

Hochleistungsharze und deren Blends für neuartige ablative Hitzeschilde in Feststoffraketenmotoren

Marcel Sticher, Marcel.Sticher@uni-bayreuth.de

Universität Bayreuth, Lehrstuhl Polymere Werkstoffe (LSPW)

1. Einleitung und Motivation

Die stetige Steigerung von Schubkraft und Nutzlast moderner Trägerraketen führt zu deutlich erhöhten Wärmeströmen in Feststoffraketenmotordüsen. Etablierte, faserverstärkte Hitzeschilde auf Basis von Phenol-Formaldehyd-Harzen (PF) stoßen daher zunehmend an ihre Leistungsgrenzen.¹ Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Arbeit systematisch duroplastische Harze als alternative Matrixmaterialien für neuartige ablative Verbundwerkstoffe mit verbesserter Widerstandsfähigkeit. Ein besonderer Fokus liegt auf der Vorhersage der Erosionsrate (ER) mittels maschinellen Lernmodellen auf deren Basis grundlegende Zusammenhänge zwischen Harz-, Verbund- und Ablationseigenschaften in realitätsnahen Ablationstests identifiziert werden sollen.

2. Materialien und Methoden

Untersucht werden 10 kommerziell verfügbare, temperaturbeständige Hochleistungsharze: darunter Polyadditionsharze, wie Benzoxazin (BZ), Bismaleimid (BMI), Phthalonitril, Polyimid und Cyanatester, als auch Polykondensationsharze wie Poly(furfurylalkohol), ein Phenol-Aralkyl- und ein traditionelles PF-Harz und keramikbildende Polysilazan- und -siloxanharze. Zusätzlich werden ausgewählte Harzblends betrachtet, um Eigenschaftsprofile gezielt zu variieren. Der Arbeitsworkflow in **Abb. 1** beinhaltet die Charakterisierung der Reinharze hinsichtlich thermischer Eigenschaften und ihres Zersetzungsverhaltens mittels DSC,

DMA, LFA und TGA-FTIR. Bulk Moulding Compounds (BMCs) mit 50 Gew.-% Glasfaseranteil werden mittels Heißformpressen hergestellt und anschließend in einer Testanlage einer reduktiven Ar/H₂-Plasmaplume mit 8 Gew.-% Al₂O₃ Partikelstrom und einem Wärmefluss von 1,5 MW m⁻² ausgesetzt.

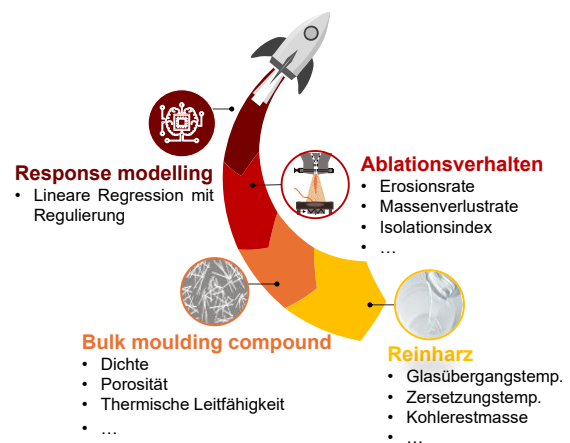


Abb. 1: Graphical Abstract zur schematischen Darstellung des Workflows der Masterarbeit.

Dabei werden die ER und die Massenverlustrate quantitativ bestimmt. Die zeit aufgelöste Messung der Vorder- und Rückseitentemperaturen erlaubt die Evaluierung des Isolationsindex und der Wärmesenktemperatur, während die mikrostrukturelle Analyse der ablatierten Proben mit Rasterelektronen- und Lichtmikroskopie ergänzende Einblicke in Schädigungsmechanismen und Verkohlung liefert. Zur Vorhersage der ER wird ein L1/L2-regularisiertes lineares Regressionsmodell (ElasticNet) mit leave-one-out-Kreuz-validierung (KV) angewandt. Eine Hyperparameteroptimierung wird mittels verschachtelter KV durchgeführt.

3. Ergebnisse und Fazit

BMCs auf Basis von BZ und BMI weisen eine geringere ER als das PF-Referenzsystem auf. Ursächlich hierfür sind eine hohe Gasausbeute, sowie die Ausbildung von dünnen, stabilen und artefaktfreien Kohleschichten während der Ablation (Abb. 2). Zusätzlich zeigt sich, dass bei reduktiven Bedingungen, entgegen vieler Berichte in der Literatur,^{2,3} eine hohe Kohlerestmasse nicht mit einer niedrigen ER einhergeht, sondern vielmehr komplexe Wechselwirkungen zwischen Kohleschichtstabilität, Pyrolyseverhalten und Wärmeleitung bestehen.

