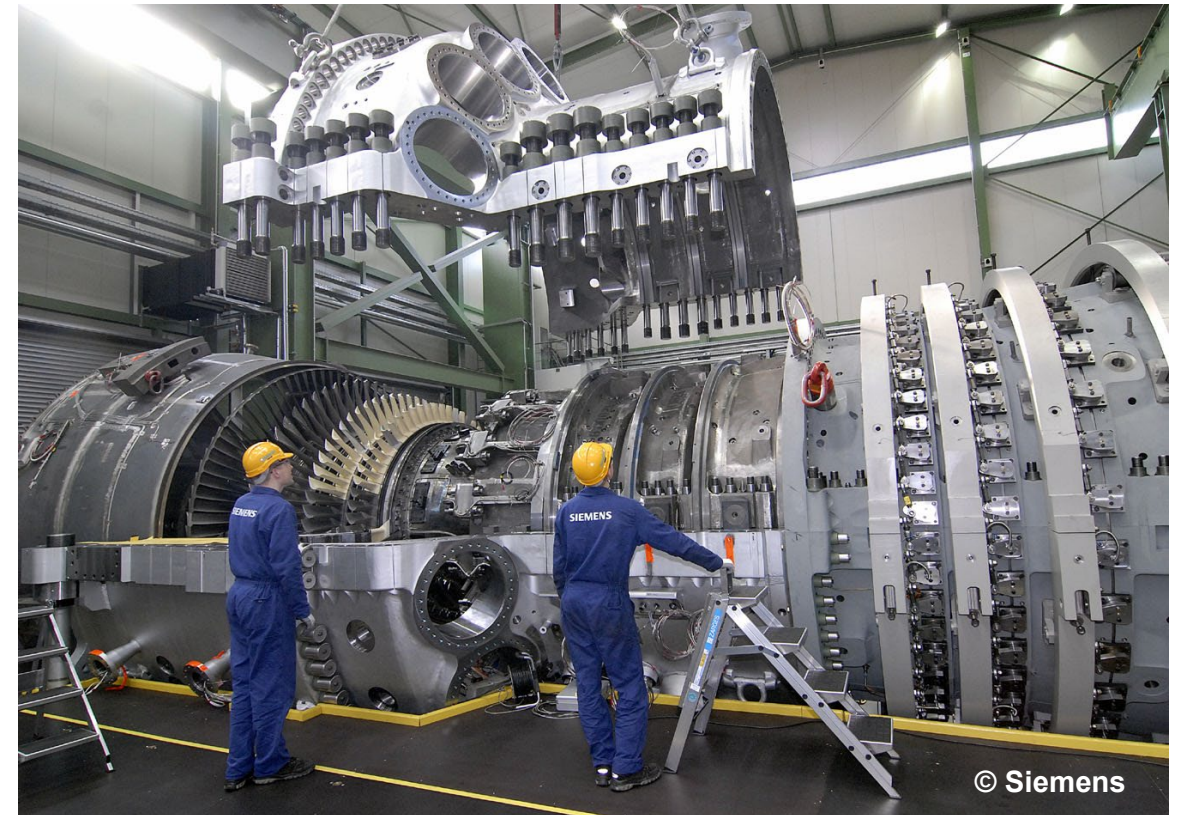


Kernkompetenz des Center for Applied Energy Research

Turbinenschaufeln – Vom Labor zu Felduntersuchungen

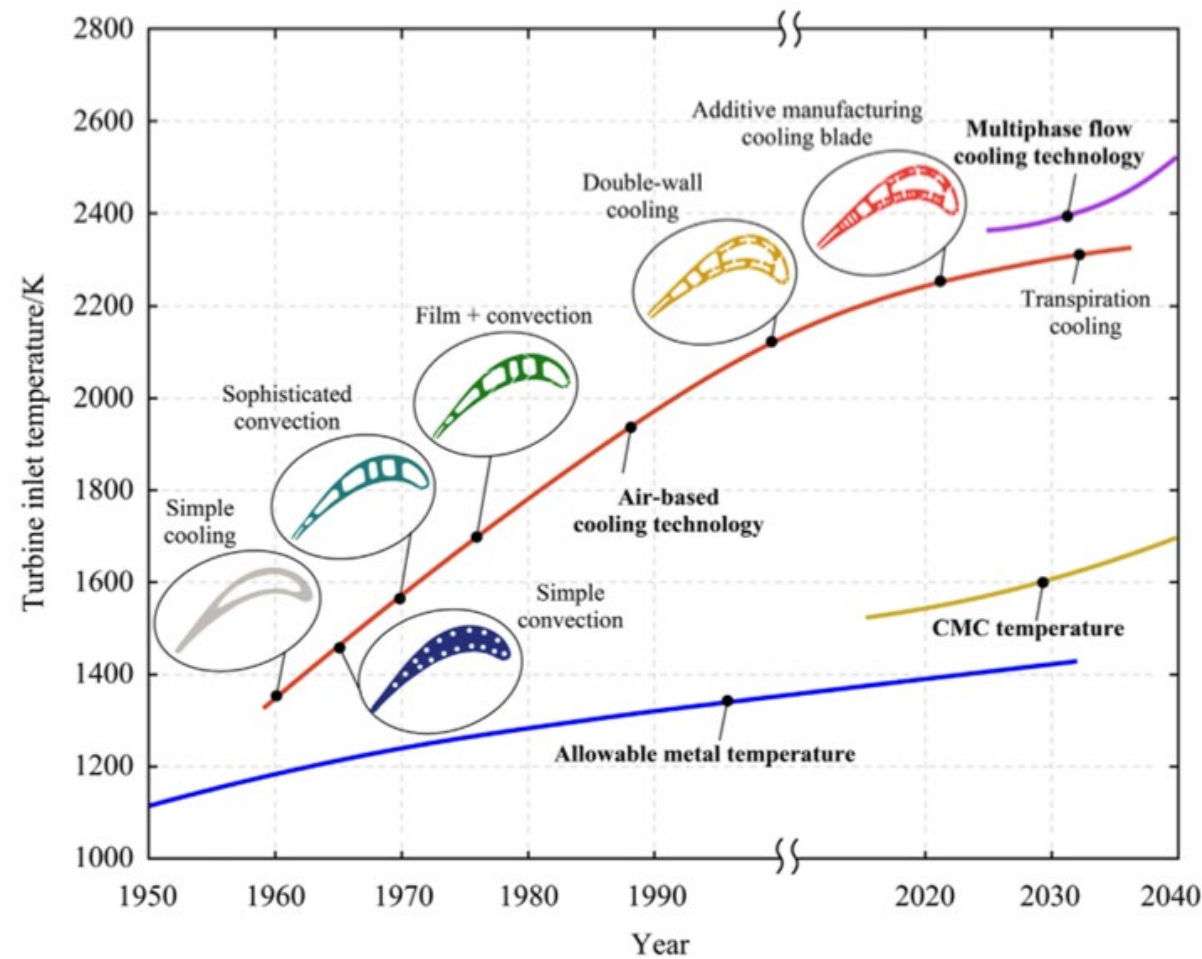


W. Drenckhahn, B. Rukes, K. Riedle, Konventionelle Kraftwerkstechnologien – Eine Frage der Effizienz, BWK 61 (7/8), 72 (2009)
 ALSTOM Power Generation AG, „Life Needs Power“, HANNOVER MESSE 2007
 R.B., Heimann, Plasma Spray Coating: Principles and Applications, Wiley-VCH, Weinheim, 2nd edition (2008)



Stationäre Gasturbine (Siemens Berlin Test Facility, BTF)

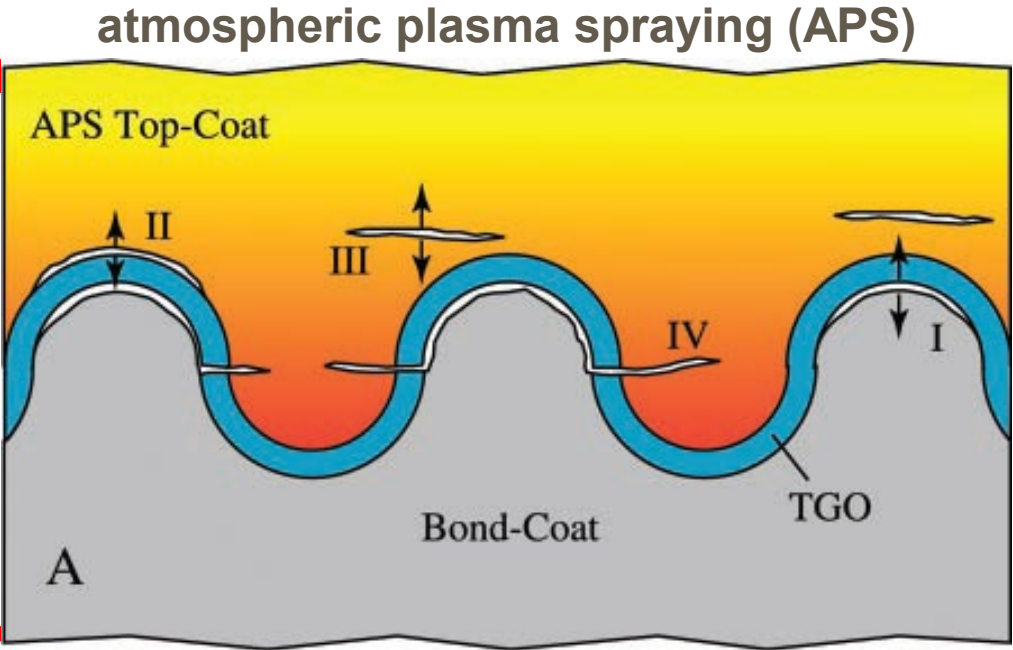
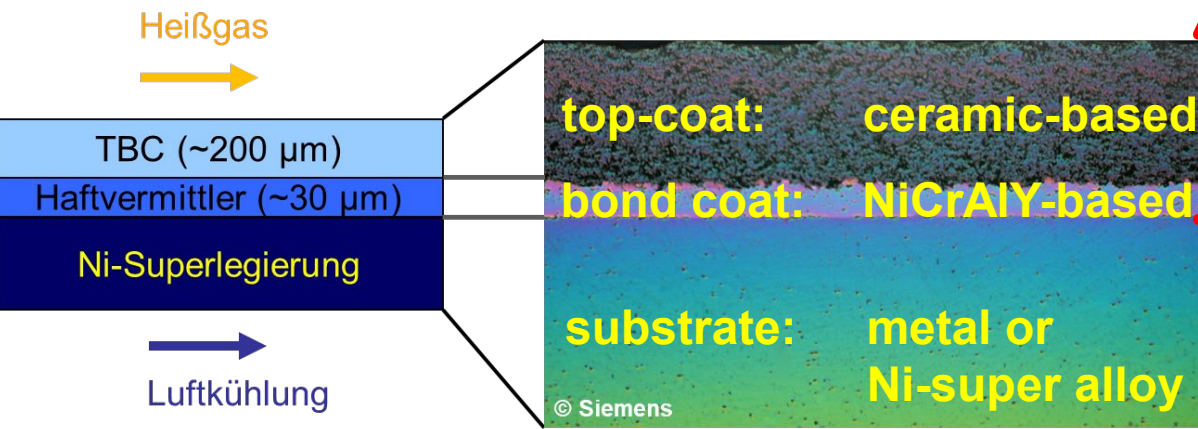
Herausforderungen in der Turbinentechnik



Turbinenschaufeln



Teilweise oder lokale Ablösung der Beschichtung durch Bildung von thermischen Oxiden (TGO)



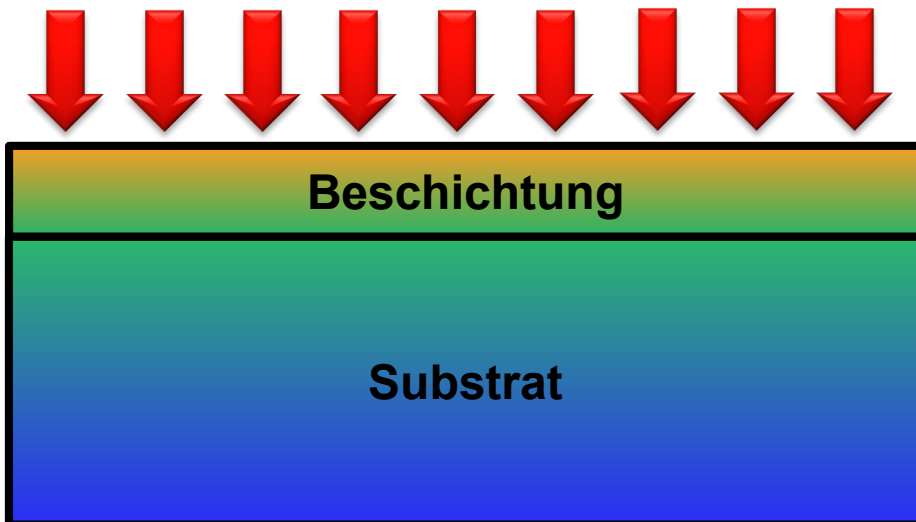
Nitin, P. P., Maurice, G. und Eric, H. J. (2002). Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications. Science, 296 280-284

Idee: Detektion der Ablösung durch aktive Thermographie

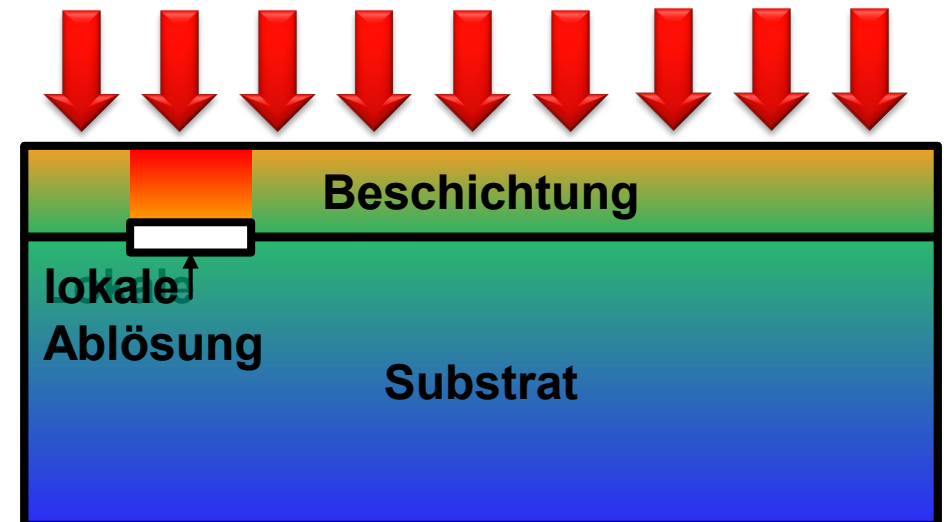
Berührungslose Heizung und Messung

- Externe Heizung der Oberfläche (Infrarotlaser oder Strahler)
- Messung der lateralen Temperaturverteilung mit einer Thermographiekamera

