

Forschung und Entwicklung als Schlüssel zur Transformation in der Thermoprozesstechnik

Dr. Klaus Buchner

Die Thermoprozesstechnik steht vor globalen Herausforderungen und tiefgreifenden Umbrüchen. Begrenzte Energieressourcen, Effizienz- und Qualitätssteigerung erfordern innovative, nachhaltige Lösungen. Fortschrittliche Verfahren und Digitalisierung verbessern Emissionen, Qualität und Anlagenverfügbarkeit. Forschung und Entwicklung spielen dabei eine zentrale Rolle für die technologische Transformation und nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit.

Industrielle Forschung und Entwicklung ist kein Selbstzweck, sondern eine zentrale Voraussetzung, um im internationalen Wettbewerb bestehen zu können.

Trotz zunehmender Globalisierung bleiben gewisse Industriebereiche von regionalen Rahmenbedingungen geprägt. Dies zeigt sich beispielhaft in der Thermoprozesstechnik an den jeweils eingesetzten Energieträgern zur Beheizung von Industrieöfen. Während in China elektrische Beheizungssysteme aufgrund von Energiekosten und Verfügbarkeit dominieren, kommen in den USA häufig erdgasbefeuerte Anlagen zum Einsatz. Ein Kostenvergleich fossiler Energieträger zwischen verschiedenen Weltregionen verdeutlicht, dass innovative Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz aufgrund ihrer Amortisationszeiten oft nur begrenzte Marktchancen haben – insbesondere bei fehlenden gesetzlichen Emissionsvorgaben.

Energieträgerwahl für Thermoprozessanlagen: Emissionen vs. Verfügbarkeit

Anknüpfend an die Thematik der thermischen Nutzung diverser Energieträger, soll an dieser Stelle die Frage „Wasserstoff – Schlüssel im künftigen Energiesystem?“ aus Sicht der Thermoprozesstechnik betrachtet werden. Grundsätzlich ist grüner Wasserstoff global knapp und kostenintensiv – deutlich weniger als 1 % des globalen Wasserstoffverbrauchs werden durch grünen Wasserstoff abgedeckt [1, 2]. Seine größte kurzfristige Klimawirkung erzielt er in der Substitution von grauem Wasserstoff (Chemie/Raffinerie) und in stoffwandelnden Industrieprozessen (z.B. Stahlindustrie). Zur Veranschaulichung werden nachfolgend Größenordnungen

der CO₂-Einsparung in verschiedenen Anwendungsfeldern dargestellt:

- Stahl (H₂-DRI / EAF): Einsparung typischerweise ~1,5–2,0 t CO₂ je t Stahl gegenüber BF / BOF-Route, abhängig von Strommix und Prozessführung. Pro eingesetzter t H₂ lassen sich 8–12 t CO₂ vermeiden (Bandbreite je nach Anlage und Stromherkunft) [3]
- Grauer H₂ – grüner H₂ in Ammoniak/Raffinerie: ~9–10 kg CO₂ je kg H₂ (ohne CCS) Vermeidung. Bei einer größeren Ammoniak-Anlage (1.000 t H₂/Tag) wären das ~9.000–10.000 t CO₂/Tag [4]
- H₂ als Brenngas zur Prozesswärme (100–400 °C): Im Vergleich zur Stromdirektnutzung ist die CO₂-Vermeidung je kWh Strom aus erneuerbaren Energien um den Faktor ~2–4 geringer, sodass H₂ hier nur bei fehlender Elektrifizierbarkeit sinnvoll ist [5]

Vor diesem Hintergrund gewinnen elektrische Beheizungskonzepte zunehmend an Bedeutung. Während widerstandsbeheizte Tunnelöfen in der Ziegelindustrie oder elektrisch beheizte Glaswannen bislang selten waren, entwickeln sie sich zunehmend zu einer Alternative zu erdgasbasierten Systemen. Vorteile liegen in einer homogenen Temperaturverteilung und der Reduktion lokaler Temperaturspitzen, was insbesondere bei empfindlichen Formlingen die Ausschussrate senkt [6].

