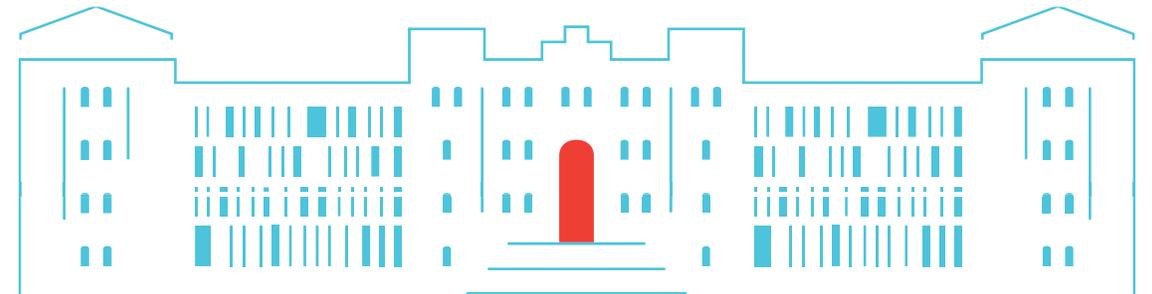
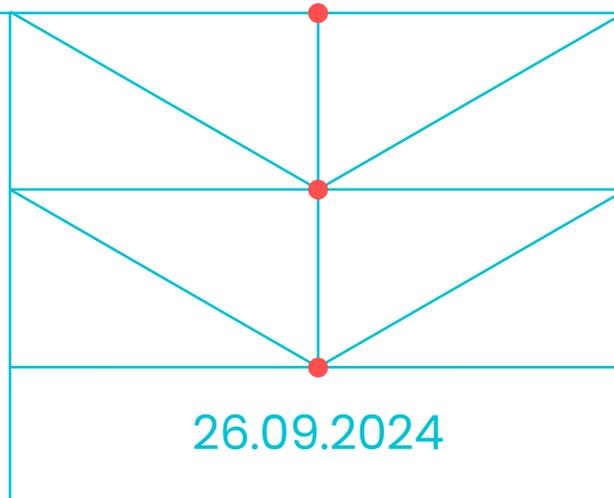


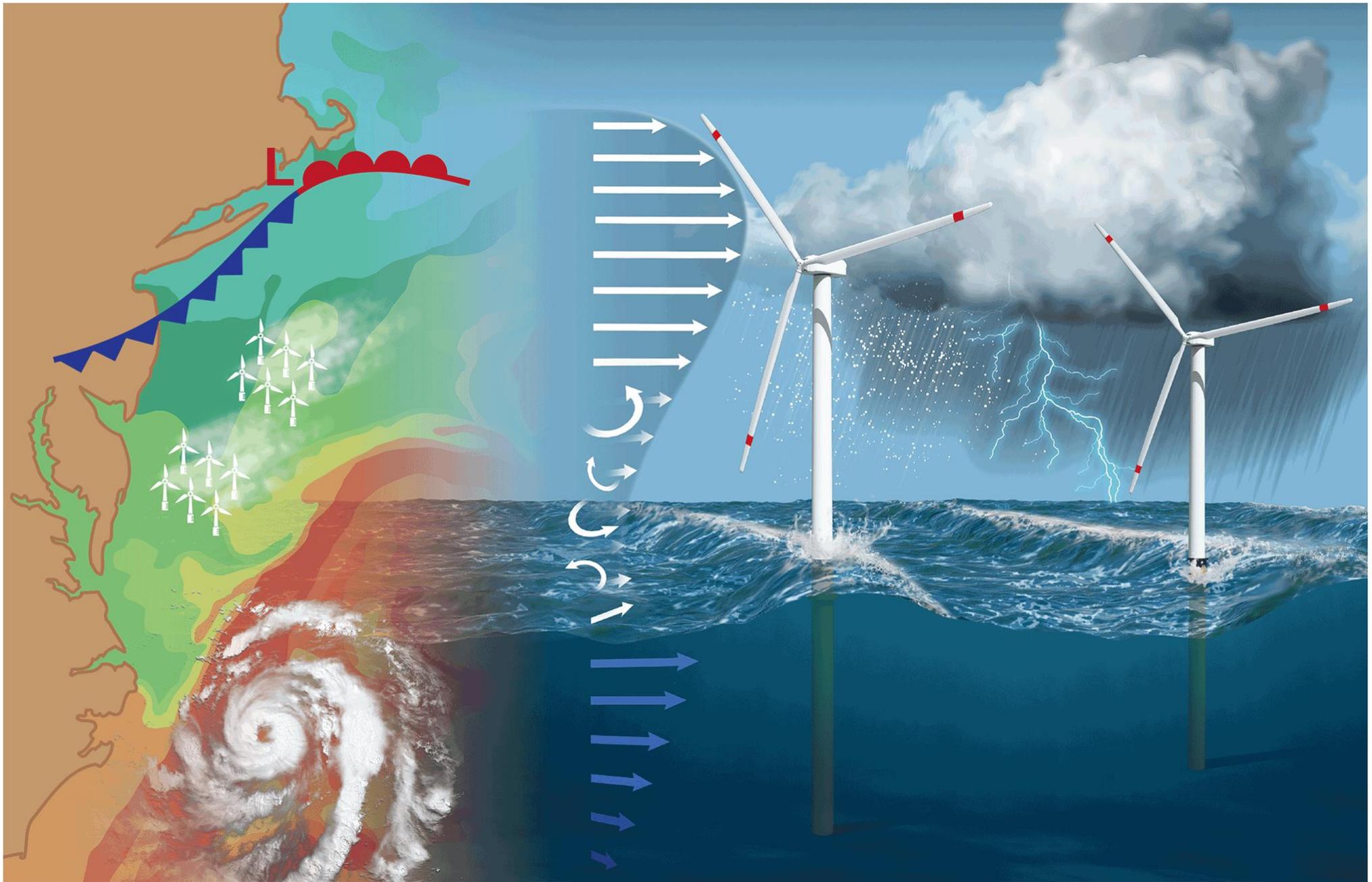


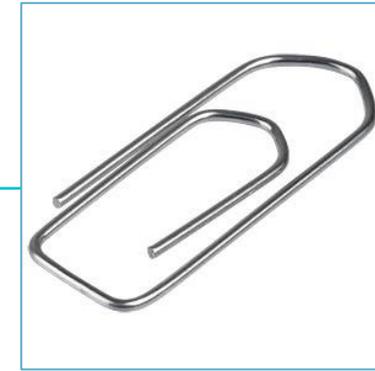
Verknüpfung von Nano mit Makro – Chancen für den Stahlbau

TUHH
Technische
Universität
Hamburg

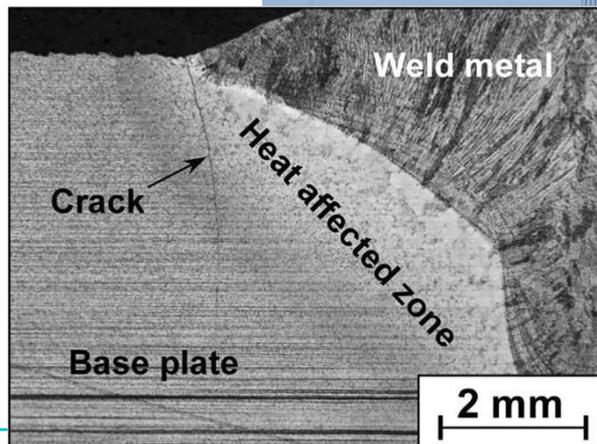


Institut für Metall- und Verbundbau
Prof. Dr.-Ing. habil. Marcus Rutner





- Analogie Mensch-Struktur
- **Materialermüdung:** Ausgelöst durch lokal auftretende zyklische Dehnungen infolge von zyklischen Belastungen
- **Verbindungen** sind verwundbar
- Materialermüdung tritt in allen zyklisch belasteten Strukturen auf
- **Technologieansätze** → keine Lösung
- Ursache für **Infrastrukturkrise**





... bis spätestens 2045 wollen wir in Deutschland klimaneutral leben und wirtschaften...

... Windenergie- und Photovoltaikanlagen werden in Deutschland auch weiterhin das Rückgrat der Stromerzeugung bilden....

8. Energieforschungsprogramm des BMWK, Oktober 2023

Mission Energiesystem 2045

Programmziel 3

Resilienz und Versorgungssicherheit im Energiesystem sicherstellen

„Mithilfe von Szenarioanalysen sollen Vulnerabilitäten im Energiesystem aufgedeckt werden, die die Resilienz des Energiesystems gefährden...“

Programmziel 4

Nachhaltigkeit im Energiesystem erhöhen:

„Nachhaltigkeit ist neben Effizienz und Resilienz eine der zentralen Anforderungen im zukünftigen Energiesystem....“

Quelle: 8. Energieforschungsprogramm des BMWK, Oktober 2023



Steelwind Nordenham GmbH, 10.07.2023

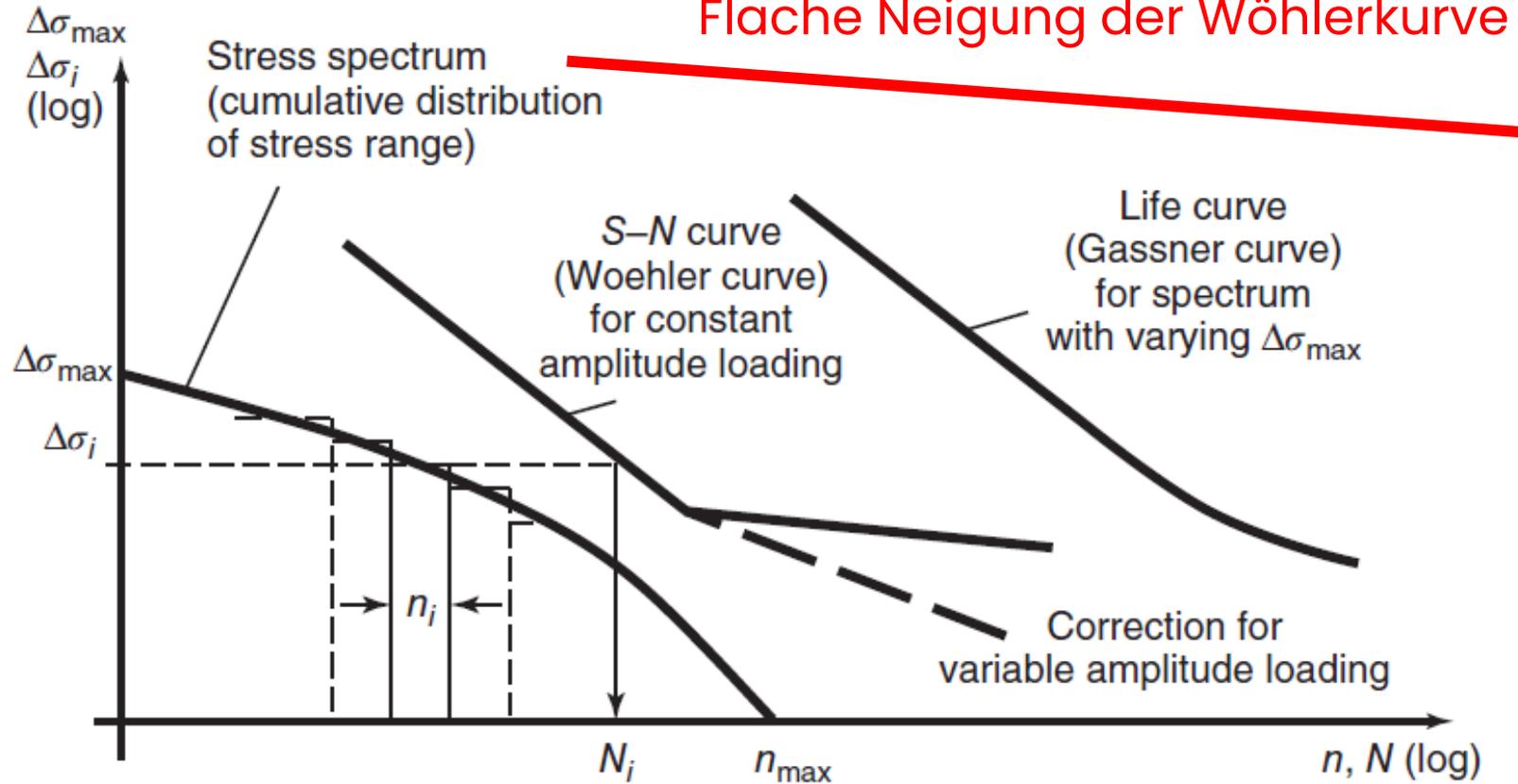
Onshore-Branche bis letzter Bestandteil in der Herstellung etabliert