Beschichtung ohne Fehler



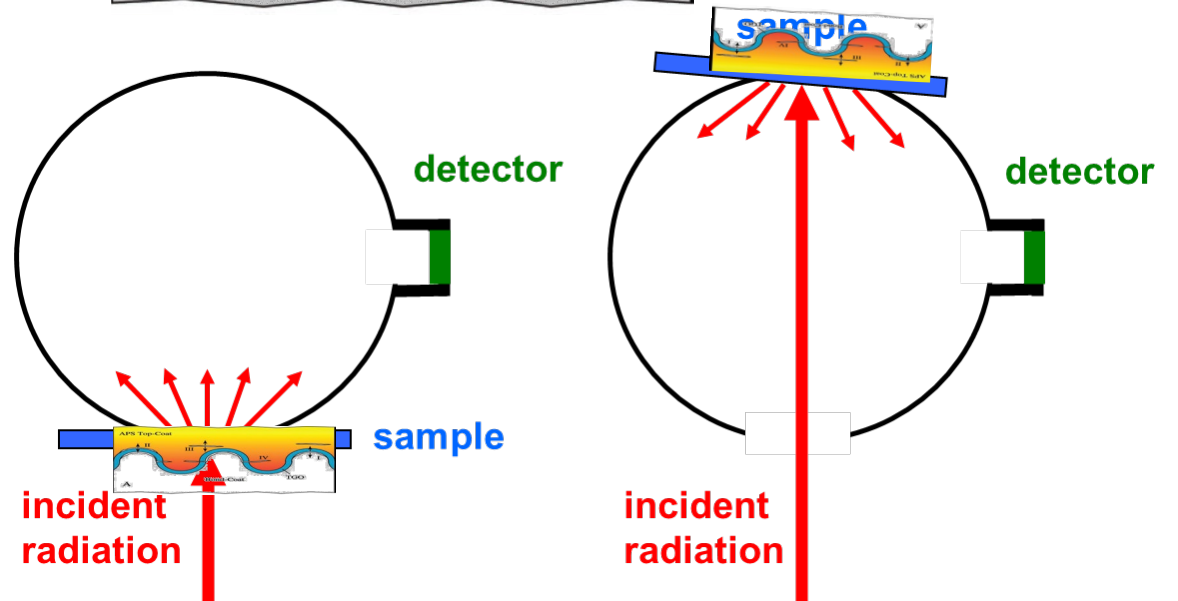
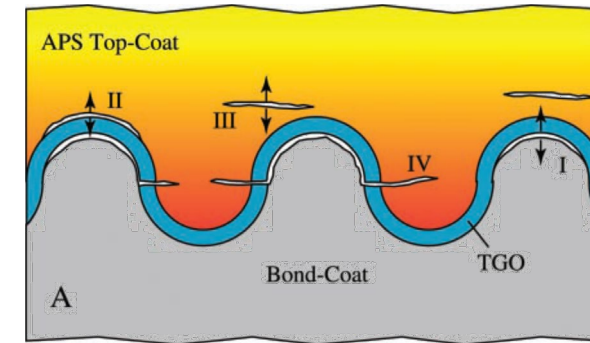
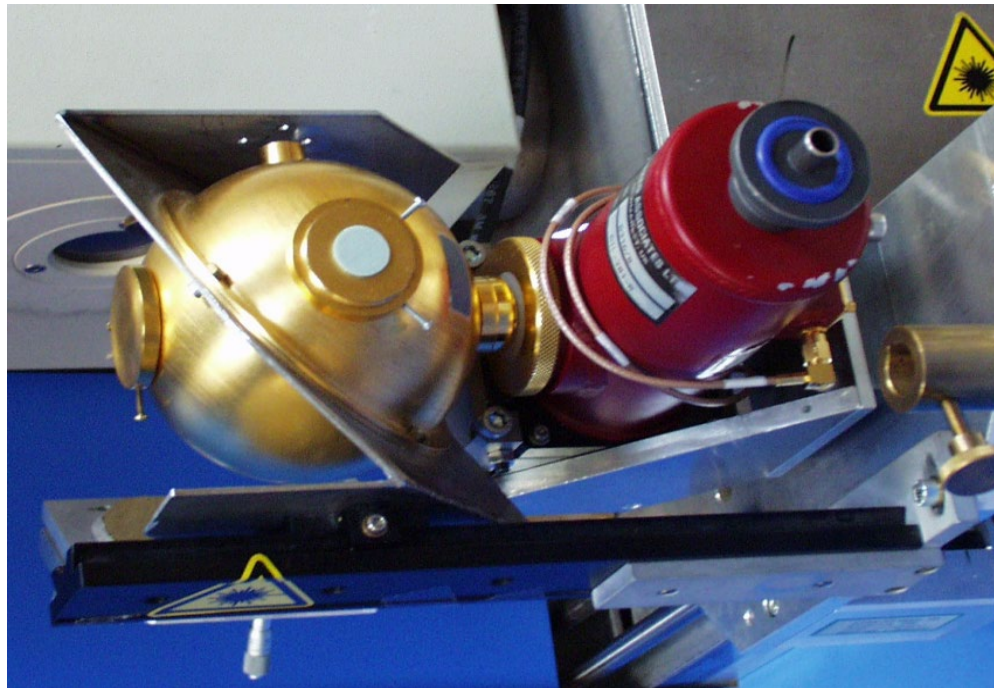
Beschichtung mit Fehler



Infrarot-Optisch Eigenschaften der halbtransparenten Keramikbeschichtungen

Messung der Transmission und Reflexion der *freistehenden Schichten* mit

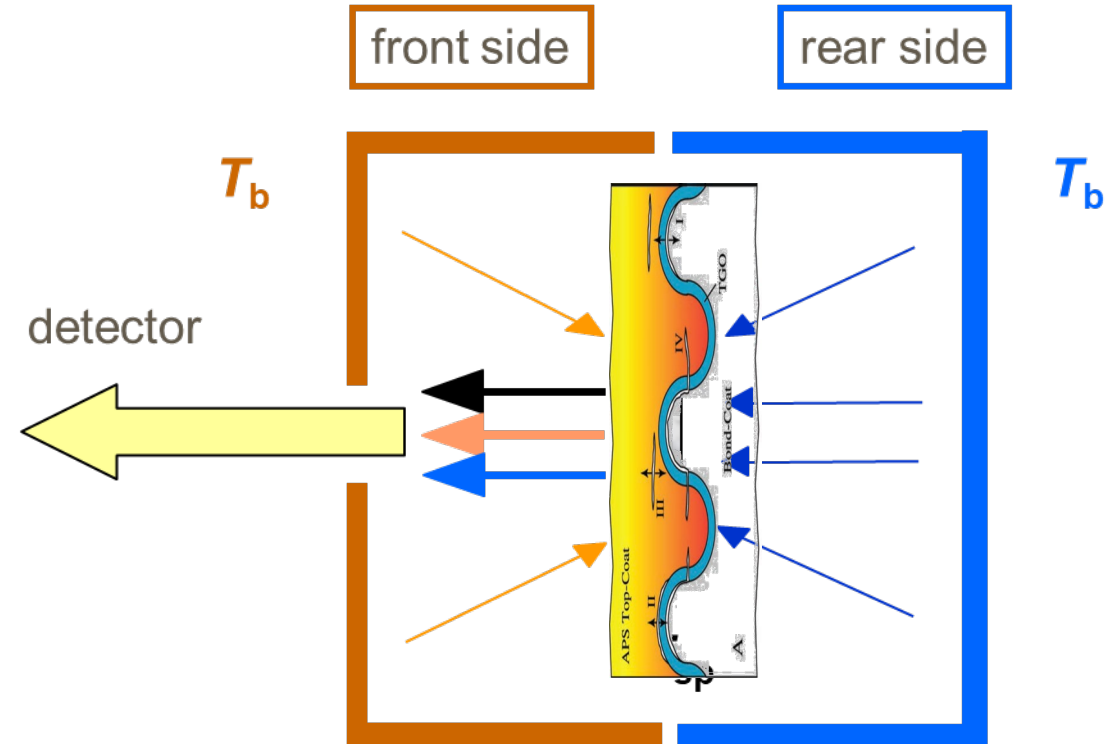
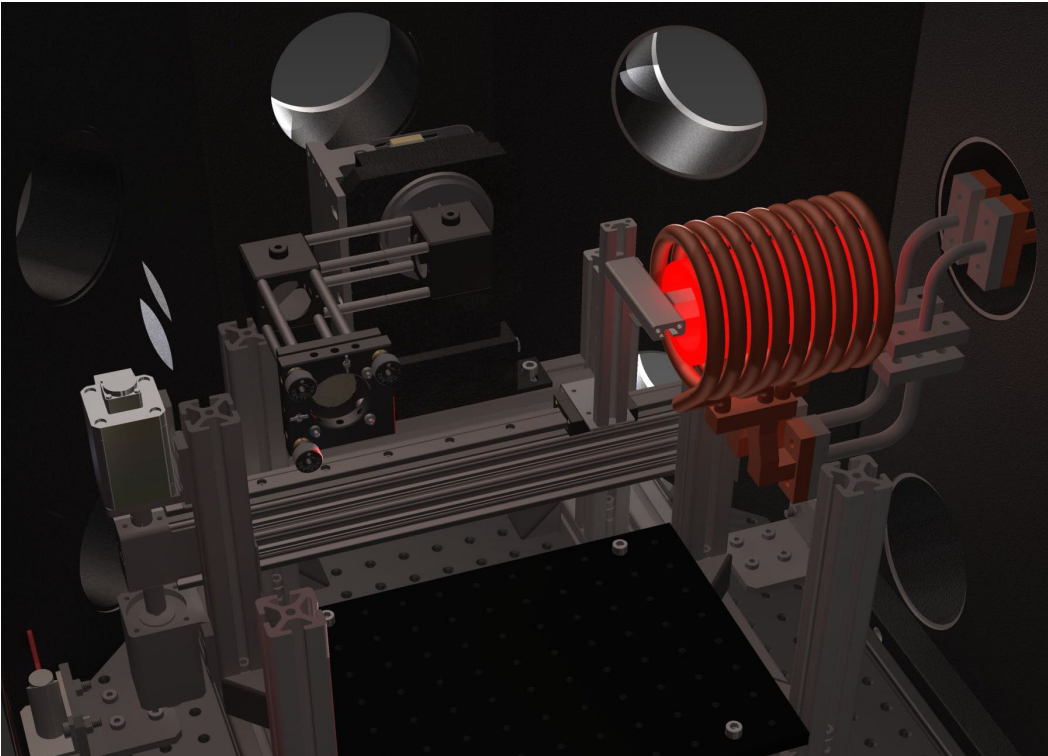
- Ulbrichtkugel bei Raumtemperatur



Infrarot-Optisch Eigenschaften der halbtransparenten Keramikbeschichtungen

Messung der Transmission und Reflexion der *freistehenden Schichten* mit

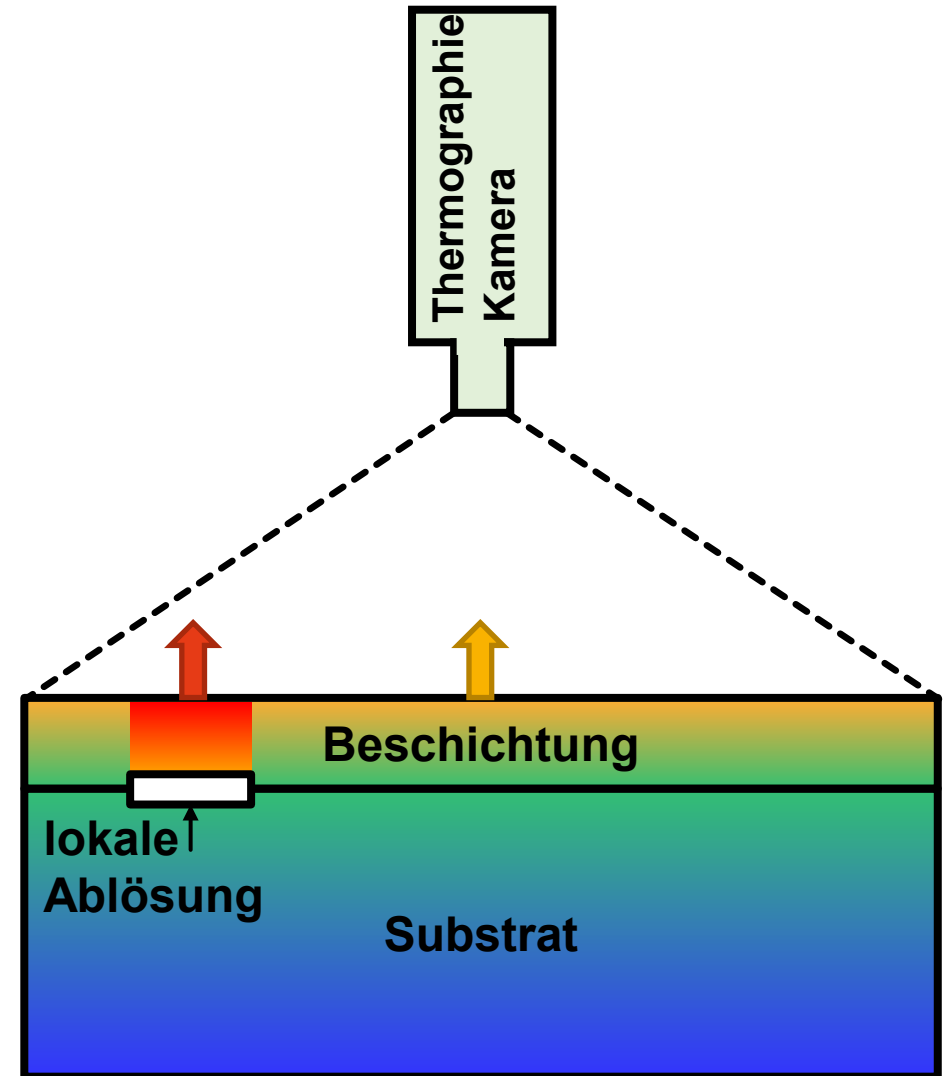
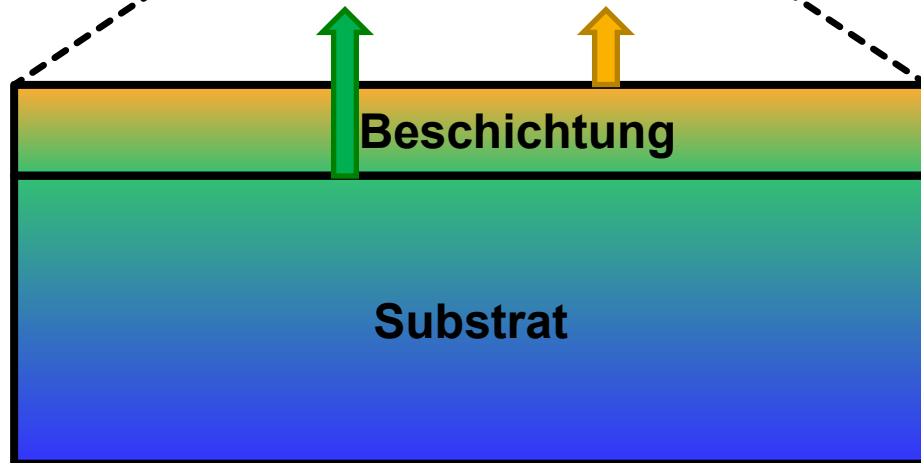
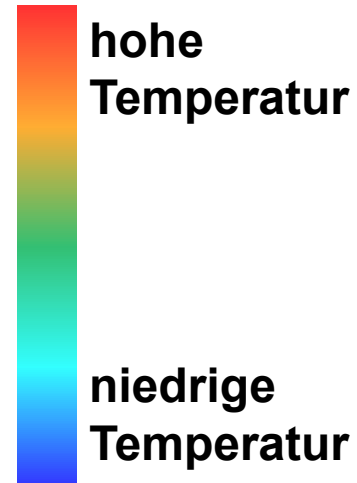
- Ulbrichtkugel bei Raumtemperatur
- Black body boundary conditions (BBC) Methode bei hohen Temperaturen