Auch die Glasindustrie analysiert verstärkt Potenziale elektrischer Beheizungsformen. Widerstandsheizungen in Glasschmelzwannen, typischerweise realisiert durch Molybdän- oder Graphitelektroden, ermöglichen eine direkte Energieeinbringung in die Glasschmelze [7]. Sie zeichnen sich

durch schnelle Reaktionszeiten auf Laständerungen und eine präzise Steuerbarkeit des Leistungsprofils aus, was eine optimierte Prozessführung erlaubt. Gleichzeitig entfallen Feuchteinträge und Verbrennungsprodukte. Herausforderungen bestehen jedoch in Elektrodenkorrosion (Oxidations- und Auflösungsprozesse), Blasenbildung an Elektrodenoberflächen sowie in der Anpassung der Glaschemie hinsichtlich Leitfähigkeit und Redoxzustand [8].

Neben rein elektrischen Ansätzen werden auch hybride und alternative Beheizungsformen erforscht. Plasmabeheizte Heißgasfackeln – nichtübertragene und übertragene DC-/AC-Lichtbogenbrenner oder induktiv/HF-angeregte Systeme – bieten sehr hohe Leistungsdichten, schnelle Lastfolgen, direkte elektrische Wärmeerzeugung und die Möglichkeit zur Nachrüstung. Demgegenüber sind Elektrodenverschleiß, hoher Kühlaufwand, akustische/elektromagnetische-Emissionen, NO_x -Risiken (gas- und strömungsabhängig) und Netzbelastung zu berücksichtigen. Damit können diese Beheizungsformen als Brückentechnologie zwischen gasbasierten und vollelektrischen Systemen fungieren [9].

Ein weiteres Forschungsfeld betrifft elektrisch induktiv erheizte keramische Wärmetauscher, bei denen ein keramischer Körper über ein induziertes elektromagnetisches Feld auf Temperaturen oberhalb von 1000 °C aufgeheizt wird und ein durchströmender Luftstrom die Wärme auf Industrieöfen überträgt (Bild 1).

Technische Schwerpunkte liegen in der Auslegung der Induktionsfrequenz zur homogenen Volumenheizung, der zyklischen Temperaturwechselbeständigkeit des Keramikträgers, der Minimierung von Druckverlusten sowie der Vermeidung von Hot-Spots. Dieser Ansatz verspricht eine hohe Dynamik bei gleichzeitig guter elektrischer Effizienz.

Parallel dazu wurde die Wasserstoffverbrennung wissenschaftlich umfassend betrachtet. Zahlreiche experimentelle Studien und Simulationen (DNS/LES, detaillierte Kinetik) haben Zündverhalten, Flammenstabilität und Emissionsbildung charakterisiert. Die zentrale Herausforderung liegt weniger im Verständnis als in der Skalierung einer kosteneffizienten und flächendeckenden Versorgung mit grünem Wasserstoff. Aufgrund logistischer Vorteile abseits der Pipelines gewinnt Ammoniak als Energieträger/Carrier zunehmend an Bedeutung. Fortschritte wurden auch bei der NO_x -Minderung erzielt: Für geringere thermische Leistungen wie sie oftmals in der Thermoprozesstechnik vorliegen, gibt es robuste Strategien zur Verbrennungsführung sowie zur Sekundärreduzierung mittels SNCR/SCR. Dennoch verzögern teils unklare politische Rahmenbedingungen die industrielle Implementierung – hier besteht Nachholbedarf.

zienten und flächendeckenden Versorgung mit grünem Wasserstoff. Aufgrund logistischer Vorteile abseits der Pipelines gewinnt Ammoniak als Energieträger/Carrier zunehmend an Bedeutung. Fortschritte wurden auch bei der NO_x -Minderung erzielt: Für geringere thermische Leistungen wie sie oftmals in der Thermoprozesstechnik vorliegen, gibt es robuste Strategien zur Verbrennungsführung sowie zur Sekundärreduzierung mittels SNCR/SCR. Dennoch verzögern teils unklare politische Rahmenbedingungen die industrielle Implementierung – hier besteht Nachholbedarf.