Schwachstelle Schweißnaht

Wie kann man die Schwachstelle Schweißnaht schützen?

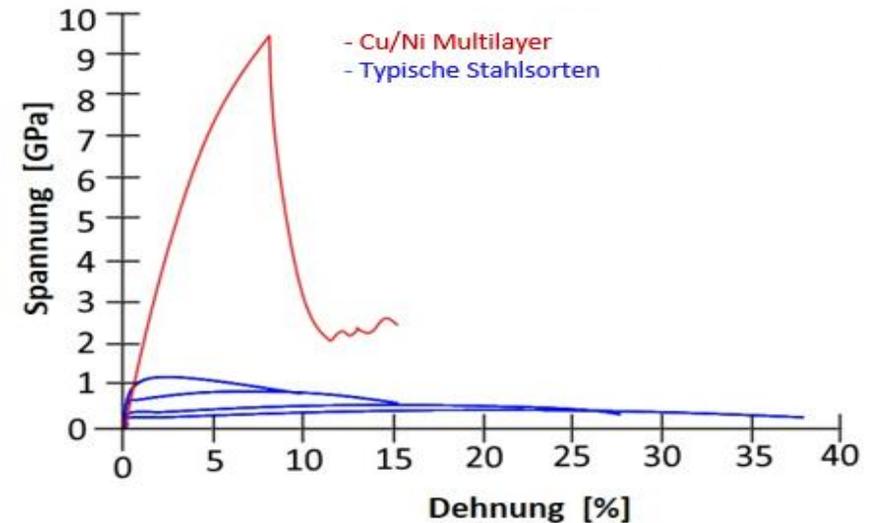


Minimale Alterung infolge von Ermüdung
Flache Neigung der Wöhlerkurve



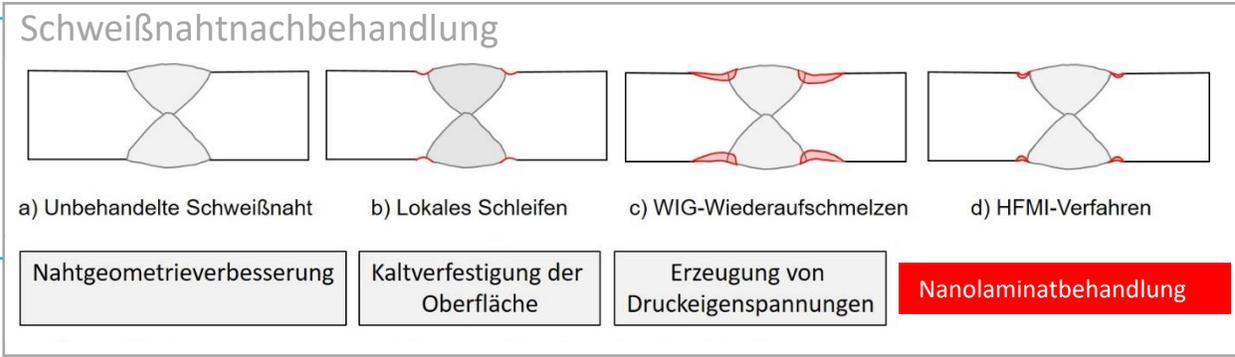
Quelle: W. Fricke, Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering, 2017

- Materialeigenschaften des Nanolaminats um ein Vielfaches besser als Materialeigenschaften des homogenen Metallquerschnitts → Hall Petch
- **FRAGEN:**
 - Lassen sich diese Vorteile der Nanolamine für homogene Bauteile nutzen?
 - Ermöglichen Nanolamine ausreichende Ermüdungsfestigkeit und Schutz der Kerbdetails vor Ermüdung?
- Skalenübergreifende Bemessung (Brunow und Rutner, 2020)



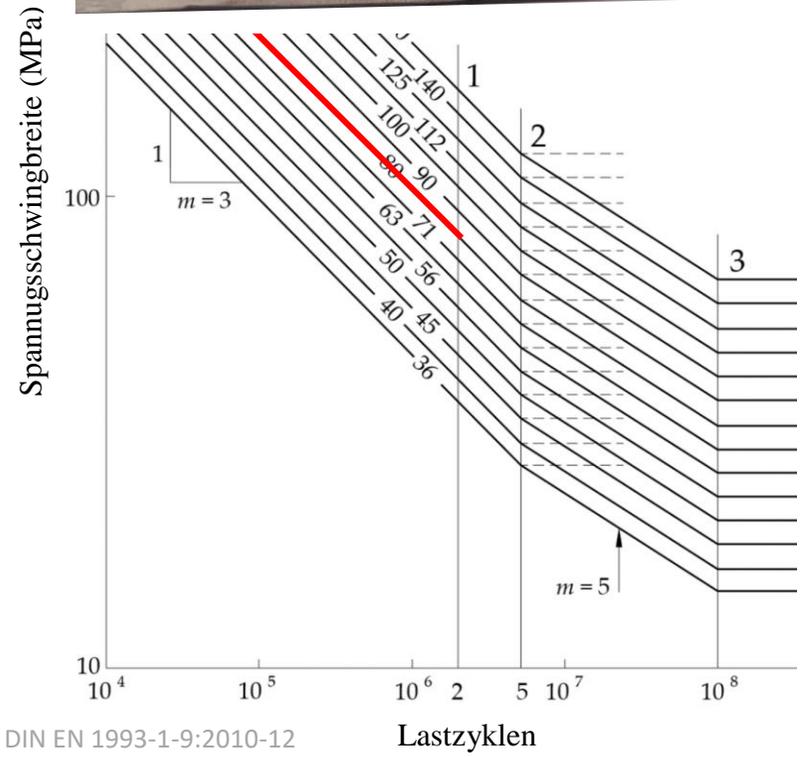
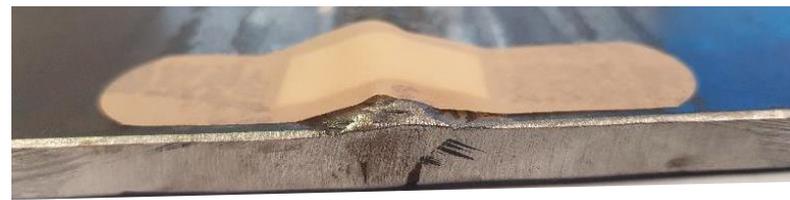
Quellen: Hradil and Talja, 2016; Mastorakos et al., 2011

Die Idee



Quelle: Brunow und Rutner, Stahlbau, 2021

Die Idee

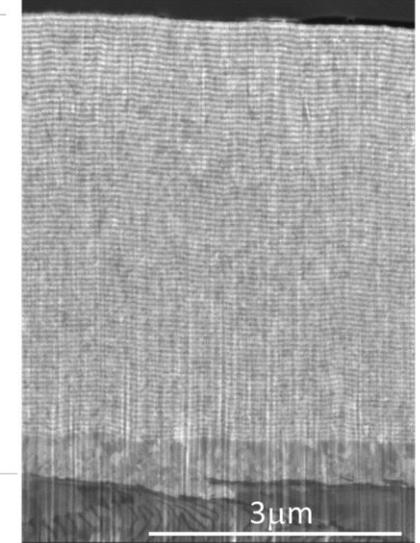


Das Material

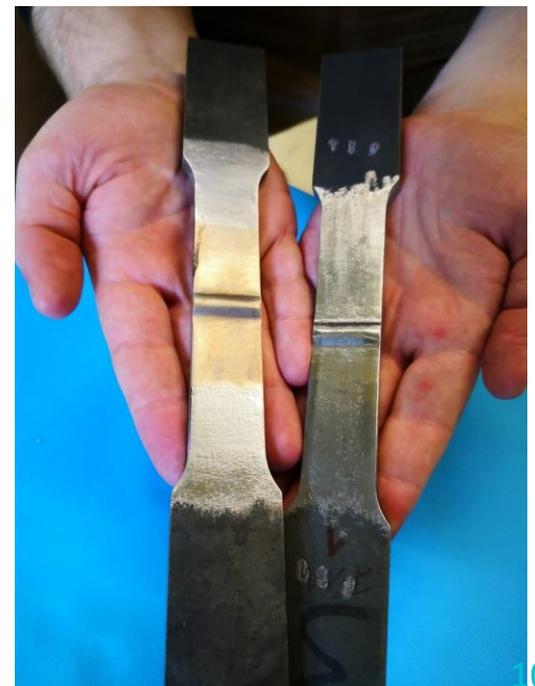
Zum Vergleich:
Menschliches Haar:
Ø 60-80µm



Querschnitt des Nanopflasters unter dem Elektronenmikroskop:

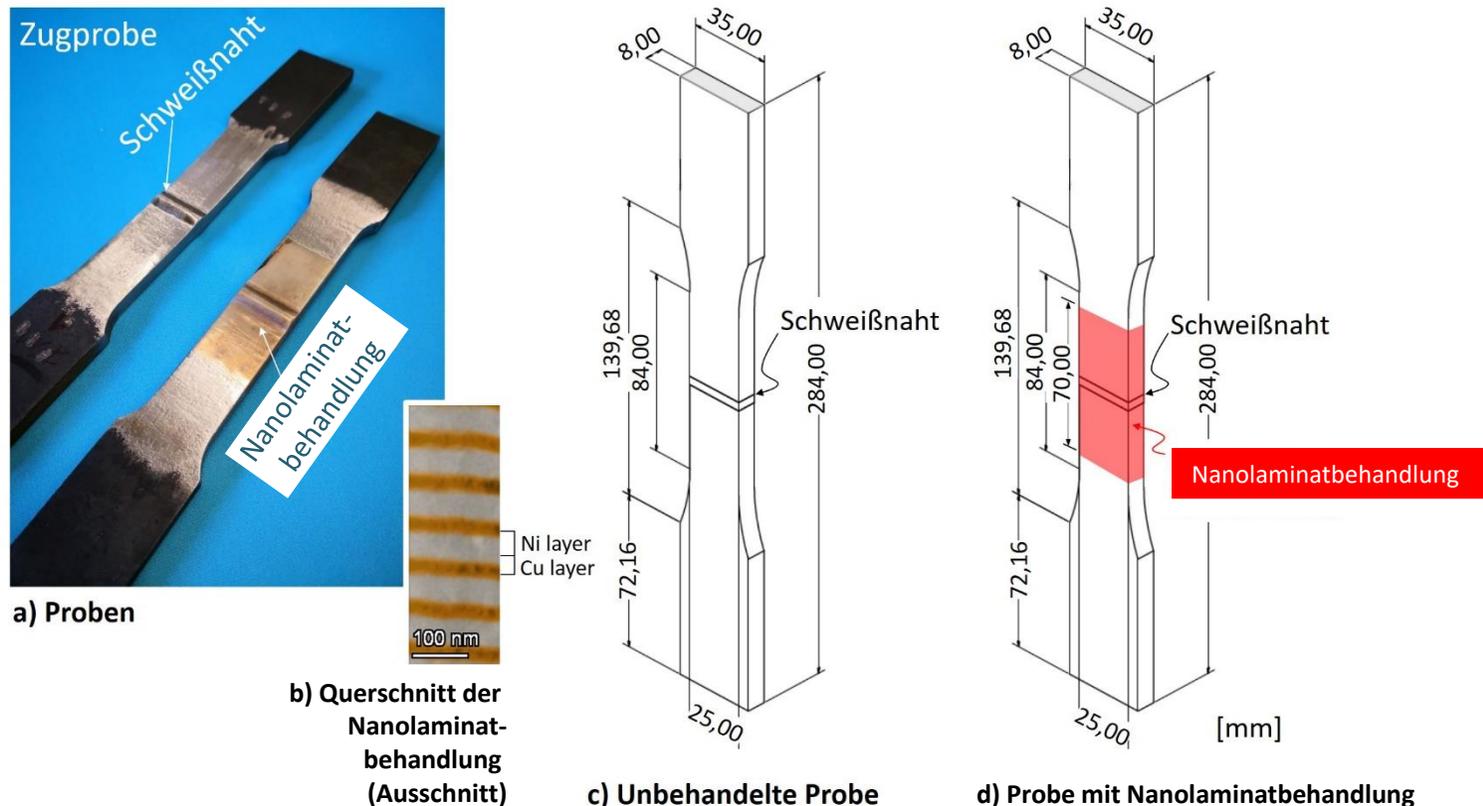


Die Probe

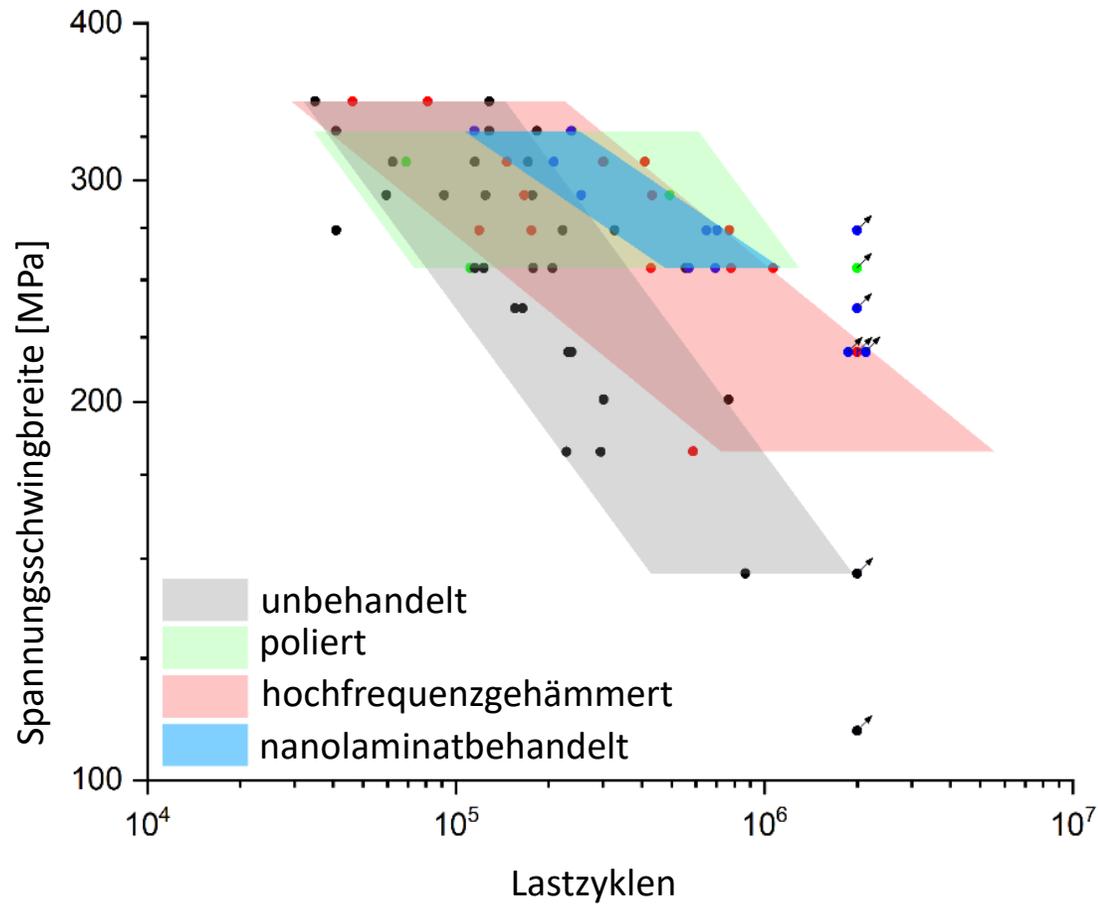


Ergebnisse für Stumpfnah (Proof-of-Concept)

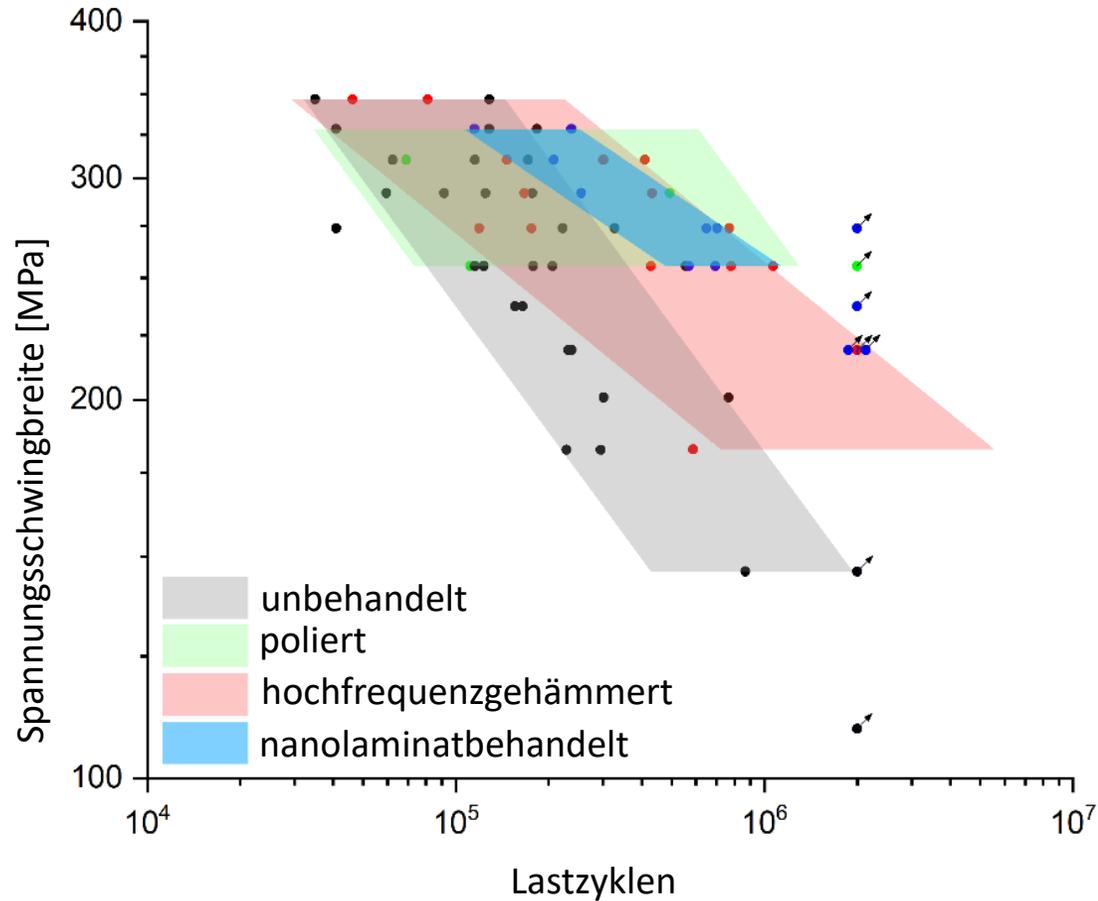
- 8mm-dicken Zugproben (S355 J2): Probengeometrie Typ E nach DIN 50125 mit zentrischer DV-Naht
- Nanolaminatbehandlung entwickelt, die lokal auf die Schweißnaht appliziert wird