Detektion der Ablösung durch aktive Thermographie

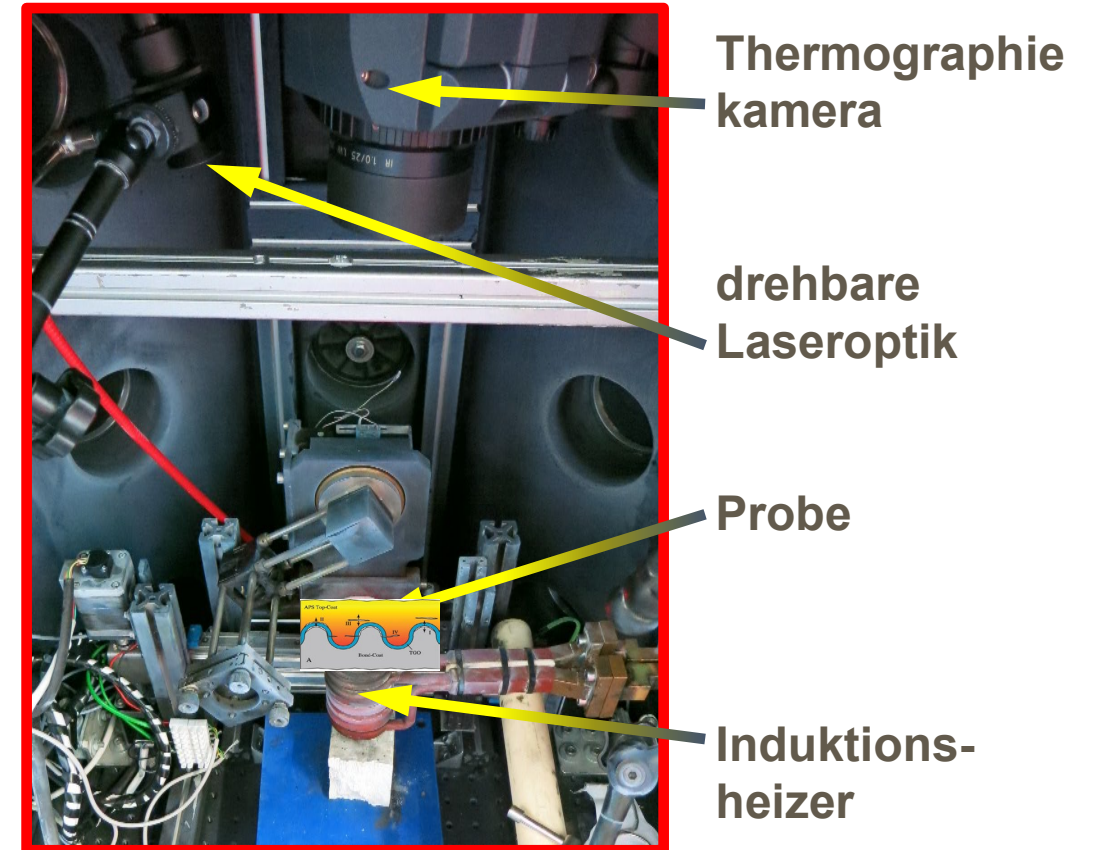
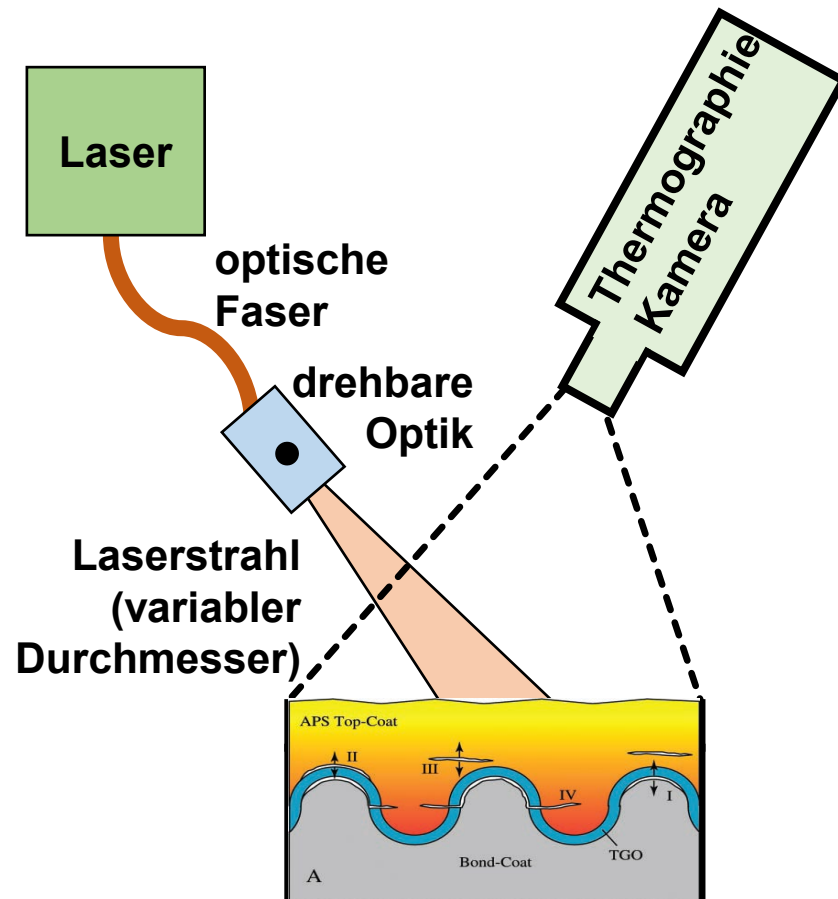


Thermographie
Kamera



Aufbau für berührungslose Messung der teilweisen Delamination der Beschichtung

- Aktive Thermographie:**
- Beschichtung mit Laser erwärmen
 - Messung der Temperaturverteilung mit Thermographiekamera



Messung der keramische Beschichtung auf Metallsubstraten

Detektion lokaler Delamination mit definierter Geometrie

coating with partial delamination (air gap)

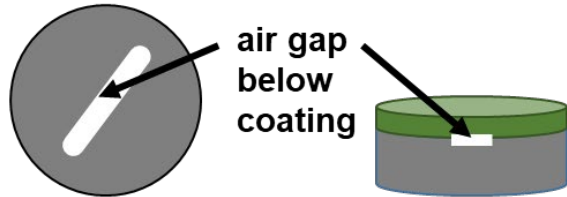
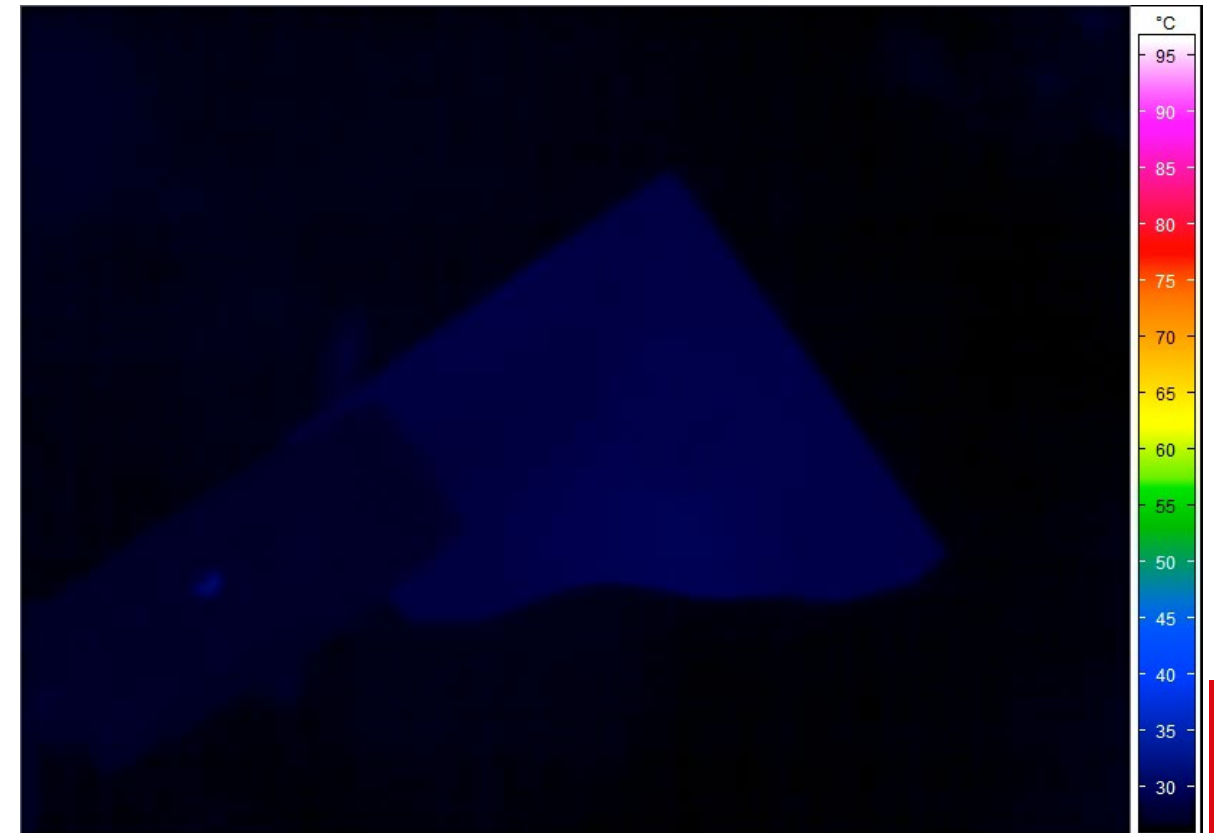
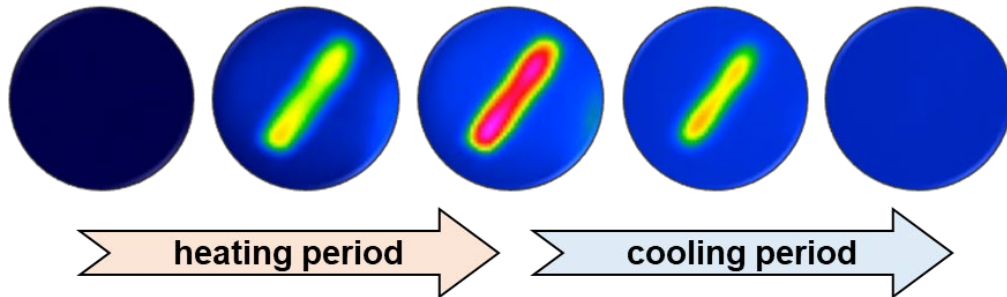