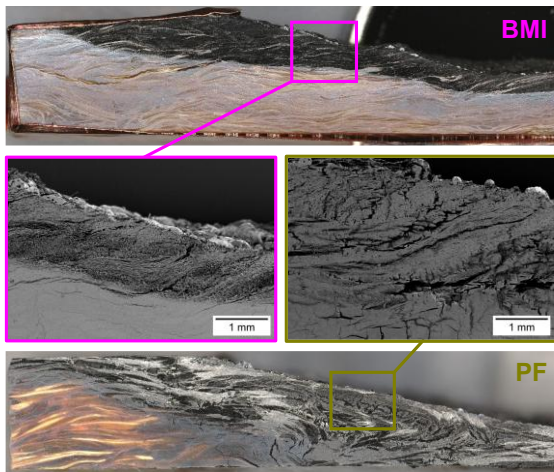


Abb. 2: Querschnitte des BMI- und PF-BMCs nach Ablationstest (Profilometer- und SEM-Aufnahmen).

Auf Basis des experimentellen Datensatzes wurde eine Pearson-Korrelationsanalyse vorgenommen, die den Isolationsindex und die Kohlerestmasse, als die stärksten linearen Einzelparameterkorrelationen mit der ER identifiziert hat ($R = 0.9$ und 0.8). Ein ElasticNet-Modell trainiert mit allen 22 untersuchten Merkmalen dieser Arbeit konnte zentrale Deskriptoren wie Isolationsindex, Kohlerestmasse, Glasübergangstemperatur und BMC-Wärmeleitfähigkeit als maßgebliche Einflussgrößen identifizieren. Eine Merkmal-Selektion auf Basis physikalischer Zusammenhänge und Co-Korrelationen, um die Modellkomplexität bei sehr kleiner Stichprobe zu reduzieren, resultiert in

einem sparsamen Modell mit lediglich sechs Merkmalen welches dennoch eine hohe Vorhersagegüte erreicht (Abb. 3).

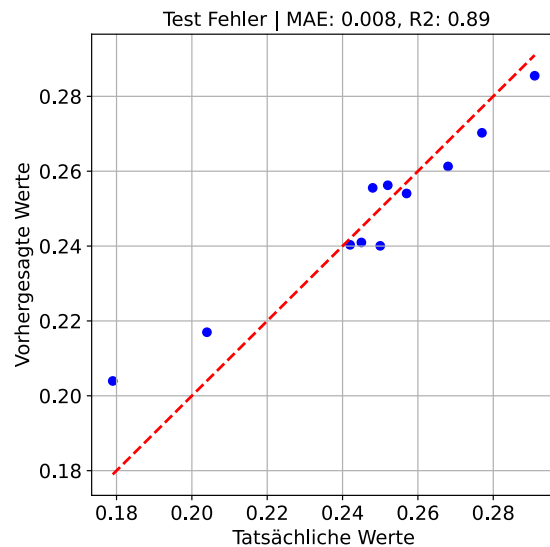


Abb. 3: Testfehler der Vorhersage der Erosionsrate des sparsamen ElasticNet-Modells ($\alpha = 0.1$, $L_{ratio} = 0.5$) aus 6 wenig korrelierten Merkmalen.

Insgesamt zeigt die Arbeit, dass alternative Hochleistungs-Thermosets ein erhebliches Potenzial zur Leistungssteigerung polymerbasierter Hitzeschutzmaterialien besitzen und PF-Systeme in Zukunft ersetzen können. Darüber hinaus wird demonstriert, dass datengetriebene Modelle zu einem tieferen Verständnis der Materialeigenschaften-Ablations-Beziehungen beitragen und damit eine zielgerichtete Entwicklung zukünftiger polymerbasierter ermöglichen. Zukünftige Arbeiten sollen den Datensatz erweitern, nichtlineare Modellansätze evaluieren und die Vorhersagegenauigkeit der Modelle auf weitere Harzsysteme untersuchen.

4. Literaturverzeichnis

- (1) Uyanna, O.; Najafi, H. Thermal Protection Systems for Space Vehicles: A Review on Technology Development, Current Challenges and Future Prospects. *Acta Astronaut.* **2020**, *176*, 341–356. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.06.047>.
- (2) Boghozian, T.; Stackpoole, M.; Gonzales, G. Characterization of New TPS Resins.
- (3) Koo, J.; Bernstein, S.; Pilato, L. A Novel Approach to Investigate Thermal Protection Systems Materials. *Sampe J.* **2024**, *60*, 26. <https://doi.org/10.33599/SJ.v60no2.03>.