Streuung der Ergebnisse



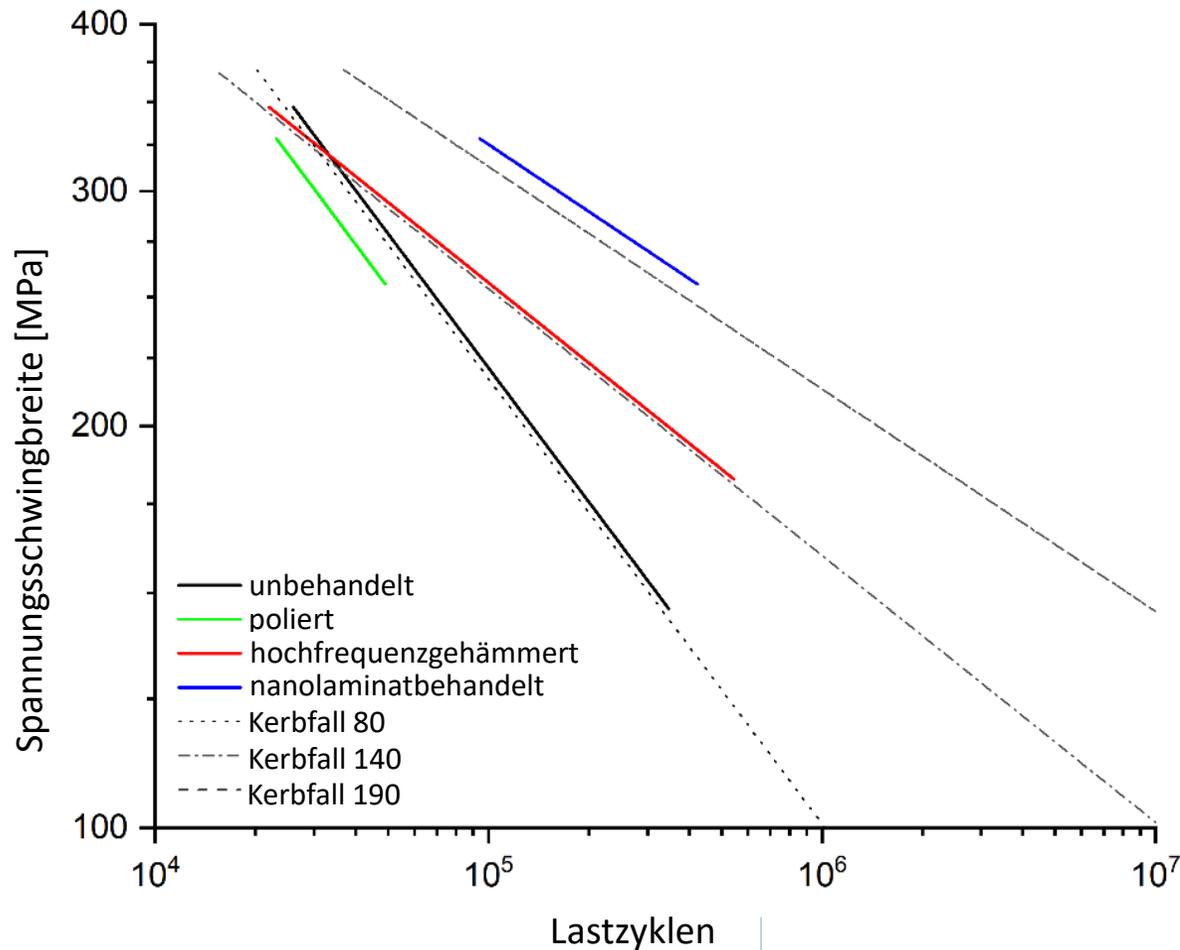
Streuung der Ergebnisse



Interpretation der Streuung der Ergebnisse:

→ Verlässlichkeit der Schweißnahtnachbehandlungsmethode

Erzielbarer Kerbfall für die Bemessung

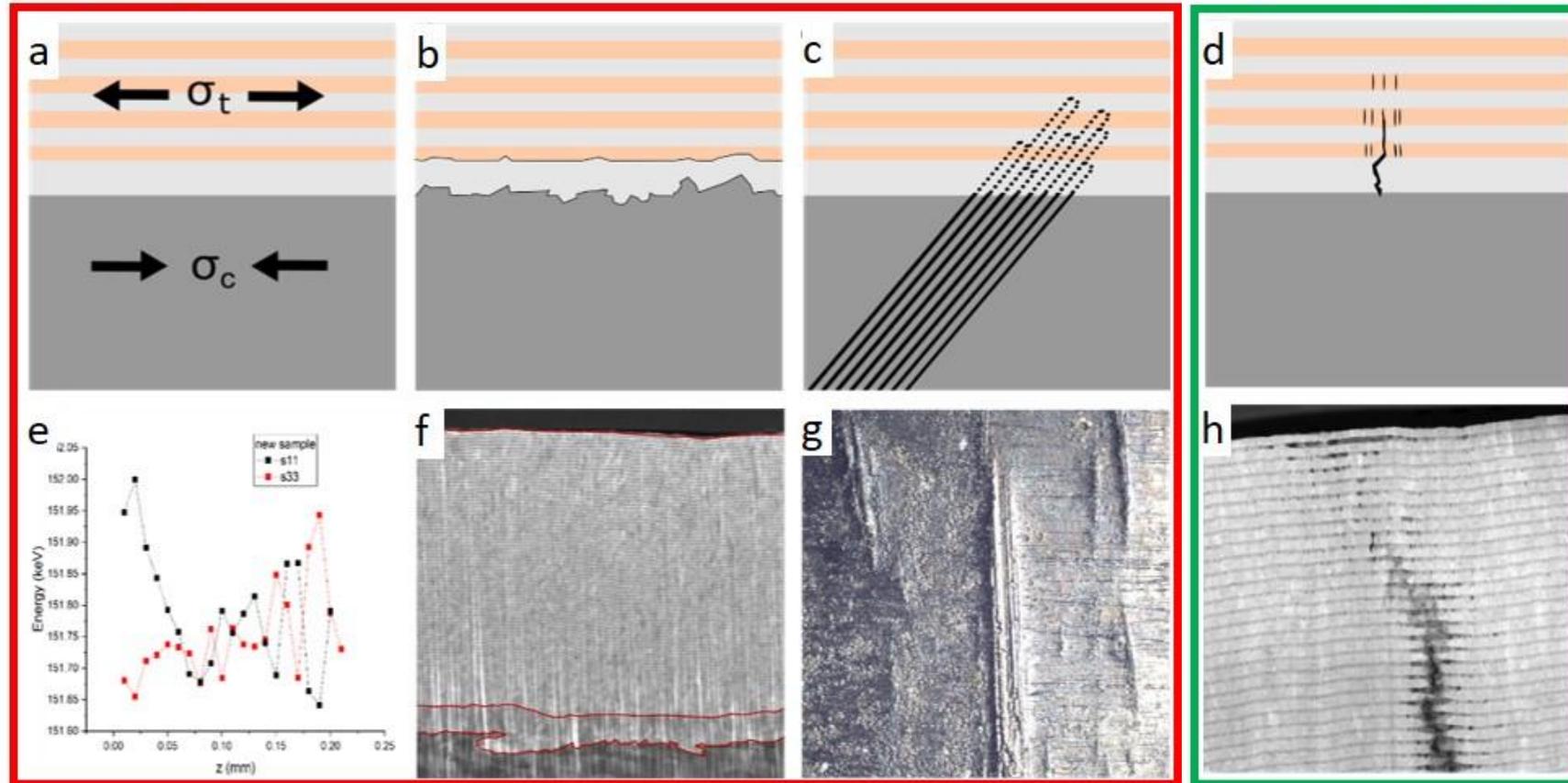


- Unbehandelte Schweißnaht bei Kerbfall 80
- Mit Hochfrequenzhämmern nachbehandelte Schweißnaht bei Kerbfall 140
- **Nanolaminatbehandlung besser als Kerbfall 190**

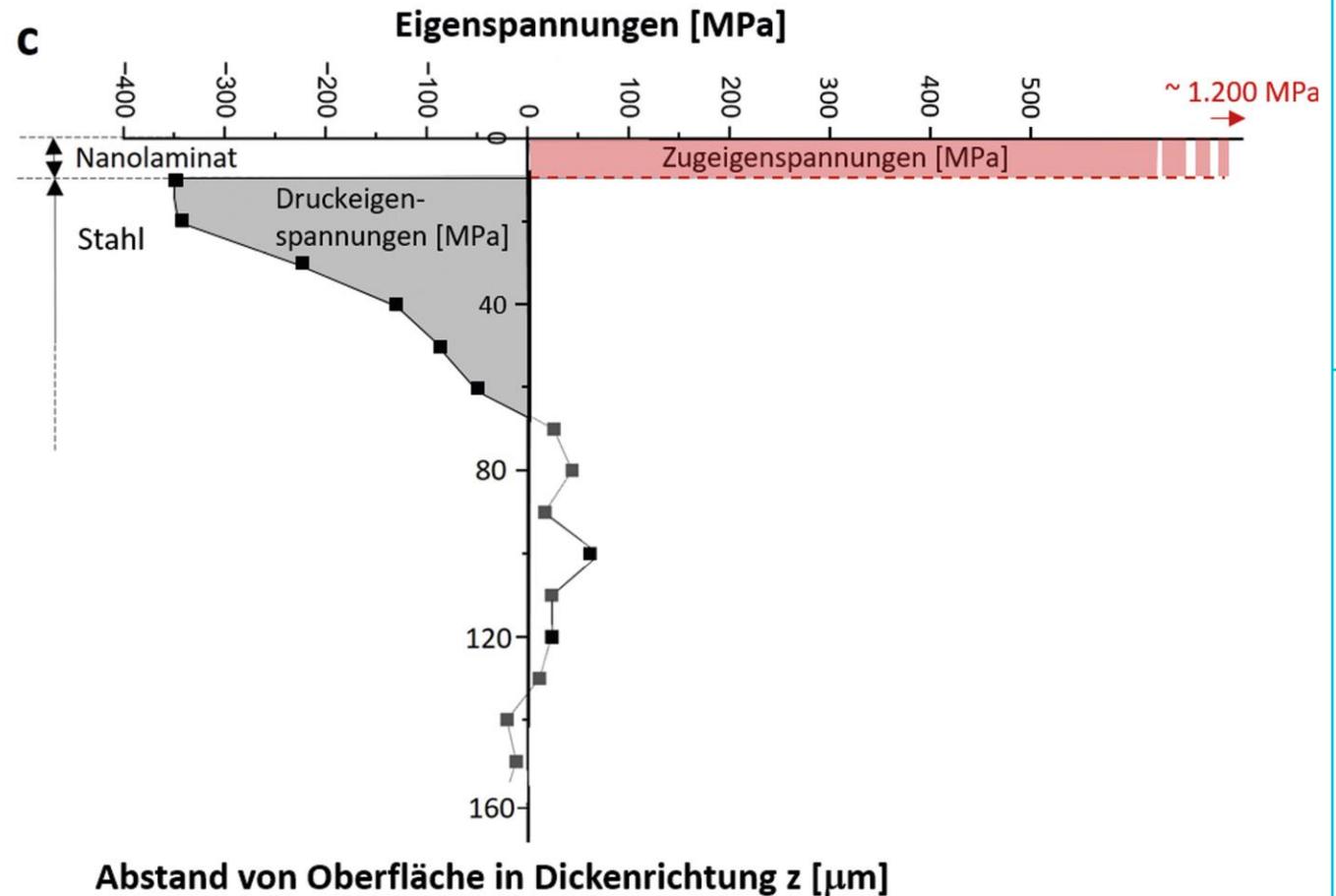
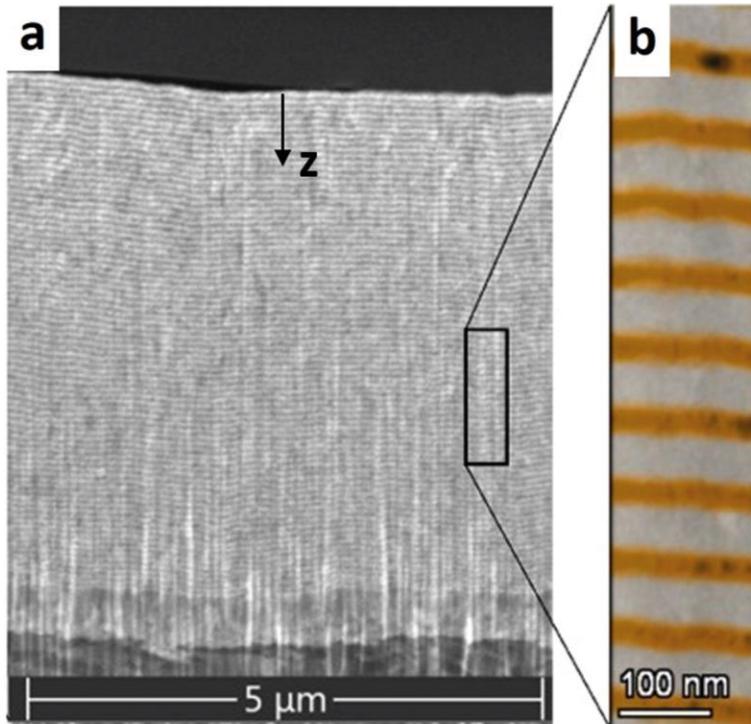
Materialmechanismen der Interaktion von Nanolaminat und Schweißnaht