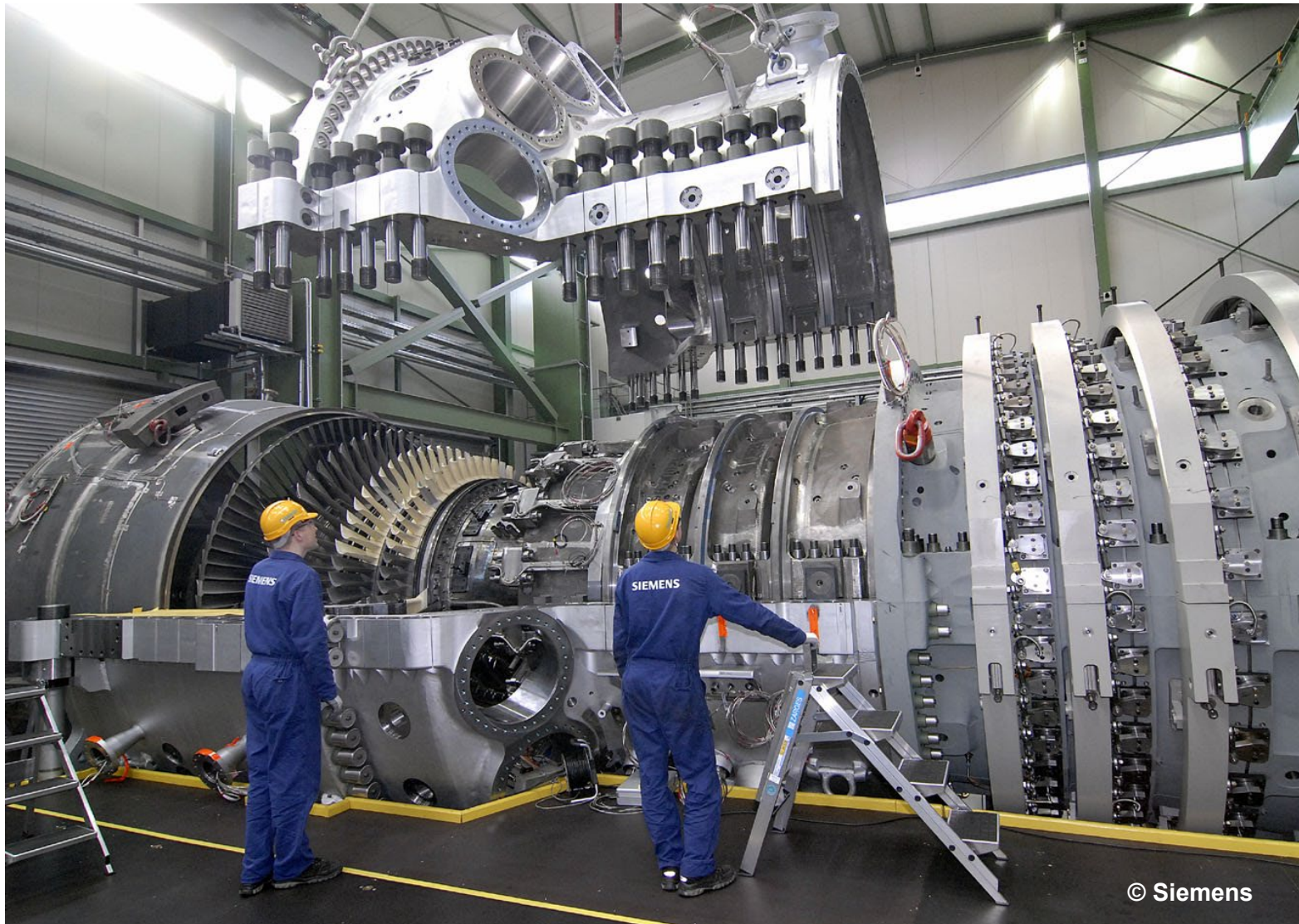
photo of coating-surface



thermographic images

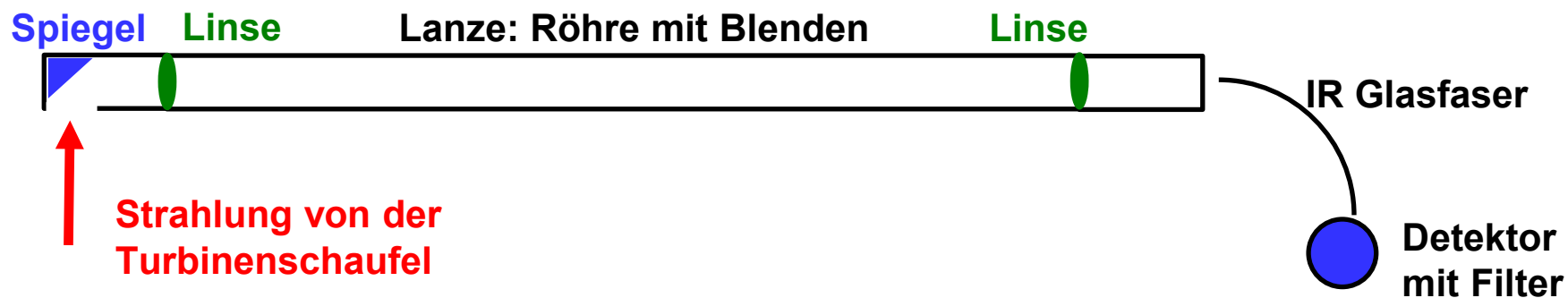


Turbinenschaufeln – Felduntersuchungen

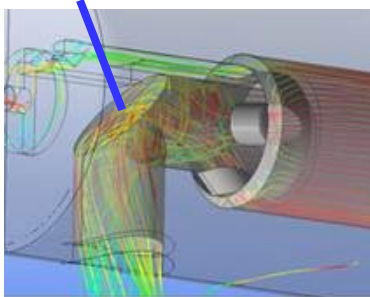


STARGATE LWIR Strahlungsthermometer

Details

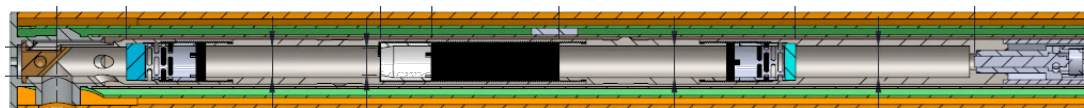


Spiegel

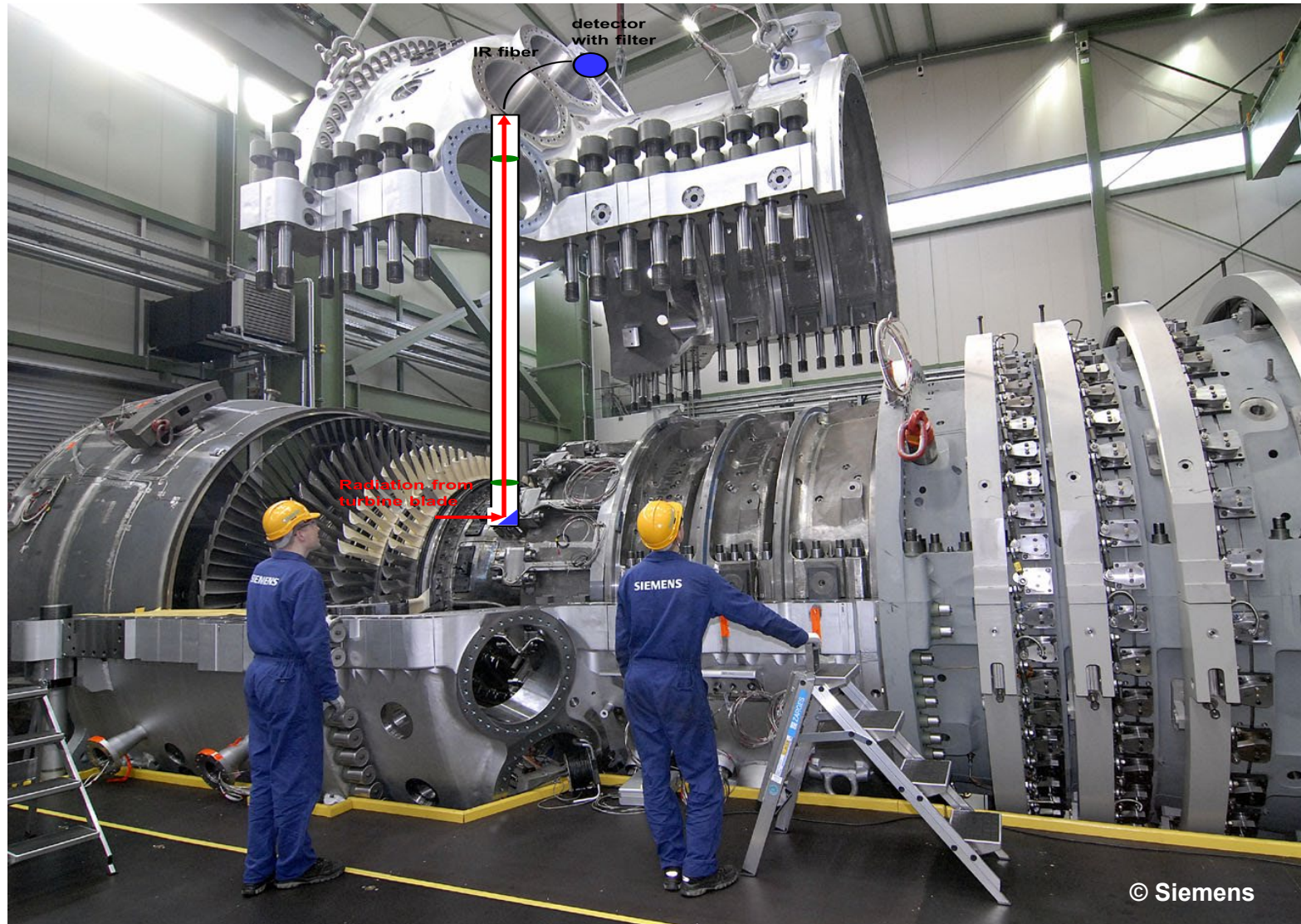


N₂ Spülung

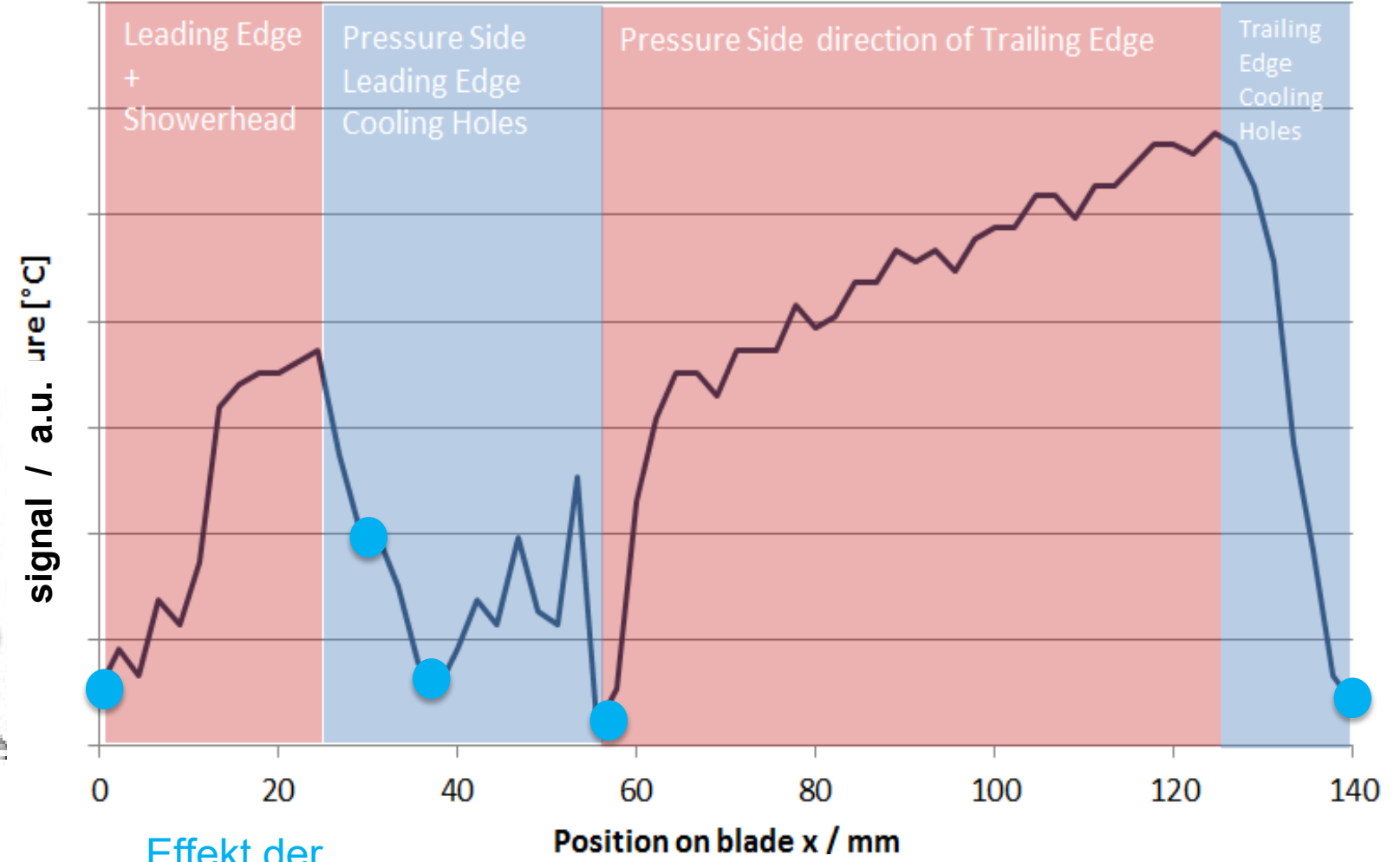
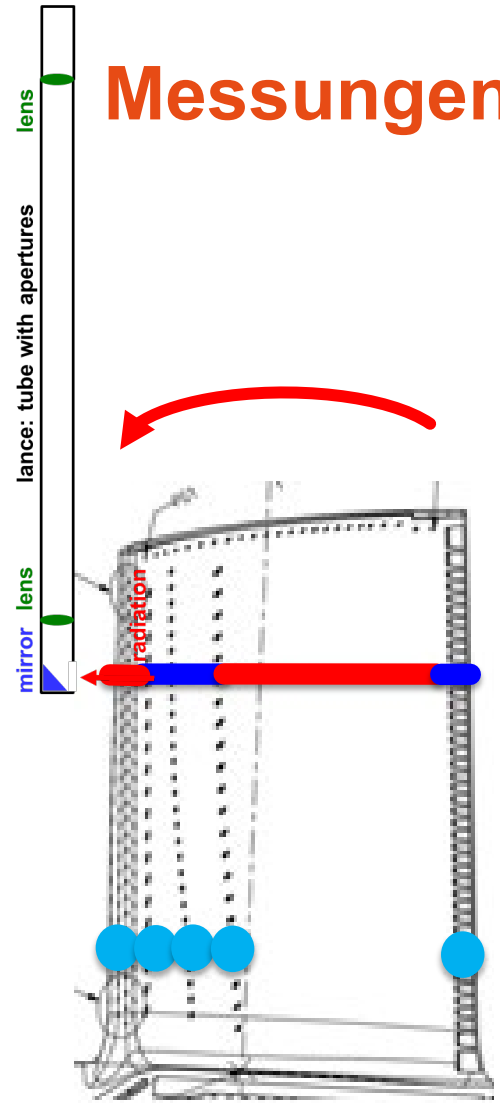
Lanze: Röhre mit Blenden