Prozessinnovation am Beispiel der Wärmebehandlung von Brems scheiben

Die EURO-7-Norm [11] verschärft erstmals explizit die Grenzwerte für Bremsenpartikelemissionen. Dadurch rücken Werkstoffmodifikationen und Oberflächentechnologien für Brems scheiben in den Fokus. Sowohl das Nitrocarburieren (FNC) als auch das Laserauftragsschweißen (Laser Cladding) ermöglichen signifikante Emissionsminderungen.

Ferritische Nitrocarburierung (FNC)

Der FNC-Prozess ist eine thermochemische Diffusionsbehandlung bei 540-590 °C und erzeugt eine Verbindungsschicht ($\epsilon\text{Fe}_{23}\text{N}/\gamma'\text{Fe}_4\text{N}$) im μm Bereich und eine C, N angereicherte Diffusionszone mit Fe_3C /NitridAusscheidungen. Diese Schichten verbessern die Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit von Graugussbrems scheiben deutlich. Studien zeigen, dass die Partikelemission gegenüber unbehandelten Scheiben signifikant verringert werden kann [12], sodass die EURO-7-Normvorgaben eingehalten werden können. Der geringere Reibverschleiß führt gleichzeitig zu stabileren Reibkoeffizienten und einer reduzierten Scheibenoxidation unter feuchten Bedingungen. Als Vor- und Nachteil sind dabei folgende Punkte anzusehen:

- Hohe Kosteneffizienz, da die Behandlung in etablierten Gas- oder Plasmaanlagen mit vergleichsweise geringem Energiebedarf erfolgt. Die Prozesskosten liegen häufig im Bereich weniger Euro pro Scheibe.
- Hohe Prozessstabilität und industrielle Reife: FNC ist weit verbreitet, gut qualifizierbar und bereits millionenfach im Einsatz, etwa bei „Low-Emission Brake Discs“ großer OEMs.
- Geringe Schichtdicke (~10-30 μm): Keine signifikante Änderung der Scheibendimensionen, kompatibel mit bestehenden Reibbelägen.
- Begrenzte Hochtemperaturbeständigkeit: Bei Dauertemperaturen >600 °C kann es zu Schichtzerfall und verminderter Verschleißleistung kommen, vor allem bei Hochleistungsbremungen.
- Korrosionsschutz unter Extrembedingungen geringer als bei dickeren Hartstoffschichten.

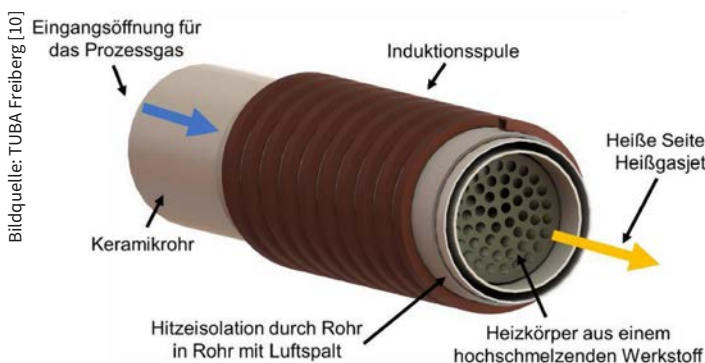


Bild 1: Thermo-Jet

Bildquelle: TUBA Freiberg [10]



Bild 2: Thermoprozessanlage für den FNC-Prozess von Bremsscheiben

- Relative Empfindlichkeit gegenüber Chloriden: Im Winterbetrieb kann die Schutzwirkung moderat zurückgehen.