Verzögerte Rissinitiierung

Verzögerter Rissfortschritt



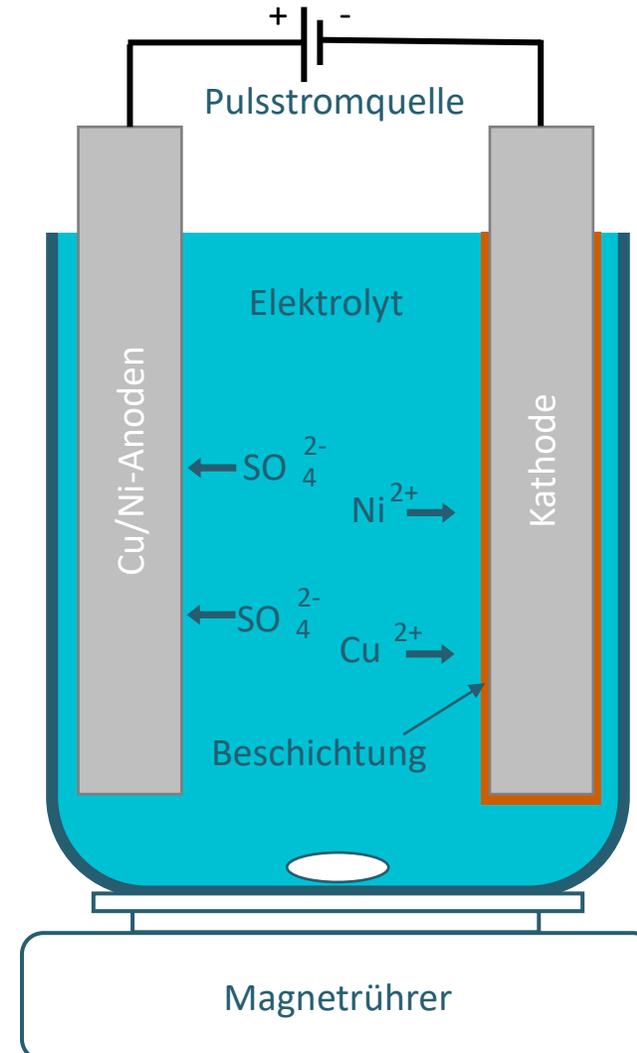
Materialmechanismen der Interaktion von Nanolaminat und Schweißnaht



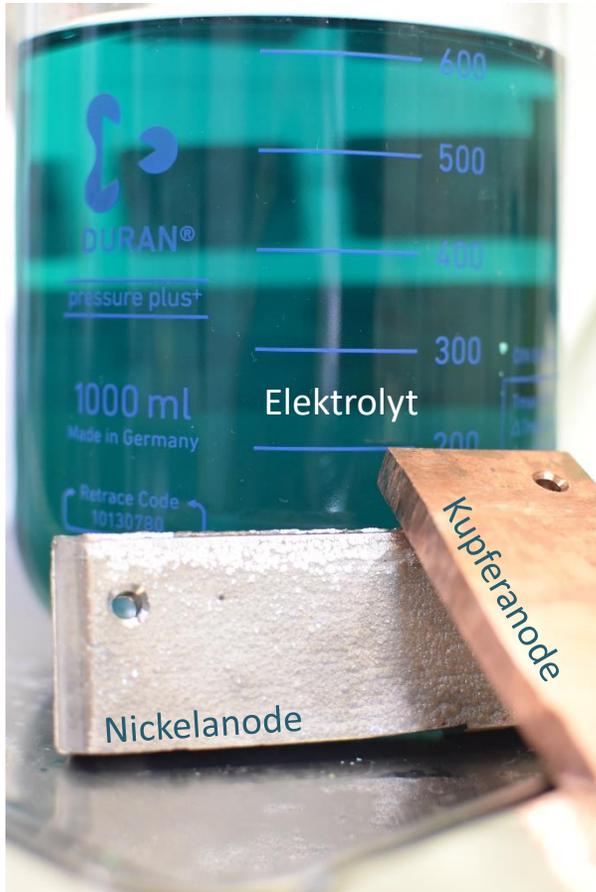
Quelle: M. Rutner et al., 2024, *Stahlbau* 93, H. 9, S. 1–13

Wie wird das Nanolaminat hergestellt?

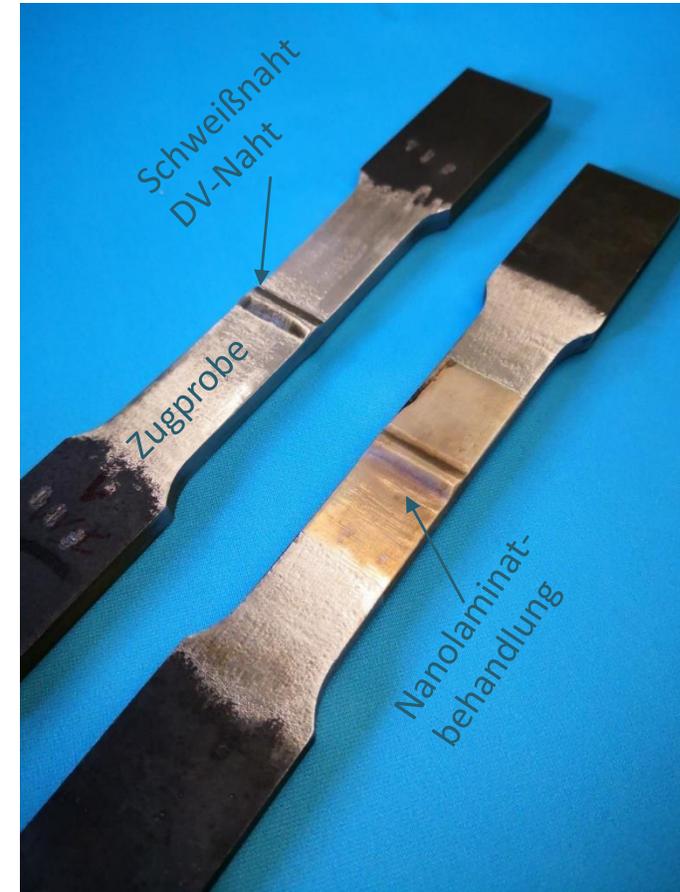
- Galvanische Metallherstellung
- Single-Bath-Technik
 - Deposition von zwei Metallen in einem Bad
 - Kontrollierte Absetzung durch unterschiedliche elektrische Stromstärkedichten



Wie wird das Nanolaminat hergestellt?



©TUHH – Franziska Trede



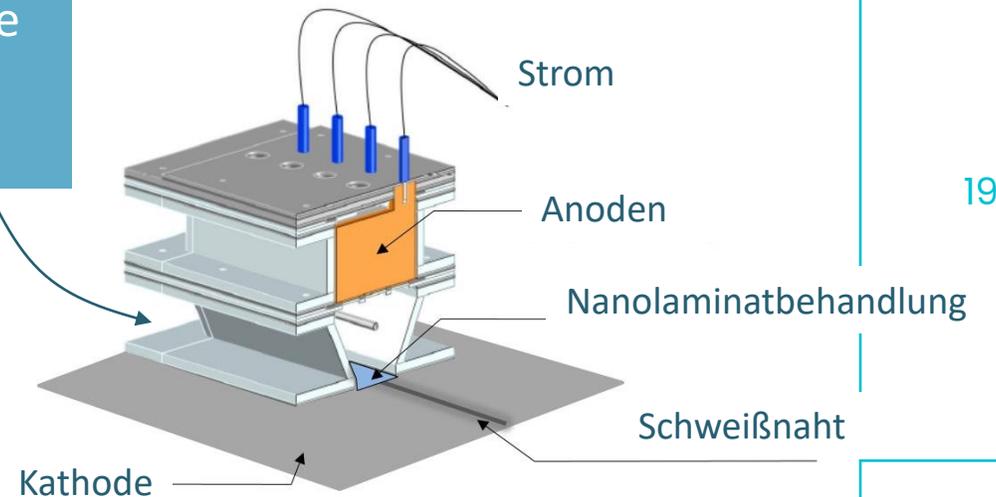
©TUHH – Franziska Trede

Wie bringen wir das Labor ins Feld/Fabrikationshalle?