Turbinenschaufeln – Felduntersuchungen

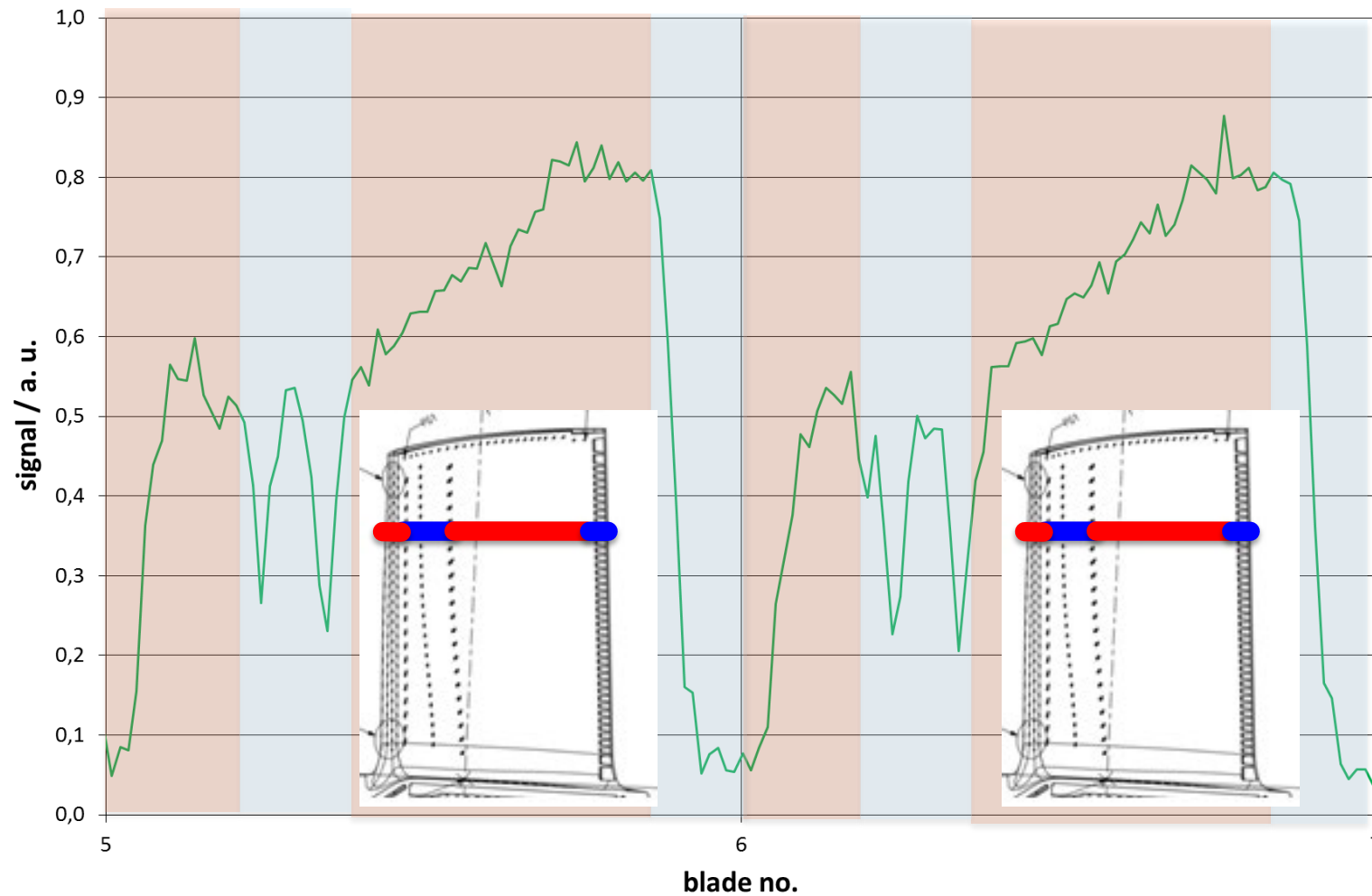


Messungen bei Siemens BTF



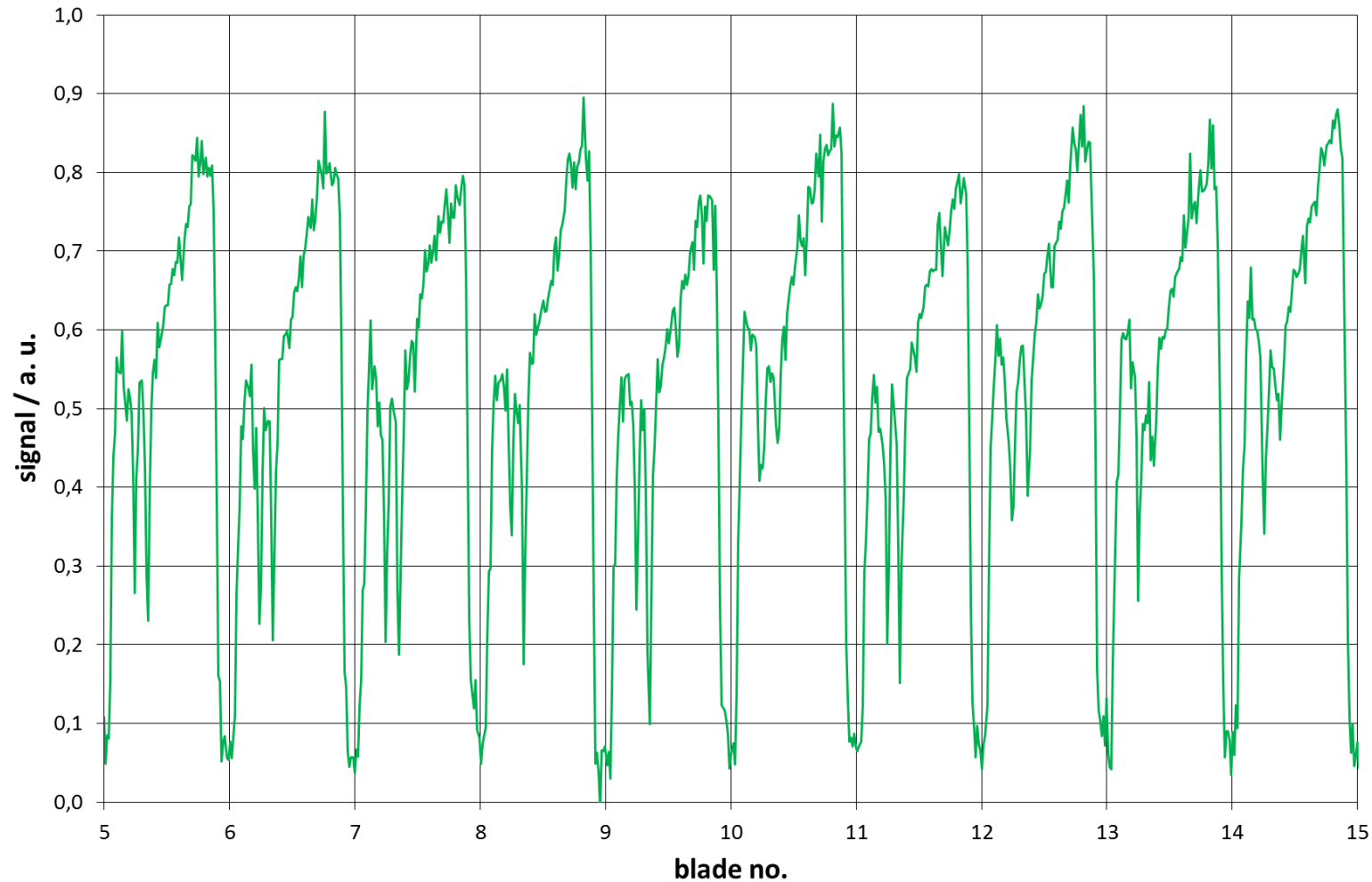
Effekt der
Kühlbohrungen

Messungen bei Siemens BTF



Messungen bei Siemens BTF

Detected and analyzed temperature signal in arbitrary units



Long wavelength infrared radiation thermometry for non-contact temperature measurements in gas turbines

J. Manara^{a,*}, M. Zipf^a, T. Stark^a, M. Arduini^a, H.-P. Ebert^a, A. Tutschke^b, A. Hallam^c, J. Hanspal^c, M. Langley^c, D. Hodge^c, J. Hartmann^d



Zerstörungsfreie Prüfung für die Grand Challenges – wie geht es weiter?

MATERIALS 2030 MANIFESTO

Vision

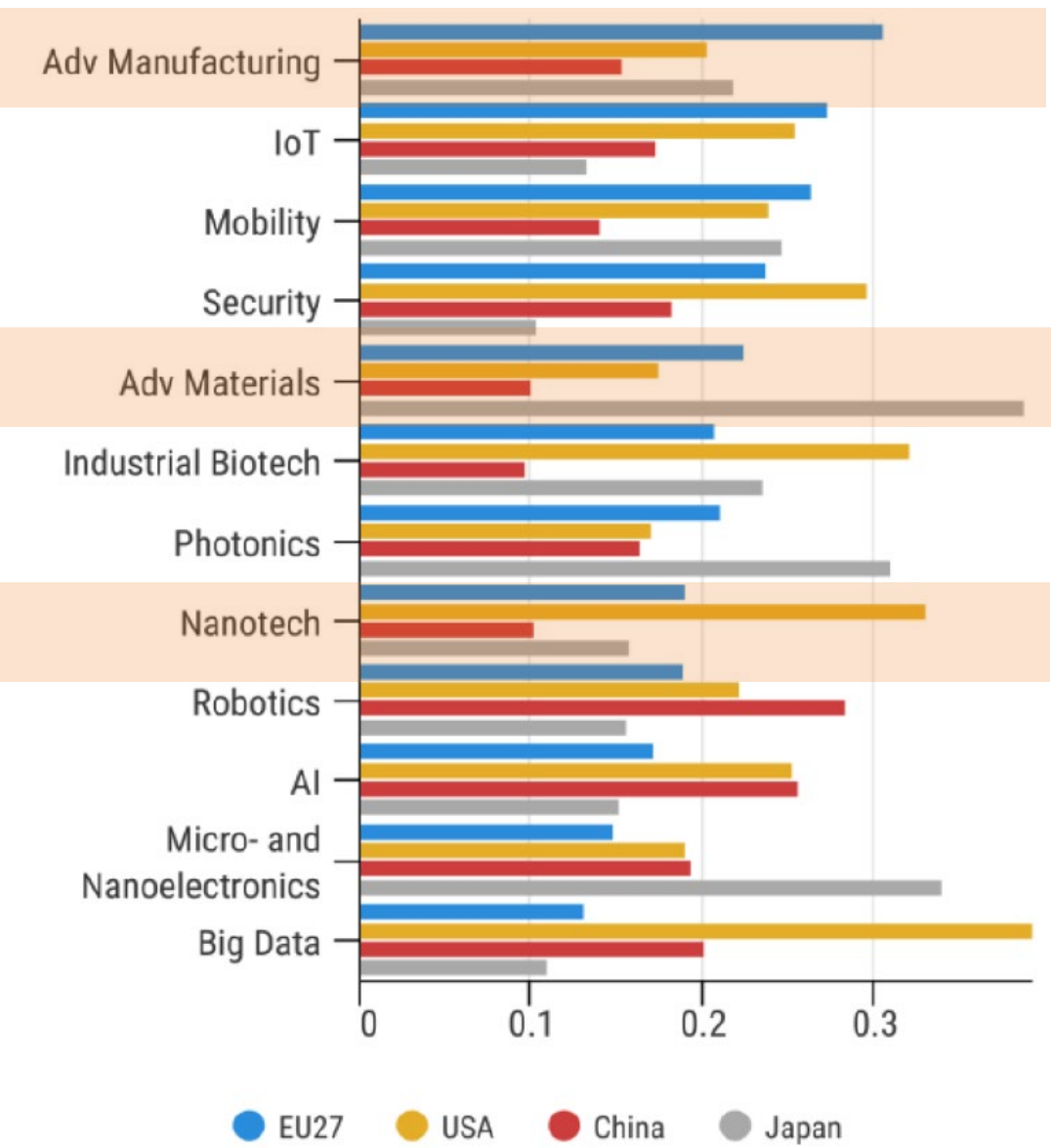
Materials, especially advanced materials, are the backbone and source of prosperity of an industrial society. In the context of the radical transformational changes of the 21st century, it is precisely these advanced materials that will play a decisive role.

Against this background, and based on a roundtable discussion with Mariya Gabriel, European Commissioner for Innovation, Research, Culture, Education and Youth, the undersigned are engaging with the widest possible group of stakeholders to strengthen our collaboration, scale the use of advanced materials, and work towards the following vision:

A strong European Materials ecosystem drives the green and digital transition as well as a sustainable inclusive European society through a systemic collaboration of upstream developers, downstream users and citizens and all stakeholders in between.

*Systemic Approach of Advanced Materials for Prosperity –
A 2030 Perspective* (7 February 2022) <https://manufuture.org/>

MATERIALS 2030 MANIFESTO



*Systemic Approach of Advanced Materials for Prosperity –
A 2030 Perspective* (7 February 2022)

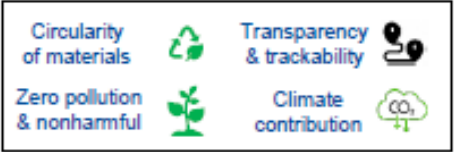
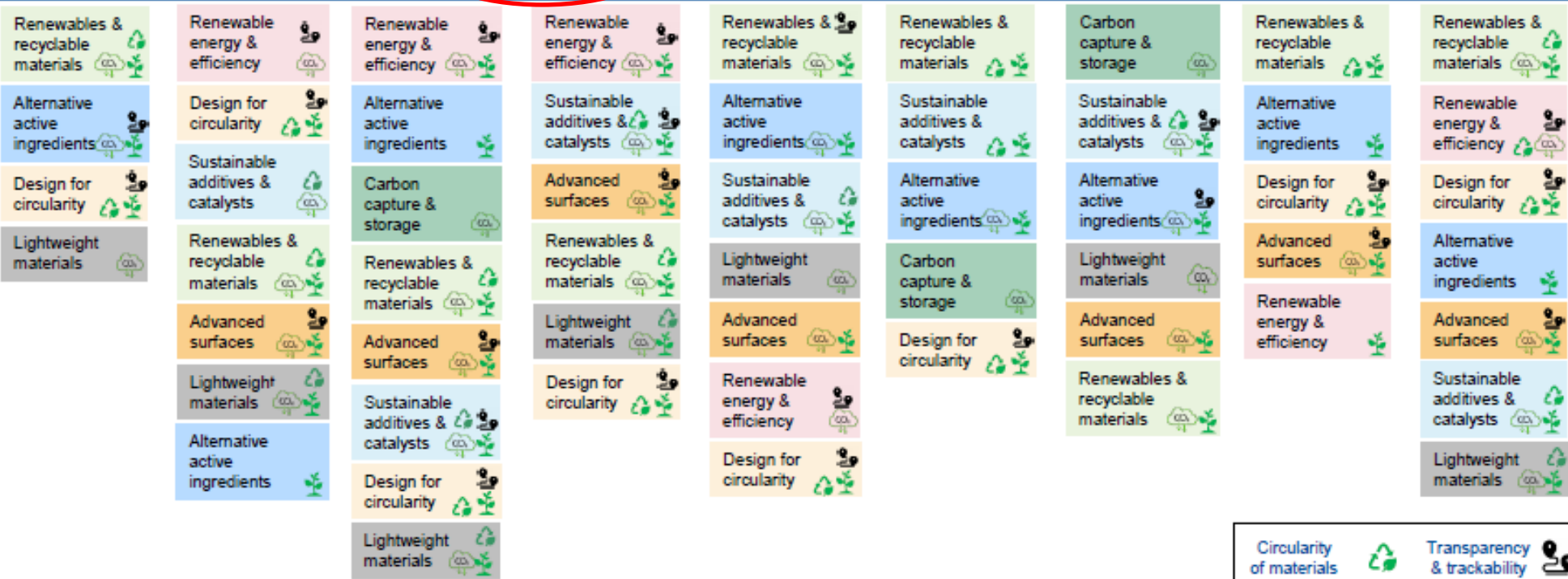
Das Schaubild zeigt eine Rangfolge der Leistungen in den Schlüsseltechnologien in den Bereichen Technologieentwicklung, Gründung von Start-ups und Qualifikationen im Vergleich der EU mit den USA, China und Japan (Quelle: EC SWD (2021) 352).

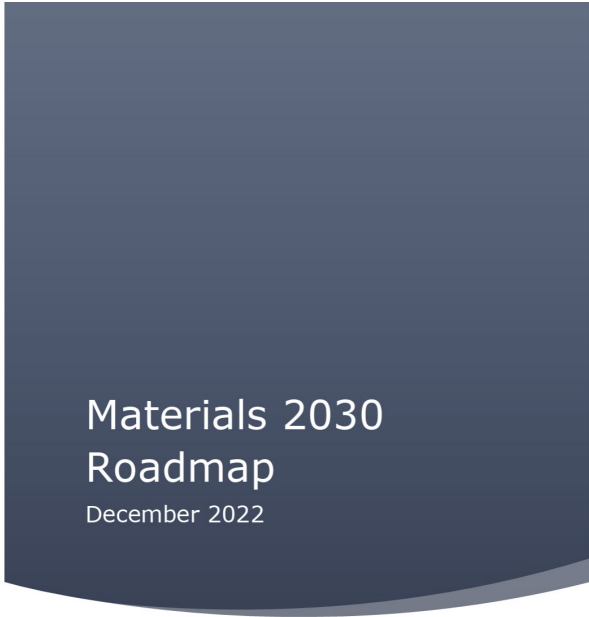
MATERIALS 2030 MANIFESTO



New Technology & Innovation: resources and processes optimization (energy, production, performance increase), materials data, digital twins & passports, big database, AI, blockchain, mass customization, sensing, new biotechnology methods

New Policies: Harmonized norms & standards, certification schemes, Eco-label compliance on all products levels, insure sovereignty & EU autonomy, lifecycle assessment





insbesondere um die vier große Herausforderungen im Bereich der Materialien anzugehen:

- Kreislaufwirtschaft
- Null-Umweltverschmutzung
- Klimaschutzbeitrag
- **Rückführbarkeit..**



As a key milestone towards a unified and sustainable European Materials Initiative, this Materials 2030 Roadmap:

1. considers **digitalisation of materials development** as a major need to accelerate all aspects of materials design and development. It requires new research and development methodologies, merging **computational and experimental materials science** based on modelling, simulation and **high throughput characterisation**. Central to success is reliable and easy access to data. It should allow to design novel materials with a speed unattainable in the usual process of discovery and to control material behaviour;
2. identifies common manufacturing technologies and looks at the conditions for the processing and scale up of new materials, components and products, notably process optimisation, decarbonisation, mass customisation, zero defect production, enhanced multi-materials processing and new processing technologies;
3. identifies priority areas as game changers in the nine innovation markets highlighted in the Materials 2030 Manifesto, addressing the industry and research community needs with expected impacts to improve EU sovereignty, capacity to reduce environmental footprint, and potential to improve sustainability. These priority areas should form the basis for the development of a novel European strategic materials agenda.
4. highlights the importance of an enabling policy framework through harmonised criteria for safe and sustainable by design chemicals and materials, evidence based life-cycle assessments, harmonised norms and standards, robust health and safety protocols as well as targeted education and training actions across the value chains;
5. argues that strong social foundations are essential for the governance where materials stakeholders, industry, designers, trade unions, workers and civil society are involved in the discussions, pushing for the new materials valorisation. It therefore proposes principles for inclusive governance allowing stakeholders to engage in a new form of cooperation.