Laserauftragsschweißen (Laser Cladding)

Beim Laser Cladding wird eine metallische / keramische Hartstofflegierung (z. B. Ni- oder Co-Basierte Matrix mit Karbiden) lokal aufgeschmolzen und als hochverschleißfeste Schicht (typisch 150-300 µm) auf die Bremsscheibe aufgebracht. Aufgrund der hohen Härte und Strukturhomogenität reduzieren sich Partikelemissionen um bis zu 80-95 % [13]. Die Technologie ist besonders für Fahrzeuge mit hohen thermischen Lasten attraktiv, wobei sich folgende Vor- und Nachteile ergeben:

- Sehr hohe Verschleiß- und Temperaturbeständigkeit: Die Schichten widerstehen Dauerlasten über 700-800 °C und bieten damit deutlichen Vorteil in High-Performance-Applikationen.
- Exzellenter Korrosionsschutz dank dicker, chemisch beständiger Hartstofflage.
- Nahezu eliminiertes Eisenoxidabrieb, der maßgeblicher PM10-Beitrag klassischer Bremsscheiben ist.
- Hohe Kosten: Der Prozess ist energieintensiv, zeitaufwendig und erfordert teure Legierungspulver. Typisch liegen die Kosten um ein Vielfaches über FNC.
- Größere Schichtdicke führt zu höherem Rotorgewicht, sofern nicht kompensiert.
- Komplexere Fertigungskette, inkl. Vorbehandlung, Nachbearbeitung und Qualitätsprüfung.

Zusammenfassend stellt der FNC-Prozess eine kostengünstige und großserienfähige Lösung dar, mit der die EURO-7-Grenzwerte für typische Pkw-Anwendungen erfüllt werden können. Für OEMs in der Massenproduktion ergibt sich daraus ein attraktives Verhältnis zwischen Emissionsreduktion und Herstellkosten; *Bild 2* zeigt eine industrielle Ausführung.

Durch innovative Ansätze, etwa durch den modifizierten Nachoxidationsprozess [14], lässt sich das Korrosionsverhalten signifikant verbessern. Dies konnte sowohl im ASTM B117 Salzsprühstest [15] als auch im SAE J2334 Zyklischer Korrosionstest [16] nachgewiesen werden: Nach 36 Zyklen (≈ 2,25 Jahre Betriebsdauer) war die unbehandelte Bremsscheibe vollständig korrodiert, während die konventionell nachoxidierte Vergleichsscheibe (Bezeichnung FNC-ONC) eine Oberflächenkorrosion von ca. 30–35 % zeigte. Der optimiert nachoxidierte Teil (Bezeichnung FNC-Smart-ONC) wies weniger als 1 % Korrosion auf (*Bild 3*). [14]

Laser Cladding hingegen erreicht die höchste Emissionsminderung und übertrifft die geforderten Grenzwerte deutlich, ist jedoch mit erheblich höheren Kosten verbunden und daher primär für Premium- und Hochleistungsfahrzeuge mit erhöhtem thermischem Belastungsprofil geeignet.

Digitalisierung im Bereich der Thermoprozesstechnik

Schlagwörter wie „Künstliche Intelligenz“ oder „Digitaler Zwilling“ sind allgegenwärtig – häufig ist jedoch unklar, was sich tatsächlich dahinter verbirgt. Entscheidend ist, wie

digitale Technologien gezielt eingesetzt werden können, um Ressourcen zu schonen und Prozesse nachhaltig zu optimieren.

Mathematische Optimierungstools leisten einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Produktionsauslastung entlang industrieller Wertschöpfungsketten. Die stetig zunehmende Produkt- und Variantenvielfalt führt zu komplexen Fertigungsstrukturen, die mit rein heuristischen oder erfahrungsbasierten Methoden oft nicht mehr effizient planbar sind. Ein zentraler Vorteil liegt in der Abbildung komplexer Restriktionen wie Schichtmodelle, Maschinenkalender, rüstabhängige Abläufe, Losgrößen oder stochastische Einflussgrößen wie variable Bearbeitungszeiten und Ausfallwahrscheinlichkeiten [17]. Moderne Mixed-Integer-Programming-Solver (MIP-Solver) wie Gurobi oder CPLEX lösen solche Modelle selbst bei großen Instanzen in akzeptablen Rechenzeiten und liefern optimale bzw. nahezu optimale Belegungsvorschläge. Unternehmen erreichen dadurch eine Erhöhung der Durchsatzleistung, reduzierte Stillstandszeiten und eine gesteigerte Termintreue, da Fertigungsszenarien proaktiv gegeneinander verglichen werden können.