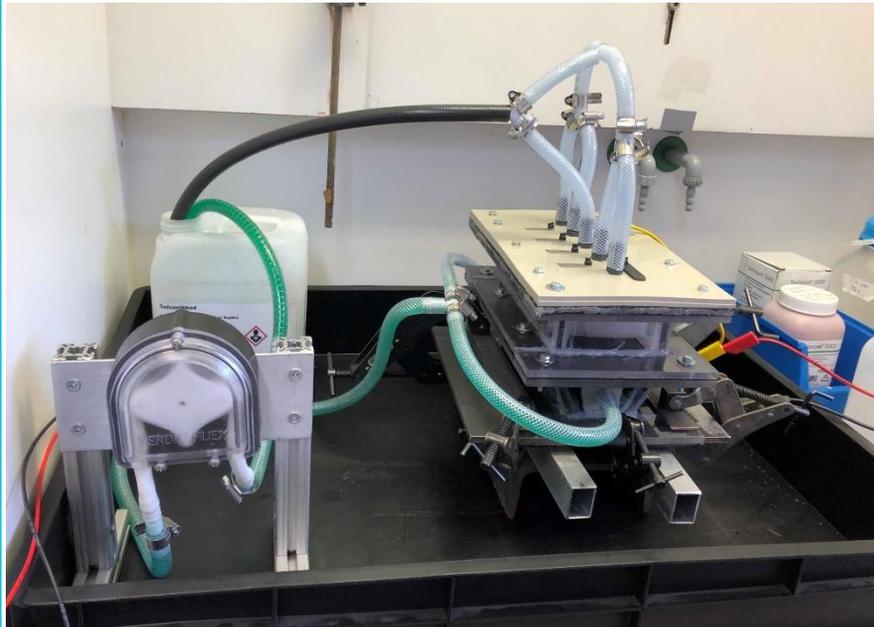
Modulare/flexible
Depositions-
vorrichtung

In-situ – Herstellung

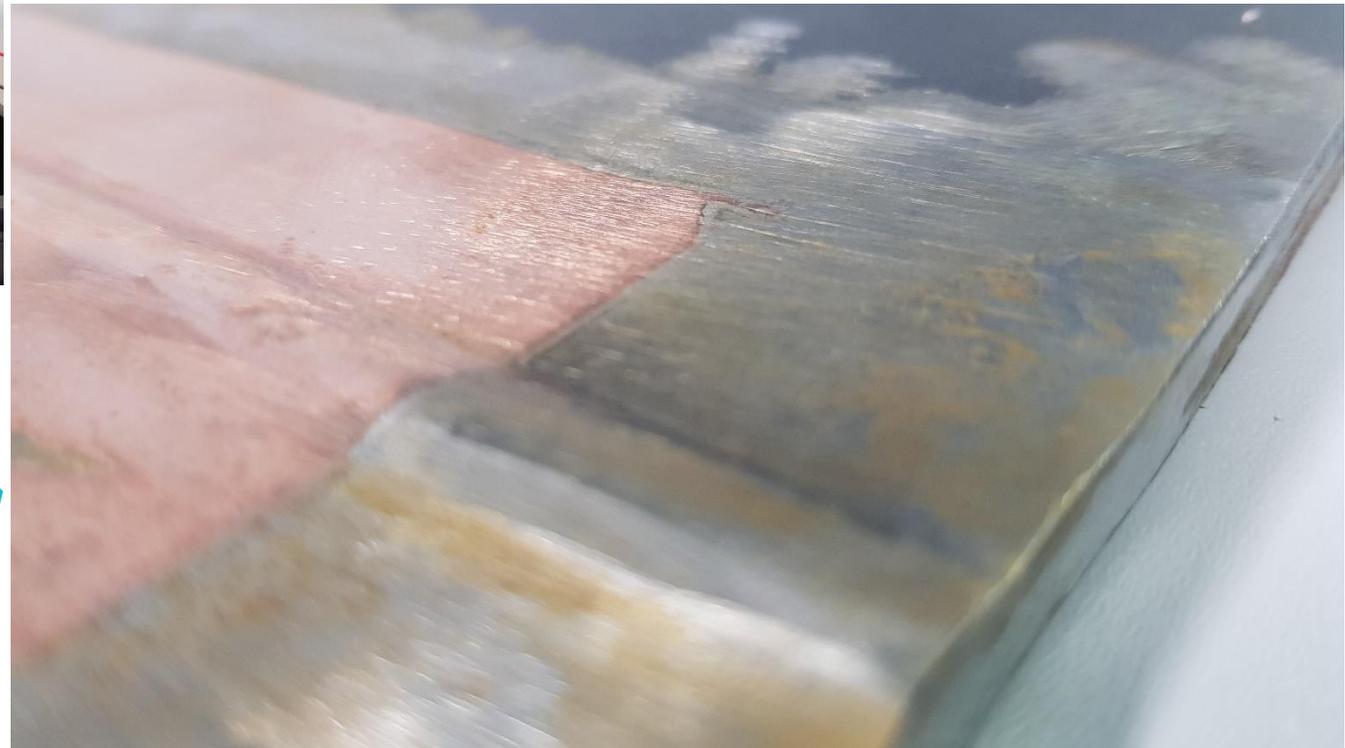


- Deposition von Nanolaminat auf Schweißnähten der Monopfahl-Gründung
- In-situ Herstellung

Wie bringen wir das Labor ins Feld/Fabrikationshalle?



Modulare/flexible Depositionsvorrichtung

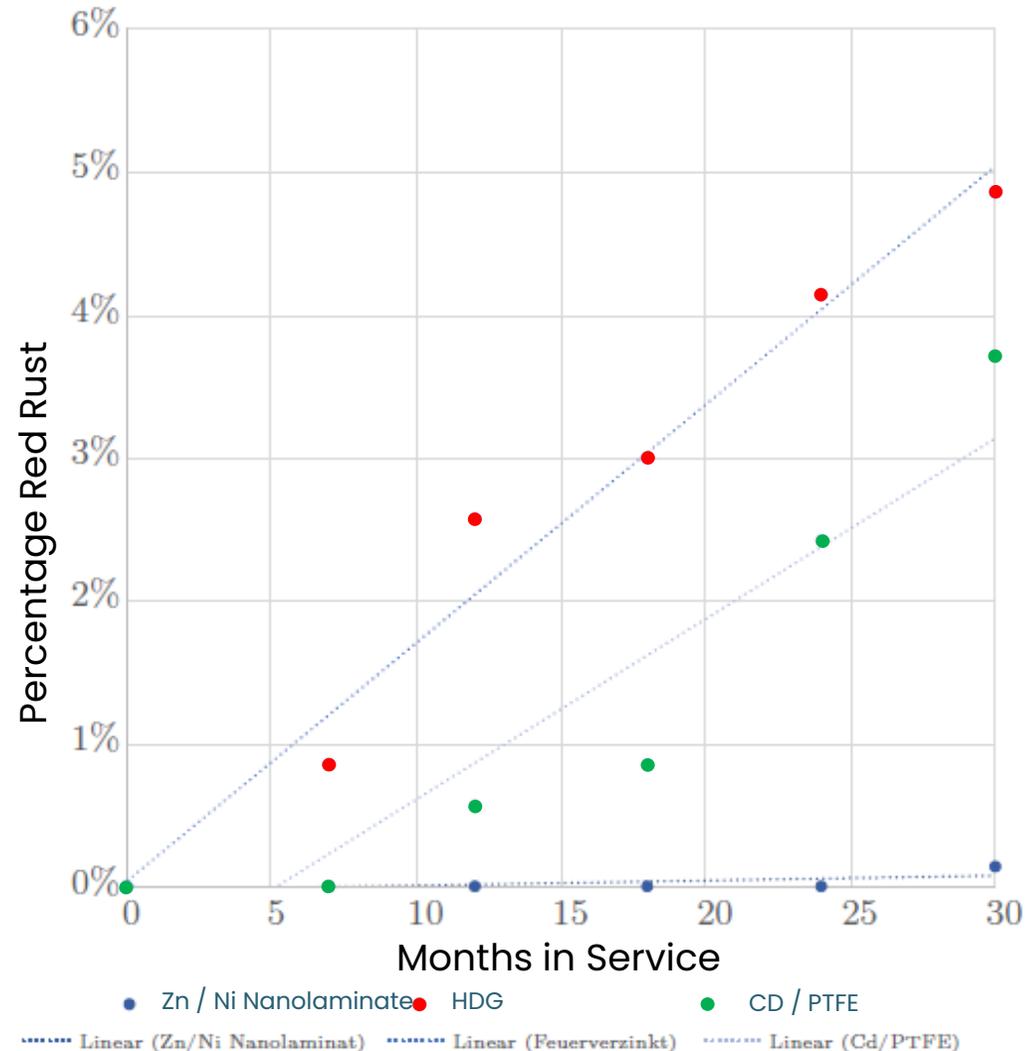




tilayer NMM)	TUHH Technische Universität Hamburg
ersparnis von 28% it unbehandelter snaht ch längere lauer bar für neue en und Strukturen and	
ngsvorhaben 027	21
ßabdruck barkeit von struktur	
Scientific Reports, 2023 gskosten	01.10.2024

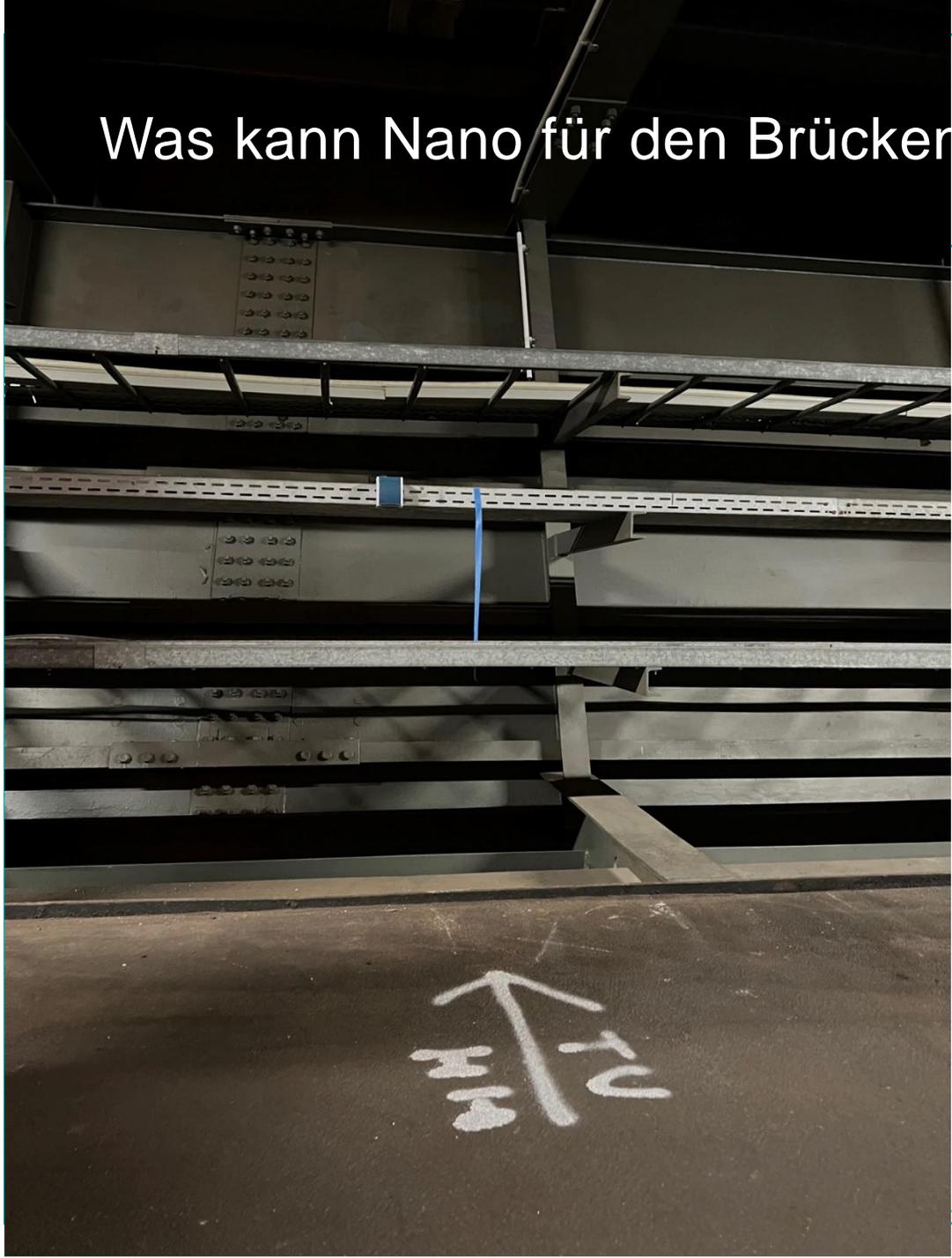
Korrosionswiderstand der Nanolaminatbehandlung