STRATEGIC MATERIALS AGENDA

April 2023



Angetrieben durch den ökologischen und digitalen Wandel in Europa zielt die Initiative „Advanced Materials 2030“ darauf ab, **einen europaweiten, branchenübergreifenden Beschleuniger für die Konzeption, Entwicklung und Einführung nachhaltiger fortschrittlicher Werkstoffe im Hinblick auf eine Kreislaufwirtschaft einzurichten.**

AMI2030 STRATEGIC MATERIALS AGENDA

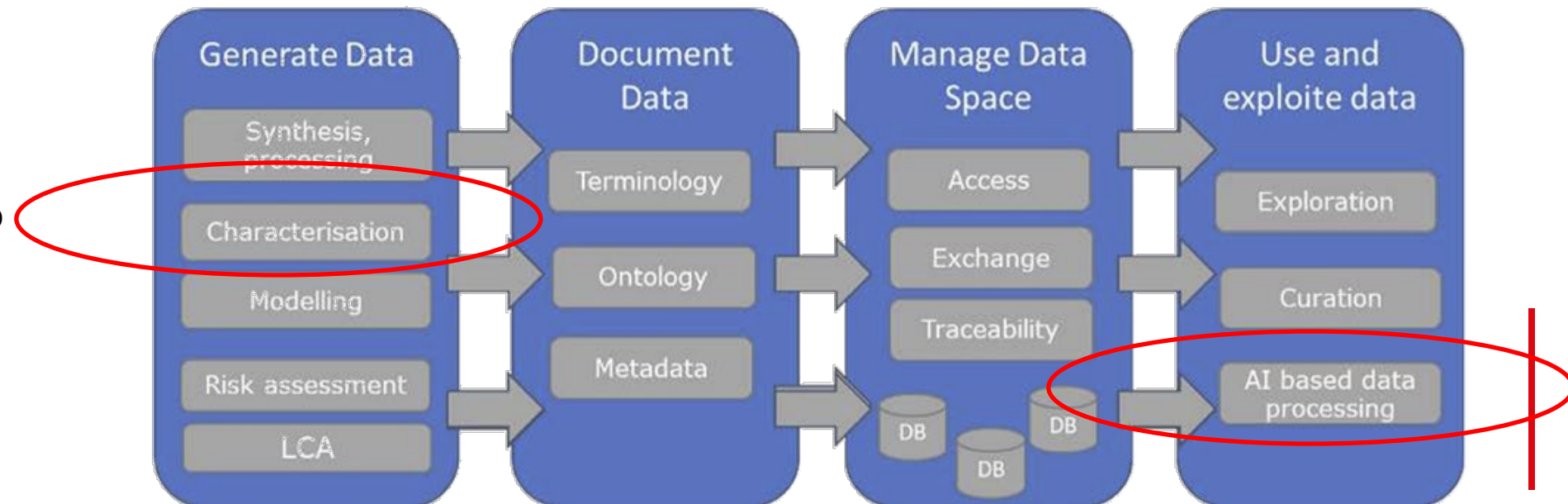


Need for new Advanced Materials

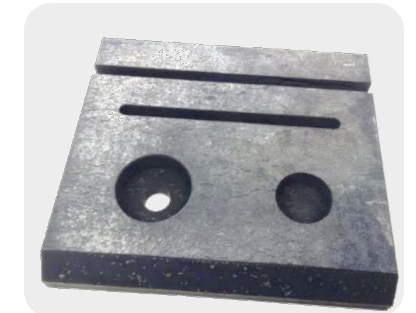
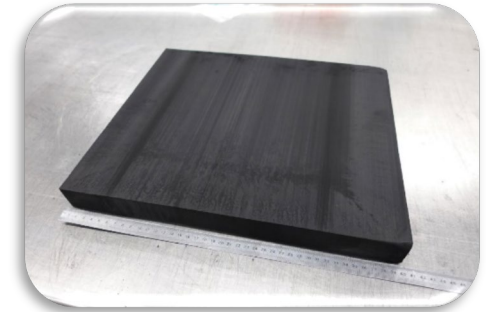
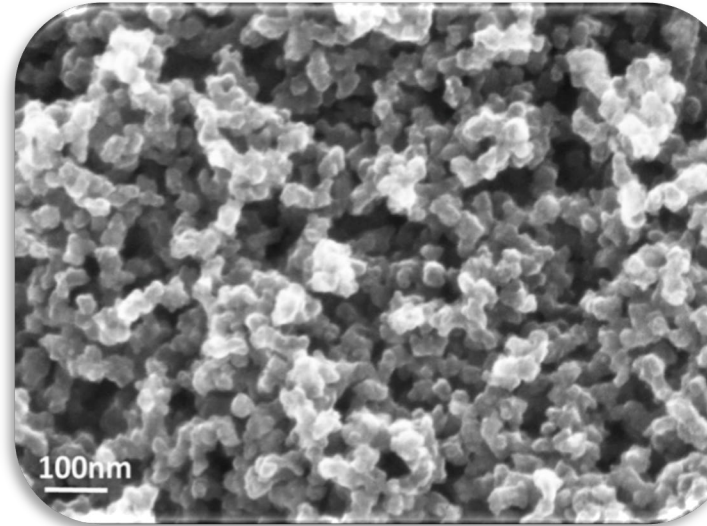
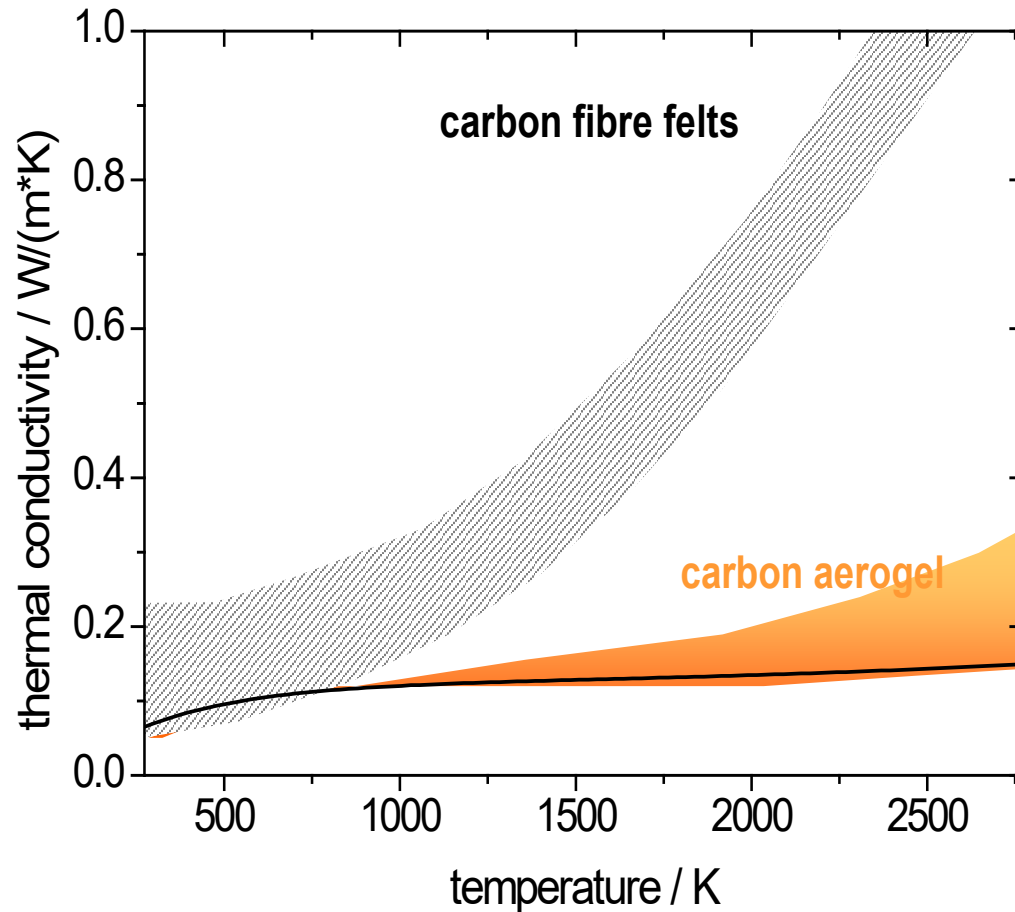
Materials Acceleration Platforms (MAPs): Accelerating Materials Research and Development to Meet Urgent Societal Challenges Adv. Mater. 2024, 36, 2407791, DOI: 10.1002/adma.202407791

1. It is known that climate change impact mitigation strategies, energy resilience and economic prosperity hinge significantly **on Advanced Materials** (AdMats). With 20% of the industrial base and 70% of technical innovations relying on AdMats,
2. Finally, the ecosystem of a MAP depends on a **research community** that nourishes and guides the MAP, provides feedback and leverages the knowledge generated. To date, the feedback alone is not enough to operate a MAP. Even more, **the input provided by human creativity** - which machines do not possess – is indispensable and creates the area of impact for a MAP in the first place.

EU Materials 2030 Roadmap

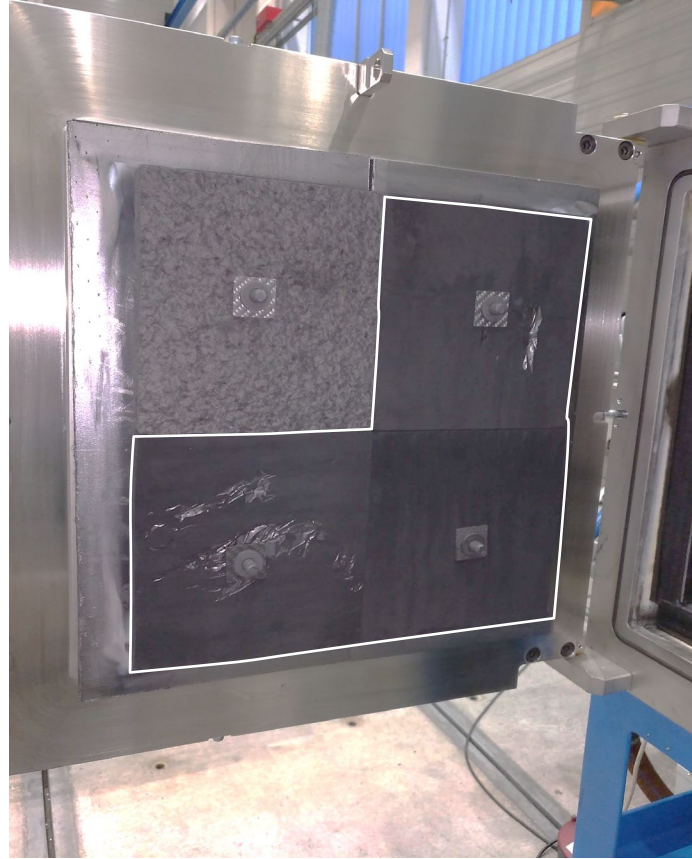


Poröse Kohlenstoffe in Hochtemperaturanwendungen



- **Exzellente Performance bei hohen Temperaturen $> 1000^{\circ}\text{C}$**
- **Effektive Unterdrückung des Strahlungsbeitrags zur Wärmeleitung durch feine Mikrostruktur**

Anwendungsbereich: Hochtemperaturprozesse



Test furnace with carbon xerogel door insulation
© Aerofurnace funded by BMWK, project number 03ET1503 A-C

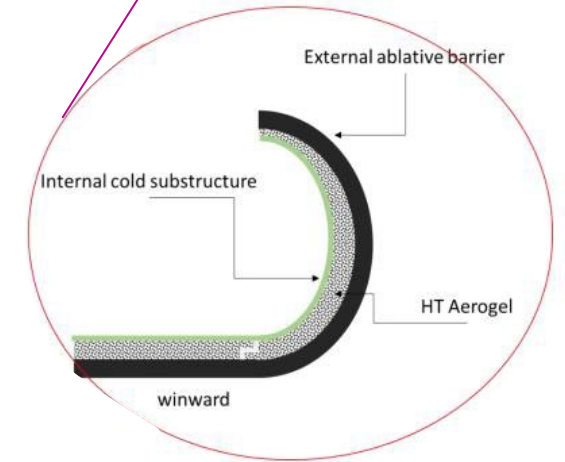
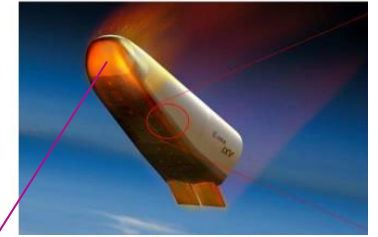
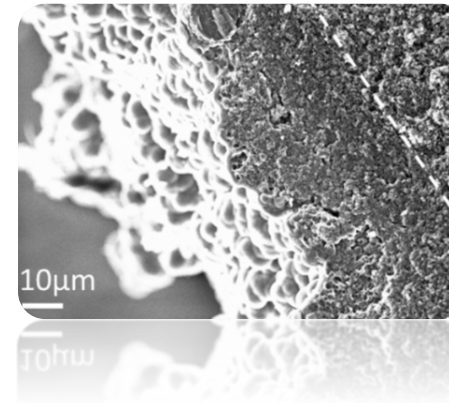
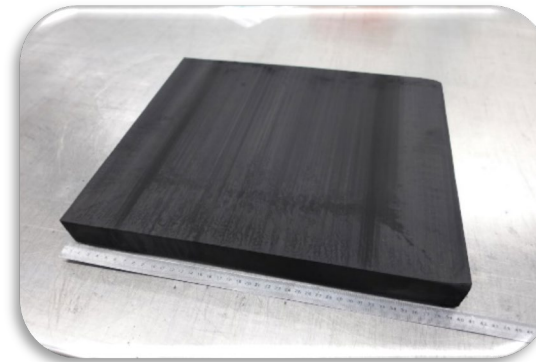


Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action

- **Thermische Isolation für Hochtemperaturprozesse** in nicht-oxidierender Atmosphäre, z.B. HT-Öfen
- **Reduzierter Energieverbrauch** durch bessere thermische Performance
- Ermöglicht **Gewinn von Prozessvolumen** durch dünnere Isolationsschichten
- **Exzellent für räumlich begrenzte Anwendungen**

Anwendungsbereich: Hitzeschutz in der Raumfahrt

- Faserverstärkte Hitzeschutzplatten zur thermischen Isolation der metallischen Strukturen bei Re-entry-Raumfahrzeugen
- **Funktionale Einsatzanforderungen:**
 - Temperaturbereich: **-25 °C – 2200 °C**
 - Wärmeleitfähigkeit:
< 0.5 W/(m·K) @2200 °C
 - Geringe Dichte: **~250 kg/m³**
 - Mechanische **Belastbarkeit**
 - Versiegelung der Oberfläche durch Beschichtungstechnik
- **Faserverstärktes Kohlenstoff-Xerogel**