Dass diese Ansätze auch im industriellen Alltag Anwendung finden, zeigt das Beispiel einer mittelständischen Härtereier mit 48 gasbeheizten Industrieöfen und einem täglichen Durchsatz von rund 250 Tonnen. Durch den Einsatz entsprechender Optimierungslösungen konnten jährliche Einsparungen von etwa 800 MWh Erdgas bzw. 150 Tonnen CO₂ erzielt werden – bei gleichzeitig reduziertem Planungsaufwand und erhöhter Transparenz. Dies ermöglicht eine schnelle Amortisation der digitalen Investition. [18]

Ein noch großer Aufholbedarf besteht im Bereich der Thermoprozesstechnik in der Implementierung von Anomalieerkennungssystemen für Prozessdaten. Diese Systeme sind ein zentraler Bestandteil moderner Qualitätssicherungs- und Condition-Monitoring-Konzepte und bieten erhebliches Potenzial für vorausschauende Instandhaltung in einem integrierten Ansatz: Mithilfe statistischer Verfahren und

Machine-Learning-Methoden wie Isolation-Forest-Algorithmen oder Autoencoder-Netzwerke lassen sich Musterbrüche, atypische Zustände oder frühe Prozessabweichungen zuverlässig identifizieren [19]. Diese datenbasierte Früherkennung ermöglicht es, Qualitätsabweichungen nicht erst im Endprodukt, sondern bereits während des laufenden Prozesses sichtbar zu machen und damit Ausschuss sowie Nacharbeit signifikant zu reduzieren. Statt fixer Grenzwerte nutzen moderne Modelle die multivariate Analyse von Temperatur- und C-Pegel-Daten, Nitrierkennzahlen oder Vibrationsignalen, um komplexe Zusammenhänge zu erfassen und beginnende Fehlfunktionen frühzeitig zu identifizieren. Dies verbessert sowohl die Diagnosegüte als auch die Betriebssicherheit, da kritische Trends vor Eintritt eines tatsächlichen Schadens erkannt werden können [20]. Gleichzeitig entsteht durch die kontinuierliche Datenerfassung ein detailliertes Zustandsbild der Anlage über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg.

Trotz des hohen Potenzials der Anomalieerkennung in der Predictive Maintenance, erschweren heterogene Datensysteme der Thermoprozesstechnik die Verknüpfung historischer Betriebsdaten mit Echtzeit-Analysen. Dadurch sind belastbare Prognosen zu Restlebensdauer und Ausfallwahrscheinlichkeiten nur eingeschränkt möglich – obwohl eine optimierte, bedarfsgerechte Wartung die Anlagenverfügbarkeit steigert und Betriebskosten signifikant senken könnte.

Fazit

Die industrielle Forschung und Entwicklung liefert Lösungsansätze für die Herausforderungen der Thermoprozesstechnik – von ressourcenschonender Beheizung über die Optimierung und Neukonzeption von Prozessen bis zur Einführung digitaler Modelle zur Reduktion von Energieverbrauch, Ausschuss und Stillstandszeiten. Dadurch steigen Produktivität und Flexibilität. Pilotanwendungen zeigen, dass modellprädiktive Regelungen, datenbasierte Zustandsdiagnosen und virtuelle Inbetriebnahmen bereits breit einsetzbar sind. Gleichzeitig bremsen unzureichende politische Rahmenbedingungen und regulatorische Unsicherheiten die Implementierung.

Umso wichtiger ist es, dass Unternehmen und Forschung aktiv handeln: Pilotprojekte wagen, Datenkompetenz und Interoperabilität stärken, Best Practices teilen, Qualifikationslücken schließen und branchenübergreifende Kooperationen formen. Parallel gilt es, robuste Metriken für Energieeffizienz, Emissionen und Lebenszykluskosten zu etablieren. So werden technische Lösungen skaliert, Pfadabhängigkeiten überwunden und die Transformation industriell wie gesellschaftlich nachhaltig voranzutreiben.