- Korrosionswiderstand von Nanolaminat in Labor- und Feldversuchen durch Joosten et al. (2017) untersucht
- Vergleich des Korrosionsschutzes durch Nanolaminatbehandlung und konventionelle Maßnahmen, wie Feuerverzinkung (hot dip galvanizing), Elektroverzinkung (electrogalvanizing), PTFE, etc.
- Feldversuche im Offshorebereich
- Proben sind
Stahlschraubenverbindungen
- Diagramm zeigt Prozentanteil v. rotem



Quelle: Joosten et al., 2017

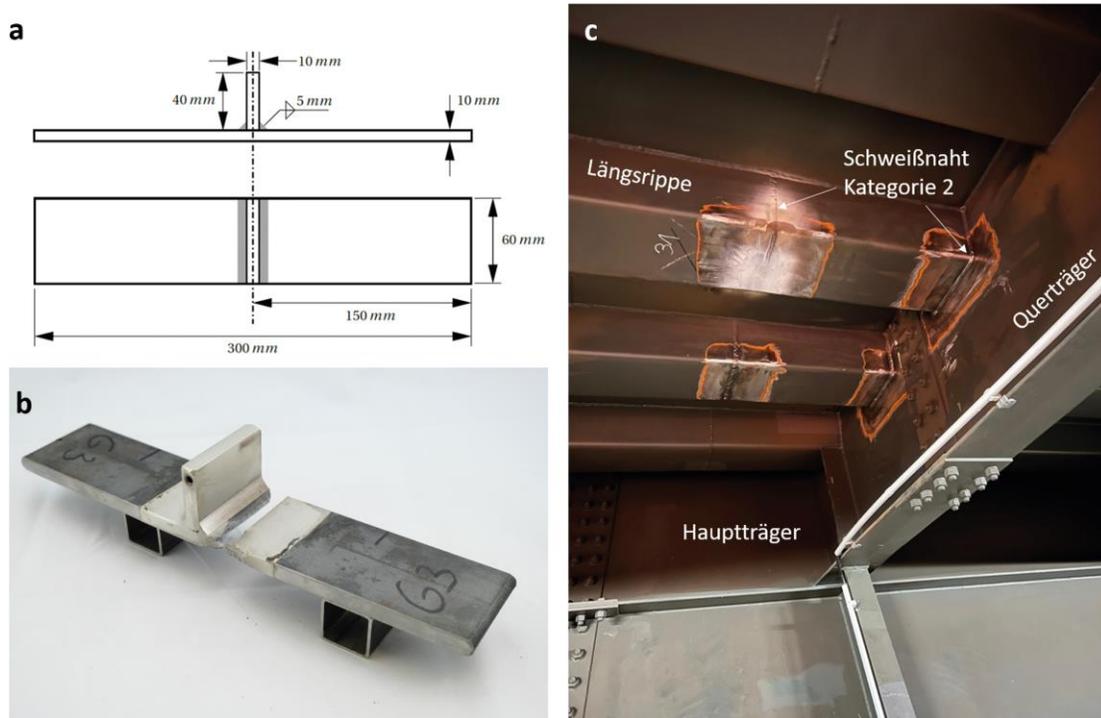
Was kann Nano für den Brückenbau?



Was kann Nano für den Brückenbau?

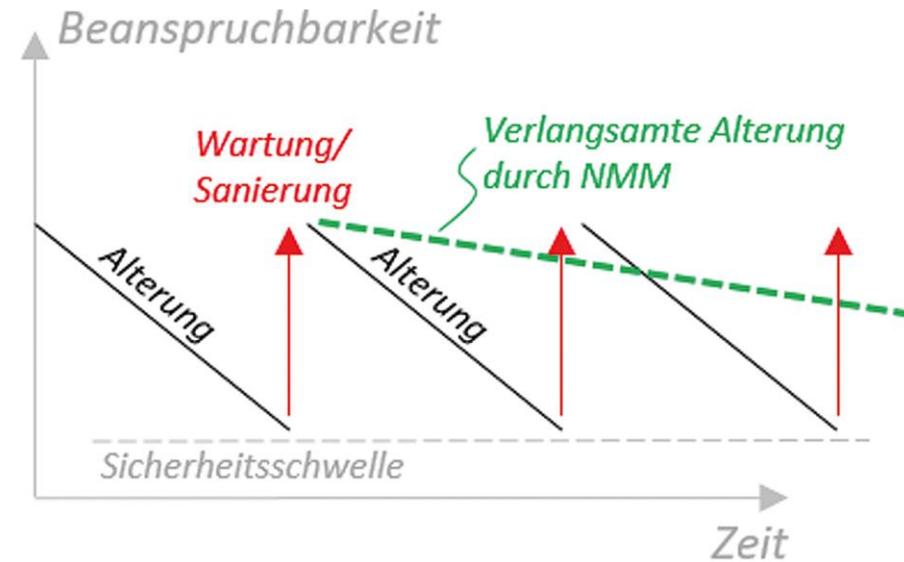
- Gefordert sind: Maximale Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Infrastrukturbauwerke bei gleichzeitig reduzierten Kosten für Wartung und Reparatur und minimierten Umweltauswirkungen (Jensen, 2020)
- Chancen des NMM für Sanierung und Wartung:
 - Verlässliche längere Lebenszeiten → CO₂-Fussabdruck, größere Ressourceneffizienz, Verfügbarkeit der Infrastruktur
 - Anwendbarkeit für Neubauten als auch für Bauten im Bestand → Restnutzungsdauern, minimierte Umweltauswirkungen
 - Wartungskosten reduzieren → Wirtschaftlichkeit
 - Ermöglichung einer effizienten Ermüdungsbemessung und eines verlässlichen Restnutzungsdauernachweises

Was kann Nano für den Brückenbau?



Labortests an der TUHH

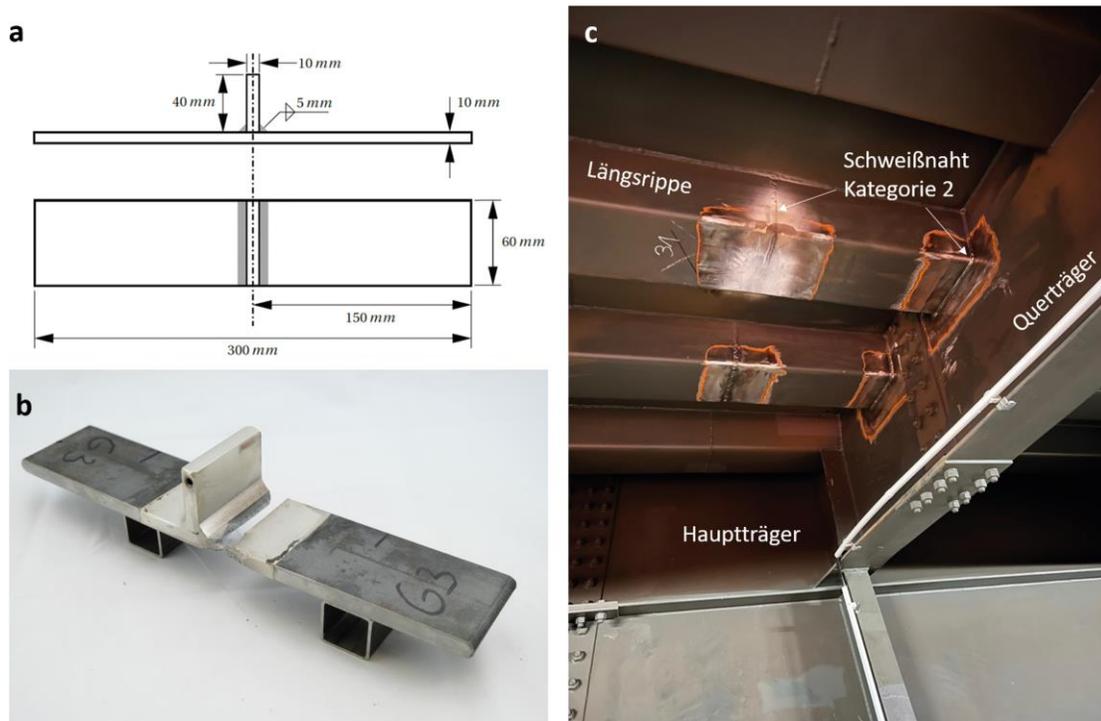
- DV-Naht → Kerbfall 190
 - Unbelastete Quersteife, unbelastete Längssteife
- Erste in-situ Installation im Herbst 2024



Wartungszyklen der Infrastruktur

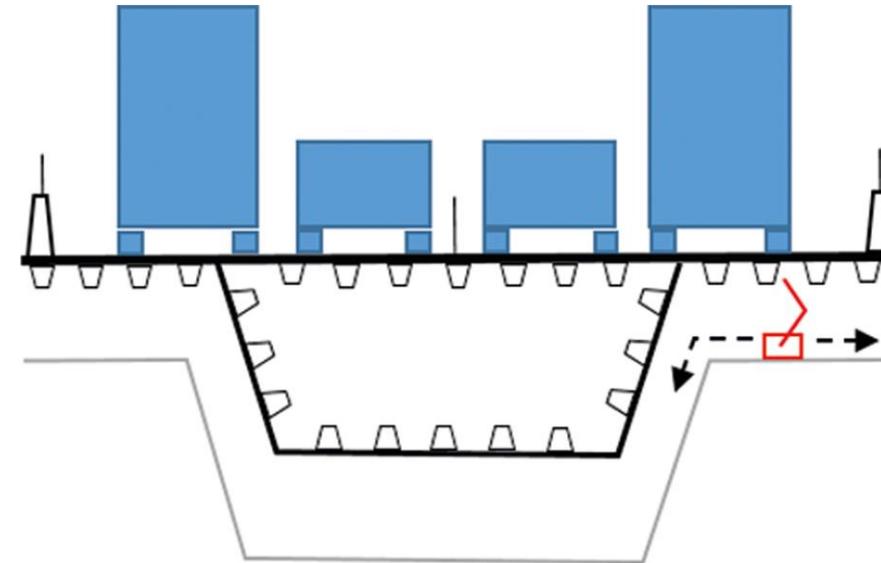
- Verlangsamte Alterung
- Hypothese: Bestätigt sich die Steigerung der Ermüdungsfestigkeit für alle Kerbdetails
→ Schweißnaht nicht ermüdungskritisch
→ Auswirkung auf Ermüdungsbemessung

Was kann Nano für den Brückenbau?