© ArianeGroup



**Funded by
the European Union**

Die Energiewende benötigt neue Materialien

Energy transition needs new materials

SCIENCE, 16 May 2024, Vol 384, Issue 6697, p. 713

Chad A. Mirkin, Edward H. Sargent, and Daniel P. Schrag

DOI: 10.1126/science.adq3799

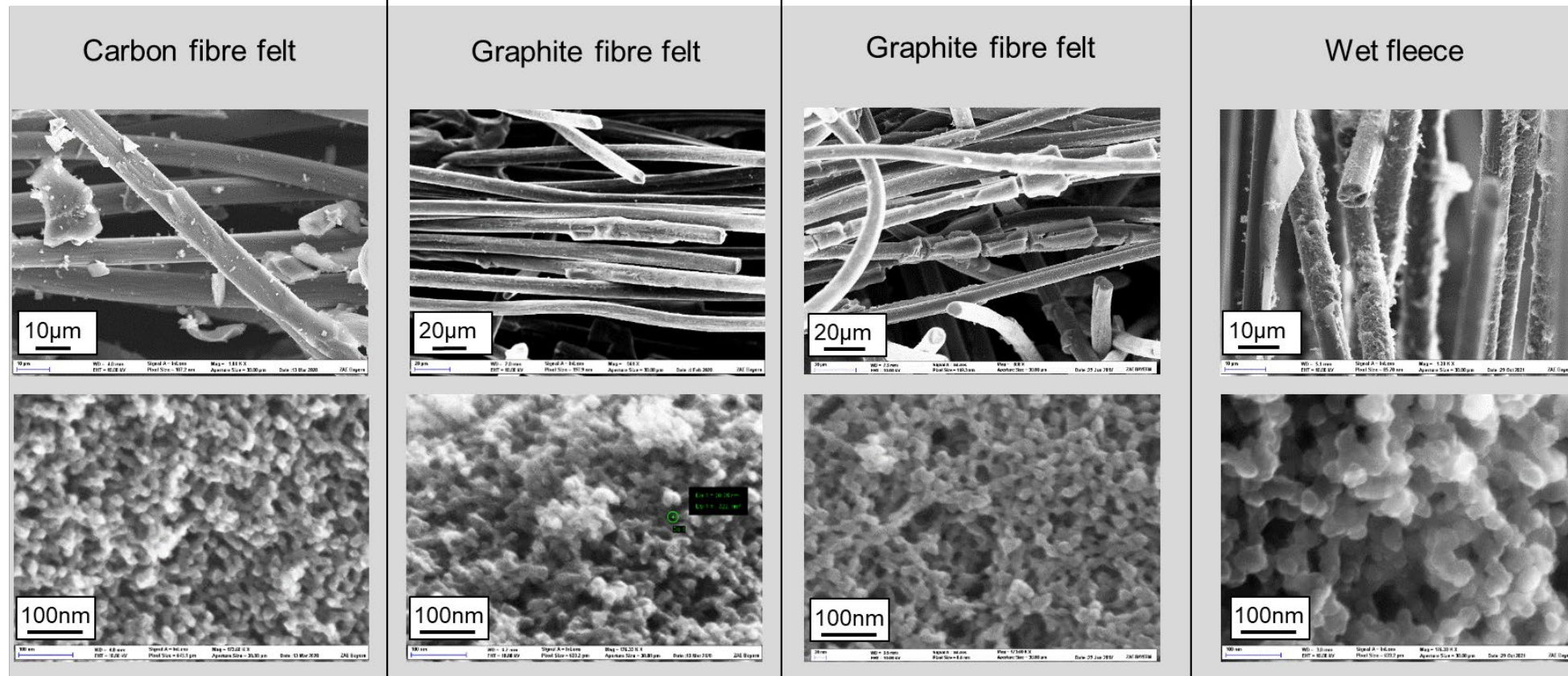


SCIENCE

VOLUME 384 | ISSUE 6697 | 17 MAY 2024

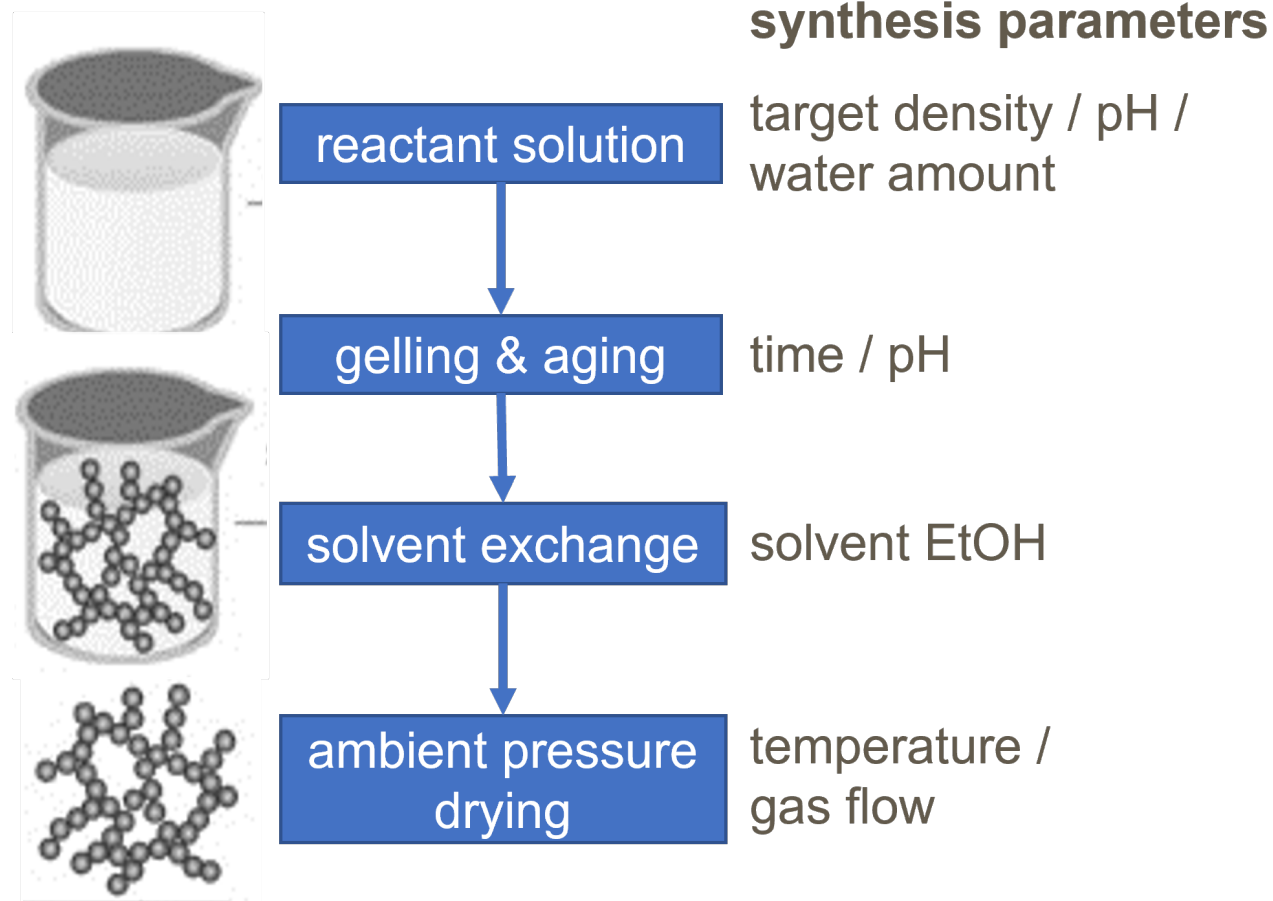
1. To expedite discovery, accelerating the synthesis and testing of candidate materials is vital. One approach involves creating “megalibraries,” microchips designed to simultaneously test millions of positionally encoded materials, generating vast amounts of data on material properties. These data should guide the identification of new technology-enabling materials. By learning from these datasets, artificial intelligence should predict promising material compositions faster than human researchers could through traditional experimentation.
2. Another component of a materials revolution is talent. Scientists, from students to researchers, must become sufficiently familiar with physics, chemistry, materials science, engineering, and computer science. This will require a new approach to education.
3. To achieve this acceleration in materials discovery, investment from industry is vital. Government support will continue to play a role, but private sector involvement is necessary to scale breakthroughs from the lab to commercialization. Establishing new kinds of partnerships between academia, industry, and government should be created that drive both innovation and deployment.

Anwendungsbereich: elektrochemische Speicher



- Oberflächenmodifikation mit Kohlenstoff-Aerogel von gängigen Faser-Filzen und -Vliesen
- Erhöhung der effektiven Oberfläche: z.B. in Elektrodenmaterialien

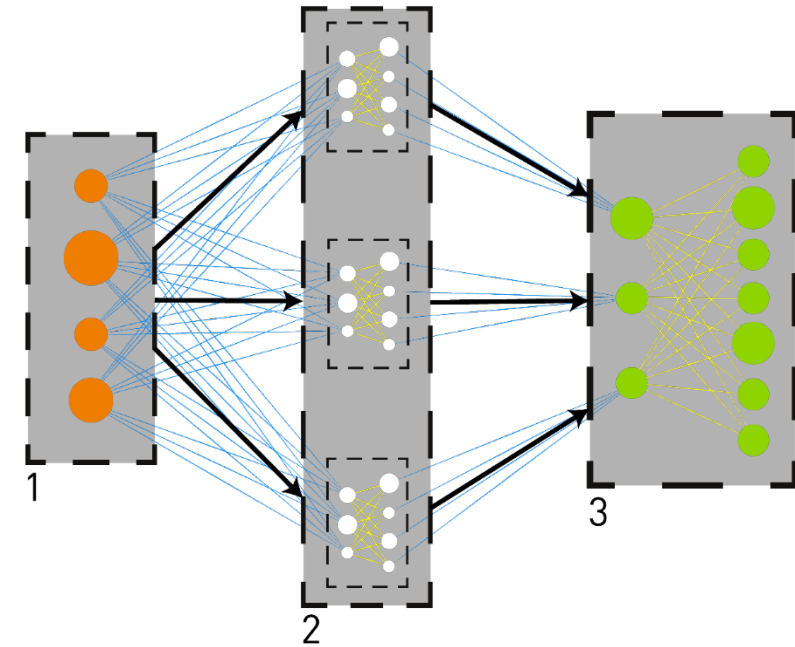
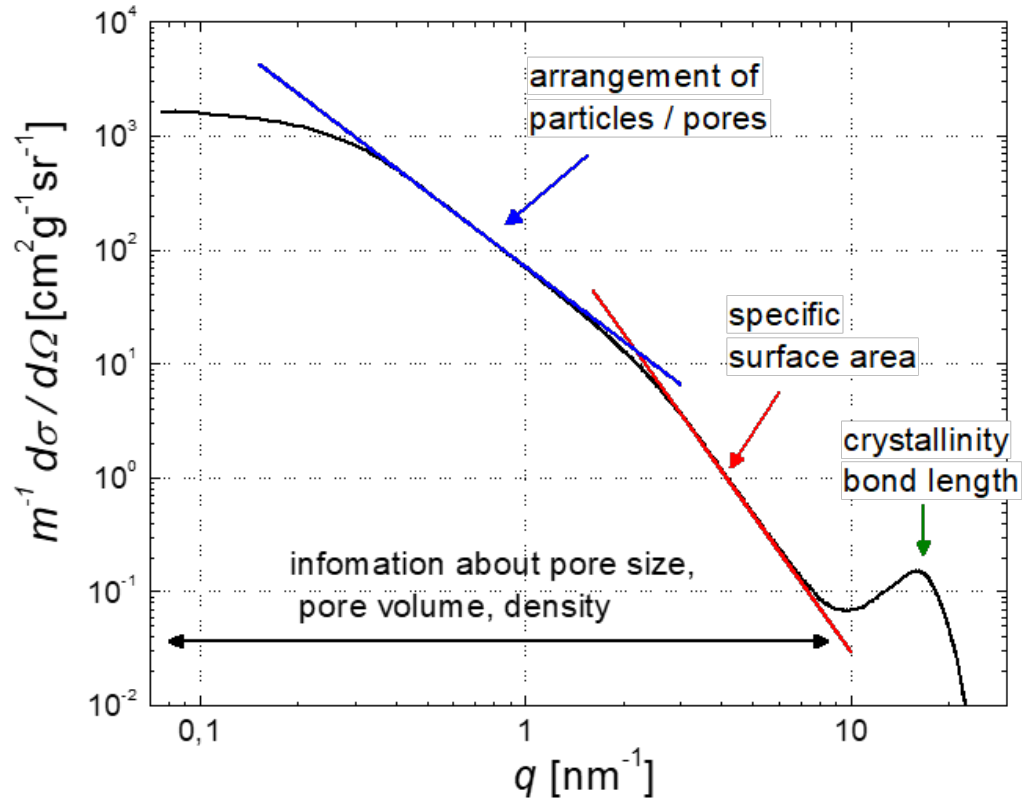
Entwicklung Si-basierter Anoden mit SAXS und KI



Design of Experiments:

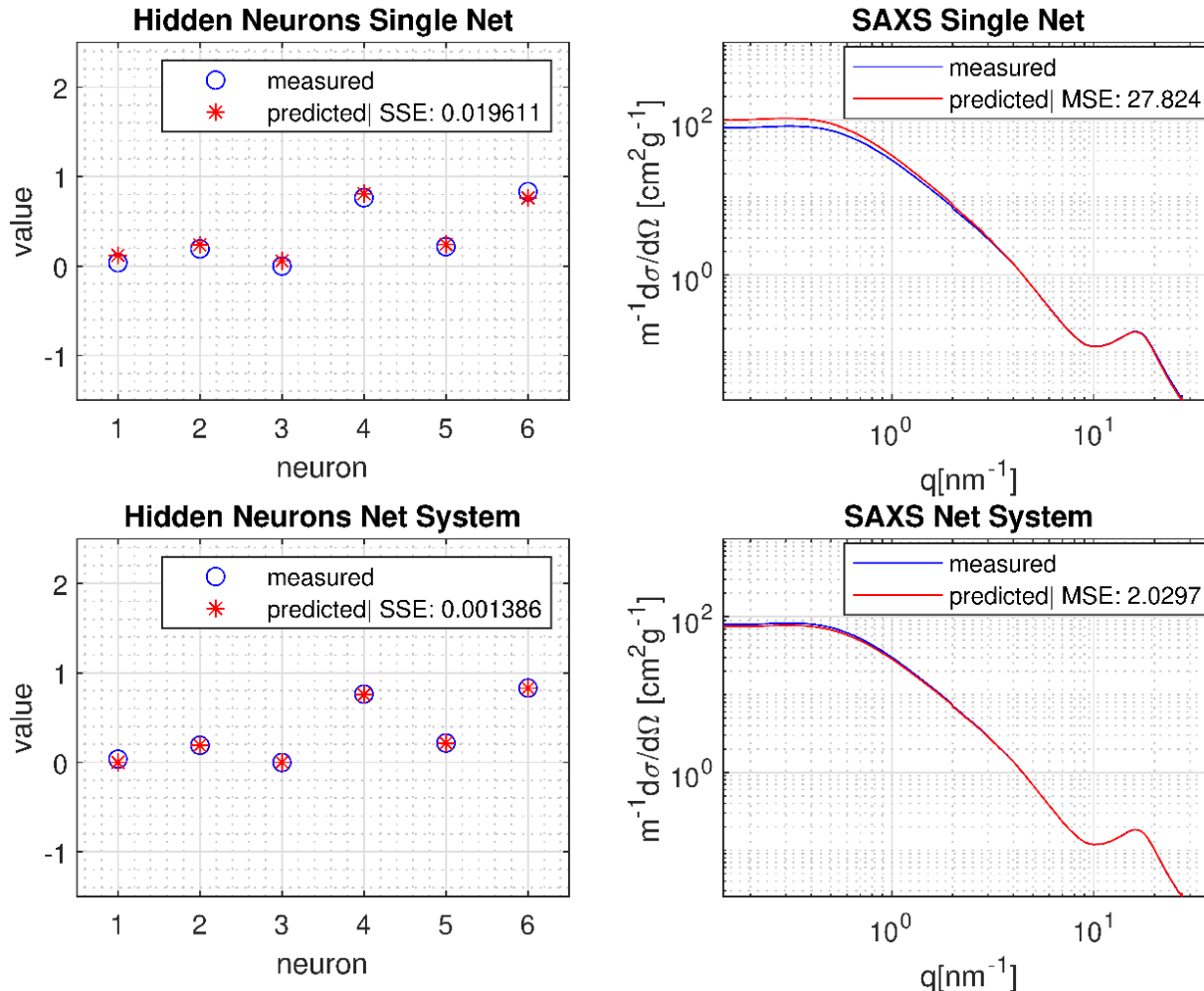
- 7 Faktoren (Syntheseparameter)
- 2 Level (min, max)
- Zwiebelmodell statt vollfaktorielles Design
- 50 Variationen