Bildquelle: Nitrex



Bild 3: SAE J2334 nach 36 Zyklen - links: FNC-ONC (30–35 % Korrosion) vs. rechts: FNC-Smart-ONC (1 % Korrosion) [14]

Abkürzungsverzeichnis**DRI / EAF:** Direct Reduced Iron / Electric Arc Furnace**BF / BOF:** Blast Furnace / Basic Oxygen Furnace**CCS:** Carbon Capture and Storage**SNCR/SCR:** Selective Non-Catalytic Reduction / Selective Catalytic Reduction**AC / DC:** Alternating Current / Direct Current**OEM:** Original Equipment Manufacturer**FNC:** Ferritic NitroCarburizing**DNS / LES:** Direct Numerical Simulation / Large-Eddy Simulation**Literatur**

- [1] International Energy Agency. (2024). Global hydrogen review 2024: Progress summary dashboard. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/progress-summary-dashboard>
- [2] Power Technology. (2026). Green hydrogen to command 88.6% share of low-carbon production by 2030. Power Technology <https://www.power-technology.com/analyst-comment/green-hydrogen-command-low-carbon-production-2030>
- [3] International Energy Agency. (2020). Iron and steel technology roadmap (p. 86). https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf
- [4] International Energy Agency. (2019). The future of hydrogen: Seizing today's opportunities. International Energy Agency <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [5] International Energy Agency. (2022). The future of heat pumps. IEA. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>
- [6] Schweiger, W. (2019). Elektrische Beheizungssysteme für keramische Industrieöfen. Wiley-VCH.
- [7] Pfeifer, H. (2020). Thermische Verfahrenstechnik in der Glasindustrie. Elsevier.
- [8] Schillinger, W. (2014). Elektrobeheizte Glasschmelzwannen – Stand und Entwicklung. Glastechnische Berichte / Glass Science and Technology.
- [9] Dawsey, R. (2022). High temperature plasma technologies for industrial furnaces. Springer.
- [10] Ennen, M., et al. (2025). Development of a thermojet for processing metals using induction heating. In Proceedings of the 10th International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing (Hannover, Germany, September 15–17, 2025).
- [11] Verordnung (EU) 2024/1257 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. April 2024 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Motoren sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten hinsichtlich ihrer Emissionen und der Dauerhaltbarkeit von Batterien (Euro 7). Amtsblatt der Europäischen Union.
- [12] Parks, J. (2021). Nitriding and nitrocarburizing for wear reduction in cast iron brake discs. Journal of Materials Engineering.
- [13] Kim, S. (2020). Laser cladding technologies for high performance brake rotors. Springer.
- [14] Nousir, S., & Winter, K.-M. (2024). Smart post-oxidation of FNC brake rotors: An innovative technology to enhance corrosion and braking performance. In EuroBrake 2024 Conference Proceedings (EB2024-CMT-019).
- [15] ASTM International. (2019). ASTM B11719: Standard practice for operating salt spray (fog) apparatus. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://www.astm.org/Standards/B117.htm>
- [16] SAE International. (2016). SAE J2334_201604: Laboratory cyclic corrosion test. Warrendale, PA: SAE International. https://doi.org/10.4271/J2334_201604
- [17] Baker, K. R. (2021). Introduction to sequencing and scheduling. Wiley.
- [18] Digitale Intelligenz macht Wärmebehandlung effizienter. (2026). Der Wärmebehandlungsmarkt, 32, 12–13.
- [19] Chandola, V., Banerjee, A., & Kumar, V. (2009). Anomaly detection: A survey. ACM Computing Surveys, 41(3), 1–58. <https://doi.org/10.1145/1541880.1541882>
- [20] Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics. Mechanical Systems and Signal Processing, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>

AUTOR**Dr. Klaus Buchner**

Head of Research and Development
 Aichelin Holding GmbH
 +43 2236 23646 384
klaus.buchner@aichelin.com