Labortests an der TUHH

- DV-Naht → Kerbfall 190
 - Unbelastete Quersteife, unbelastete Längssteife
- Erste in-situ Installation im Herbst 2024



- Vollautomatische Applikation durch Roboterarm
- 24/7 und unter Verkehr

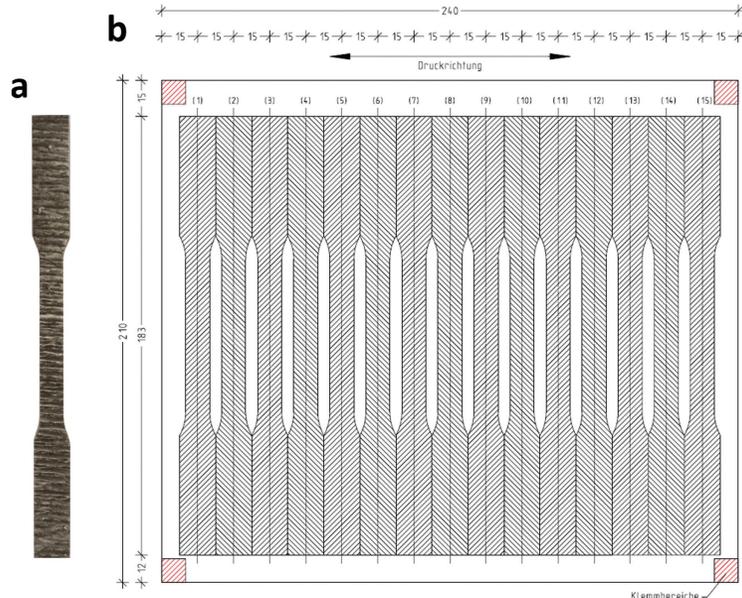
27

Was kann Nano für additiv gefertigten Konstruktionen?



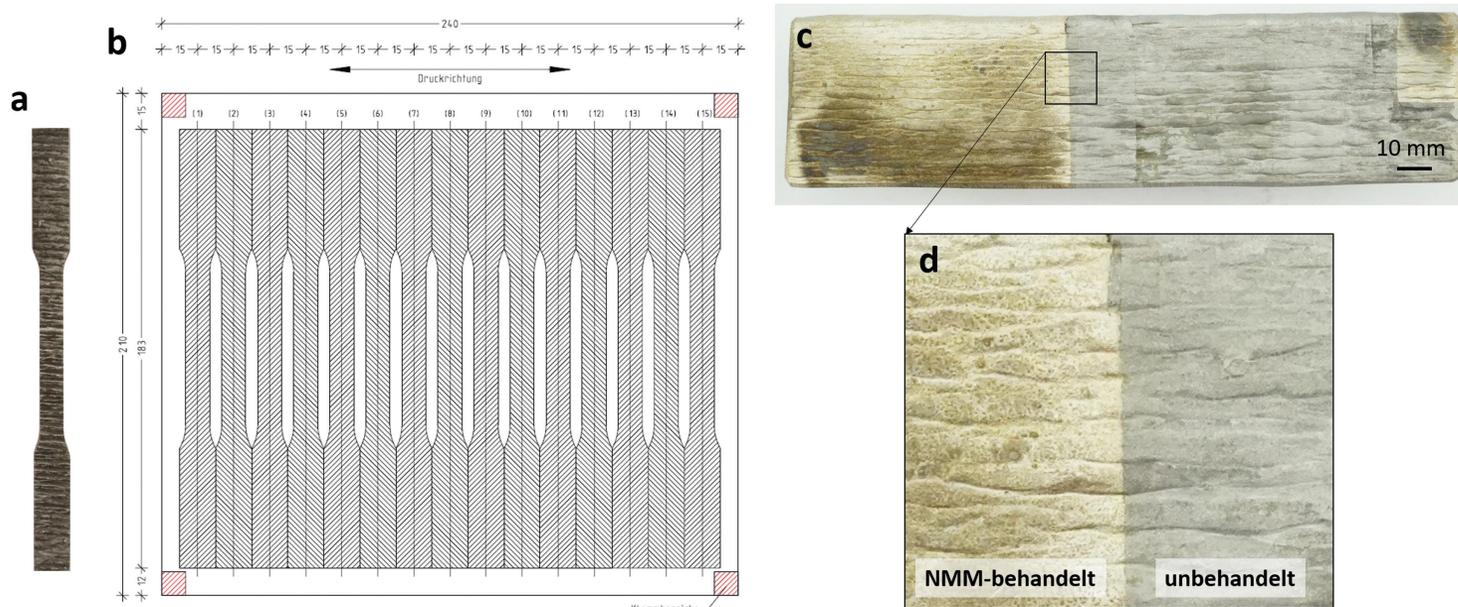
- WAAM-Proben durch herstellungs-bedingte Oberflächenrauigkeit ermüdungsanfällig (Bartsch et al., 2023) → Einstufung in Kerbfall 125 (m=5)

Was kann Nano für additiv gefertigten Konstruktionen?



- WAAM-Proben durch herstellungs-bedingte Oberflächenrauigkeit ermüdungsanfällig (Bartsch et al., 2023) → Einstufung in Kerbfall 125 ($m=5$)
- Erste Untersuchungen mit G4Si1-Schweißdraht ($D=1\text{ mm}$) WAAM-Proben und NMM behandelt (ohne mechanische Vorbehandlung, nur Intensivreinigung)

Was kann Nano für additiv gefertigten Konstruktionen?



- WAAM-Proben durch herstellungs-bedingte Oberflächenrauigkeit ermüdungsanfällig (Bartsch et al., 2023) → Einstufung in Kerbfall 125 ($m=5$)
- Erste Untersuchungen mit G4Si1-Schweißdraht ($D=1\text{ mm}$) WAAM-Proben und NMM behandelt (ohne mechanische Vorbehandlung, nur Intensivreinigung)
- Nachweis von Druckeigen-spannungen an der Oberfläche des additiv gefertigten Querschnitts
- Ergebnisse hinsichtlich Steigerung der Ermüdungsfestigkeit und

- Nanolaminatbehandlung (Nanostructured metal multilayer/NMM): Technologieansatz fügt erstmals die Nano- und die Makrowelt im Konstruktiven Ingenieurbau zusammen
- Ergebnisse mit Stumpfnah: Steigerung von Kerbfall 80 auf Kerbfall 190
- Gesicherte Erkenntnisse über Wirkmechanismus: Flächige Eintragung von Zugeigenspannungen bis zu 1,2 GPa in Nanolaminat und damit Druckeigenspannungen oberflächennah in Stahlbauteil
- Studie mit Offshore-Monopfahlgründung: Mögliche 30% Masseinsparung
- Ausweitung der Untersuchungen auf weitere Kerbdetails, z.B. unbelastete Quersteife
- Skalierung der NMM – Applikation des NMM im Feld auf Brücke im Herbst 2024
- Erste Untersuchungen der Wirkung des NMM auf additiv gefertigten Querschnitten, z.B. WAAM-Bauteile
- Chancen in vielfacher Hinsicht: Steigerung der Ermüdungsfestigkeit, neue Kerbfalleinstufung, Ermüdungsbemessung, Restnutzungsdauernachweis, Korrosionsschutz – In toto: Schutz der Stahlinfrastruktur vor vorzeitiger Alterung

Ich möchte danken für die Zusammenarbeit

- Dr.-Ing. Jakob Brunow
- Mohsen Falah, MSc.
- Dr.-Ing. Nikolay Lalkovski
- Dr.-Ing. Fawad Mohammadi
- Maren Seidelmann, MSc.
- Niclas Spalek, MSc.
- Olaf Wittleben

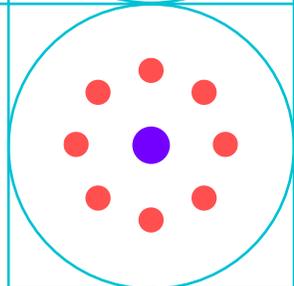
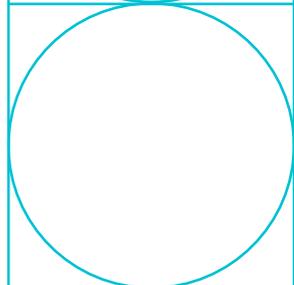
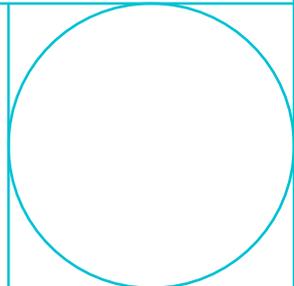


- Shaw, W. J., Berg, L. K., Debnath, M., Deskos, G., Draxl, C., Ghate, V. P., Hasager, C. B., Kotamarthi, R., Mirocha, J. D., Muradyan, P., Pringle, W. J., Turner, D. D., and Wilczak, J. M. Scientific challenges to characterizing the wind resource in the marine atmospheric boundary layer, *Wind Energ. Sci.*, 7, 2307–2334, <https://doi.org/10.5194/wes-7-2307-2022>, 2022.
- Fricke, W. Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering, 2017
- Mastorakos, I.N., Bellou, A., Bahr, D.F., Zbib, H.M. Size-dependent strength in nanolaminate metallic systems. *Journal of Materials Research*, 26 (2011), S. 1179–1187
- Hradil, P., Talja, A. Ductility limits of high strength steels, VTT Research Report, VTT-R-04741-16, 2016 (6)
- Brunow, J., Rutner, M. Fügen von nanostrukturierten metallischen Querschnitten – Einsatz als Makroquerschnitt im konstruktiven Ingenieurbau, IN: Tagungsband Deutscher Ausschuss für Stahlbau, DAST-Kolloquium, 31.03.-01.04.2020, Karlsruhe
- Brunow, J., Rutner, M. Das Nanolaminatpflaster – Schweißnahtnachbehandlung für bisher unerreichte Lebensdauererlängerung. *Stahlbau* 90, H. 9, S. 691–700 (2021). <https://doi.org/10.1002/stab.202100042>
- Joosten, M.W., Zaharias, C.L., Wilson, S., Lomasney, C., Lomasney, S. Zinc-Nickel Nanolaminate – Advanced Coating for Bolt Corrosion Control. Tagungsband der Corrosion 2017, New Orleans, Louisiana, USA, 2017
- Brunow, J., Spalek, N., Mohammadi, F., Rutner, M. A novel post-weld treatment using nanostructured metallic multilayer for superior fatigue strength. *Scientific Reports* 13, 22215 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49192-0>
- Rutner, M.; Spalek, N.; Falah, M.; Lalkovski, N. (2024) *Verknüpfung von Nano mit Makro – Chancen für den Stahlbau*. *Stahlbau* 93, H. 9, S. 1–13. <https://doi.org/10.1002/stab.202400048> | 26.09.2024

Vielen Dank!

Prof. Dr.-Ing. habil. Marcus Rutner
Institut für Metall- und Verbundbau
Denickestraße 17
21073 Hamburg
Tel.: +49 40 42878-3022
Mobil +49 151 2560 8374
Email: marcus.rutner@tuhh.de

tuhh.de



TUHH
Technische
Universität
Hamburg