Entwicklung Si-basierter Anoden mit SAXS und KI



- Struktureller Fingerprint mit Röntgenkleinwinkelstreuung (SAXS)
- Machine Learning mit mehreren FFNs (Feedforward Neural Network)

Entwicklung Si-basierter Anoden mit SAXS und KI



6 Neuronen – Vergleich
Single Net vs. Net System

→ Erfolgreiche Vorhersage mit Machine Learning (ML) von Streukurven (SAXS) und struktureller Parameter poröser SiO₂-Matrixmaterialien anhand der Syntheseparameter (Verwendung in Si-Anoden)

Entwicklung Si-basierter Anoden mit SAXS und KI

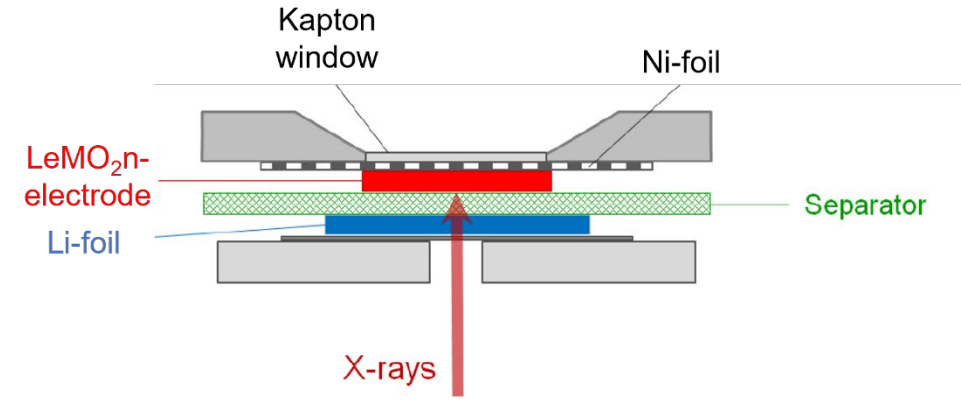
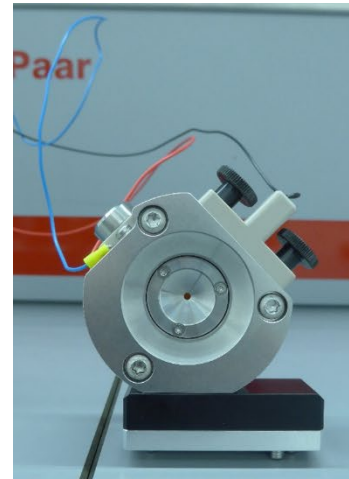
In-operando SAXS

Charakterisierung der Elektrode während des Lade- und Entladevorgangs

Ziel:

Detektion von Degradationsmechanismen auf mikroskopischer Ebene bei

- Formierung (1. Ladezyklus)
- Zyklierung der Elektrode



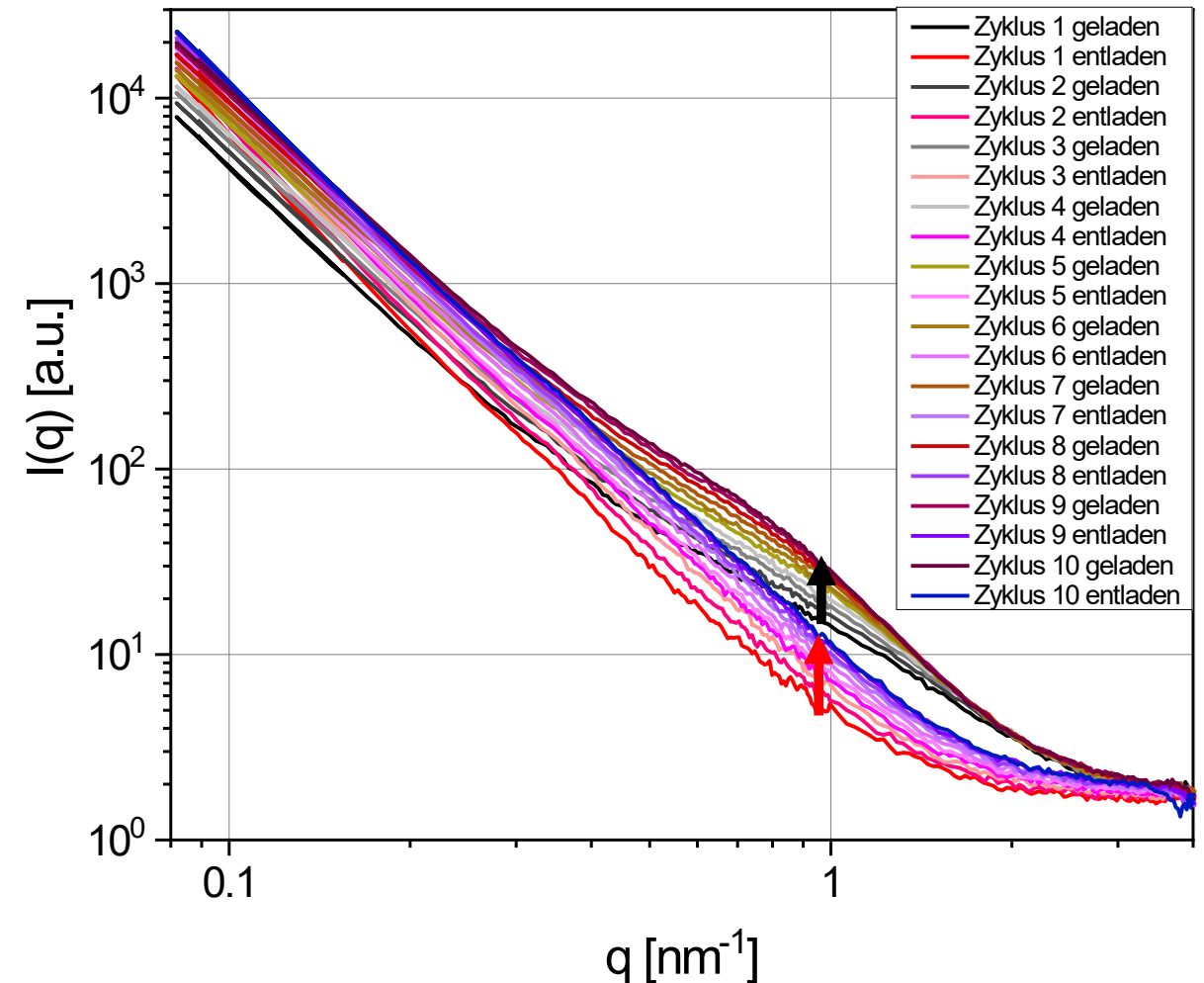
SAXS-Messzelle für elektrochemische Untersuchungen am CAE

Entwicklung Si-basierter Anoden mit SAXS und KI

In-operando-SAXS

- geladener Zustand klar von entladenen Kurven zu unterscheiden: Quell- (geladen) und Kontraktionsverhalten (entladen)
- kontinuierlicher Anstieg der Streuintensität mit zunehmender Zyklenzahl
- irreversible Änderung der Strukturen auf der Nanoskala (zunehmende Zerkleinerung des Aktivmaterials)

Informationen zu Degradationsmechanismen auf der Nanoskala ermöglicht die Entwicklung von Gegenmaßnahmen um die technischen Eigenschaften von Batterien zu verbessern.



KI in der Materialanalytik: Projekt GIPScycle - circularity

➤ Problemstellung: Recycling von Gips aus Bauabfällen

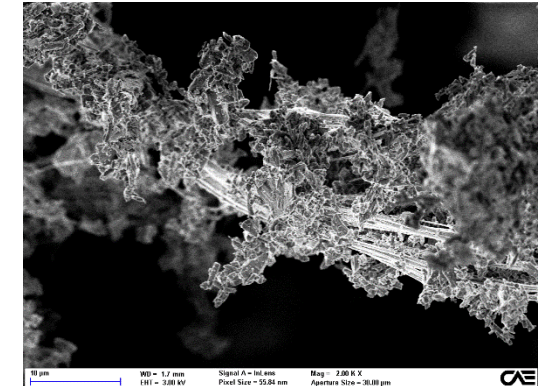
- Wegfall von REA-Gips aus Kohleverstromung
- Dennoch weiterhin hoher Bedarf! -> Recycling aus Rückbauprojekten?



Mögliche Belastung des RC-Gips durch Mineralfasern (z.B. Asbest)

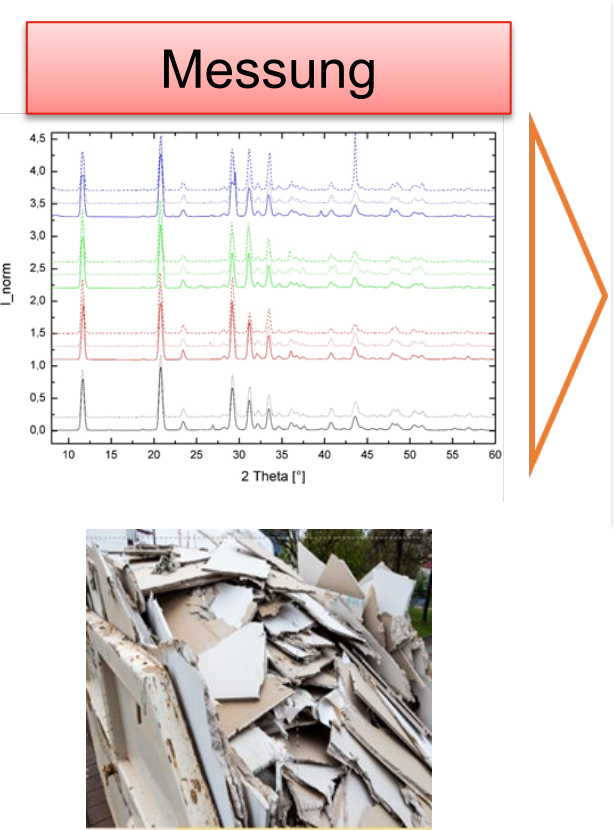
- Schon geringe Mengen ($< 0,1 \text{ M\%}$) kritisch!
- nur sehr aufwändig Nachweisbar -> **Deponierung**

➤ Entwicklung eines präzisen und automatisierbaren Analyseverfahrens unter Einsatz von künstlicher Intelligenz



KI in der Materialanalytik: Projekt GIPScycle - circularity

KI-gestütztes Charakterisierungsverfahren für umweltverträgliches Recycling von Gips aus Bauabfällen



- **Materialforschung und -entwicklung sind unerlässlich, um die großen Herausforderungen zu bewältigen.**
- **Zerstörungsfreie Prüfungen (in vitro und in vivo) sind unerlässlich, um diese neuen Materialien anzuwenden.**
- **KI unterstützt die Auswertung und Interpretation von Versuchsdaten.**
- **KI kann die Datenauswertung verbessern und anhand der Daten Vorschläge für neue Materialkombinationen unterbreiten.**

Wichtige Trends in der zerstörungsfreien Prüfung

- KI und maschinelles Lernen
- Multimodale/hybride Prüfungen
- Digitale Zwillinge und Industrie 4.0
- Robotik und Ferninspektion
- Fortschrittliche Sensoren (Quantensensoren/Terahertz)
- Nachhaltigkeit in der zerstörungsfreien Prüfung
- Big Data und Standardisierung

- KI/ML revolutionieren die Fehlererkennung, Klassifizierung und vorausschauende Wartung und reduzieren die Abhängigkeit von menschlichen Bedienern.
- Deep Learning, einschließlich 3D-Faltungsneuronalen Netzen, eignet sich hervorragend für die volumetrische Datenanalyse, wie z. B. radiografische und ultraschallbasierte Bildgebung.
- Der Bereich entwickelt sich in Richtung automatisierter ultraschallbasierter zerstörungsfreier Prüfung (NDE) unter Verwendung von Deep Learning für Aufgaben von der Fehlererkennung bis zur Charakterisierung.

→ Modelle für vorausschauende Wartung

Multimodale & Hybrid Systems

- Kombination von z. B. Ultraschall + Infrarot + Mikrowelle + Radiographie
- Kreuzvalidierung reduziert Fehlalarme/Fehlinterpretationen
- Die Integration mehrerer zerstörungsfreier Prüfverfahren (z. B. UT, PAUT, Infrarot-Thermografie, Mikrowellenprüfung) in einheitliche Systeme ermöglicht eine umfassende Inspektion, Kreuzvalidierung und präzise Fehlerlokalisierung.

→ Entscheidend für Verbundwerkstoffe und mehrschichtige Strukturen (funktionale Materialien)

- **Virtuelle Nachbildung der Anlage**
- **Integriert Echtzeit-NDT-Daten → Vor-Ort-Prüfung**
- **Prognostiziert die verbleibende Nutzungsdauer**

→ Ermöglicht AR/VR-Schulungen

Robotics & Remote Inspection

- **Drohnen für Brücken und Pipelines**
- **Crawler für beengte Räume**
- **5G für Echtzeitsteuerung**

→ In-situ-Überwachung kritischer Infrastrukturen

- **Quantensensoren für höhere Empfindlichkeit**
- **Terahertz-Bildgebung für Verbundwerkstoffe und Beschichtungen**
- **Eingebettete Glasfaser- und MEMS-Sensoren**

→ **MEMS- oder RFID-Sensoren, die direkt durch additive Fertigung implementiert werden**

Nachhaltigkeit in der zerstörungsfreien Prüfung



- **Umweltfreundliche Tests: energiesparend, abfallarm**
- **Reduzierte Schadstoffe**
- **Verlängerung der Lebensdauer von Anlagen = Nachhaltigkeitseffekt**

Big Data und Standardisierung

- **Datenflut erfordert Analysen**
- **Offene Formate: .nde (HDF5/JSON)**
- **Interoperabilität für KI und digitale Zwillinge**

→ Standardisierung ist notwendig

NDT-Trends mit Grand Challenges verknüpfen

- **Komplexe Materialien und Strukturen**
→ Behandelt mittels multimodaler zerstörungsfreier Prüfung, KI, Terahertz und Quantensensorik.
- **Fernüberwachung und kontinuierliche Überwachung**
→ Ermöglicht durch Robotik, eingebettete Sensoren, digitale Zwillinge und 5G-Konnektivität.
- **Prüfgenauigkeit und Bedienersicherheit**
→ Erreicht durch KI-gestützte Automatisierung, digitale Zwillinge, AR-Schulungen und Fernsteuerung.
- **Nachhaltigkeitsanforderungen**
→ Durchgrüne NDT-Methoden und ökologische Designentscheidungen angegangen.
- **Datenmanagement und Einhaltung gesetzlicher Vorschriften**
→ Erleichtert durch offene Datenformate und Analyse-Frameworks, Standardisierung.

- **Materialforschung und -entwicklung sind unerlässlich, um die Grand Challenges zu bewältigen.**
- **NDT wird intelligent, integriert und nachhaltig.**
- **Zusammenarbeit ist entscheidend.**
- **NDT-Innovationen gewährleisten Sicherheit, Leistung und Nachhaltigkeit.**

Zusammenfassung

- **Materialforschung und damit auch Zerstörungsfreie Prüfung ist existentiell**
– nicht nur – für die Energiewende
- **KI unterstützt bei der Auswertung und Interpretation der experimentellen Daten**
- **KI kann aus gewonnenen Daten Vorschläge für neue Materialkombinationen machen**

Praktische Laborexperimente und insbesondere

die Expertise und die Kreativität unserer Wissenschaftenden

sind auch in Zukunft unabdingbar



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Kontakt:
Prof. Dr. Jürgen Hartmann
Tel.: +49 (0) 931 70564-335
juergen.hartmann@cae-zeroarbon.de