

# Ultra-saubere und effiziente Wärmeerzeugung, Rekuperation und Wärmeabstrahlung in intelligenten makrozellularen Verbrennungsreaktoren

## InverUltra

**Projekt:** Ultra-saubere und effiziente Wärmeerzeugung, Rekuperation und Wärmeabstrahlung in intelligenten makrozellularen Verbrennungsreaktoren (InverUltra)

**Laufzeit:** 01.01.2015 bis 30.04.2018

**Gesamtprojektkosten:** 250.000,00 €

**Davon Förderung:** 250.000,00 €

Die flammenlose Verbrennung im Porenbrenner, ist eine moderne Verbrennungstechnik, die gegenüber der konventionellen Freiraumverbrennung signifikante Vorteile aufweist: Niedrige Schadstoffemissionen, hohe Strahlungsleistung und ein breites Spektrum an Leistungsmodulationen sind die herausragenden Merkmale dieser Verbrennungstechnik. Bei der flammenlosen Verbrennung läuft die Verbrennungsreaktion eines vorgemischten Brennstoff-Luft-Gemisches in einer porösen Struktur (Verbrennungsreaktor) und nicht mit einer offenen Flamme ab.

Das Forschungsprojekt InverUltra hat die Möglichkeiten und Grenzen dieser innovativen Verbrennungsmethode analysiert und dabei neue, optimale Verbrennungsreaktorarchitekturen zur Realisierung eines effizienten und emissionsarmen Wärmeerzeugers/Wärmestrahlers für industrielle Anwendungen entwickelt.

## Ziele

Ziel des Vorhabens war es, die Erforschung und Entwicklung der optimalen Verbrennungsreaktorarchitektur zur Realisierung eines effizienten und emissionsarmen Wärmeerzeugers (Verbrennung), Wärmerekuperators (Wärmeakkumulation) und Wärmestrahlers (Emitter) in einem für verschiedene industrielle Anwendungen vorgesehenem Verbrennungssystem. Das Vorhaben basierte dabei auf der Verbrennung in dreidimensionalen hochporösen makrozellularen deterministischen Hochtemperatur-Reaktoren.

## Projektverlauf

Die zentrale Aufgabe des Projekts beinhaltete die Erforschung und Optimierung thermo-physikalischer Prozesse, die zur Wärmeerzeugung im Reaktor und zur optimalen Wärmestrahlung notwendig sind.

Die Konzeption und Auslegung des Laborsystems zur Realisierung aller relevanten physikalischen und thermodynamischen Prozesse für die Wärmeerzeugung und Wärmeentkopplung im Verbrennungsreaktor erfolgte im ersten Schritt des Projekts. Ein Laborsystem mit Variabilität der Betriebsbedingungen sowie Nutzung verschiedener Reaktorarchitekturen mit ausführlicher Messtechnik wurde konzipiert, ausgelegt und gebaut. Die wesentlichen Bestandteile bildeten dabei ein Schienensystem mit angebauter Abgassonde, der Reaktorkopf, die Steuerung

## Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Mirosław Weclas / Prof. Dr.-Ing. Martin Cichon

Institut für Fahrzeugtechnik (IFZN)

Technische Hochschule Nürnberg

Georg Simon Ohm

und die Gas- und Luftregelstrecke. Nach Aufbau des Prüfstandes wurde ein breites Spektrum an Parametern gemessen und verschiedene Testbedingungen untersucht, wie unter anderem Kaltstart des Reaktors, Wärmespeicherung, Reaktortemperatur, Prozessdynamik, obere und untere Leistungsgrenzen (Leistungsdynamik), Verbrennungsstabilitätsgrenze nach Luftzahl und Leistung, Strahlungsenergie und Intensitätsverteilung und Abgaskomponenten.

Die Zuführung des Brennstoffes (Erdgas) findet unterhalb des Strahlungsbereiches des Brennerkopfes statt, welches über die Gasleitung zugeführt wird. Die Komponenten des Durchflussmessers und des Durchflussreglers bilden gemeinsam die Gasregelstrecke und können so den gewünschten Gasvolumenstrom im Bereich von 0,6 bis 33 l/min einregeln. Nach dem Durchflussregler mündet die Gasleitung im Gasanschluss des Radialventilators. Der Radialventilator ermöglicht es, durch den direkten Gasanschluss die Gemischbildung schon innerhalb des Ventilators durchzuführen, so dass die für die Verbrennung benötigte Luft schon am Auslass des Ventilators mit dem Gas vermischt ist.

Für die Durchführung experimenteller Untersuchungen unter automatisierten, reproduzierbaren und kontrollierbaren Testbedingungen, wurde ein Steuerungs-/Regelungs-Modell erstellt. So galt es, eine Betriebsstrategie für den Brenner, Zünden und Überwachen des Brenners sowie die Steuerung der Leistung zu entwickeln und eine entsprechende Simulation der Steuerung von mehreren Modulen durchzuführen. Die Steuerung und Regelung einer oder mehrerer Reaktormodule und der Programmablauf der Steuerung erfolgte mit Hilfe der Entwicklungstools von National Instruments (NI).

Im Vordergrund der verwendeten Messtechnik stand die Brennersteuerung (NI-cRIO). Die Brennersteuerung ist das „Herz“ des Laborsystems in dem fast alle messtechnischen Komponenten zusammenlaufen. Über eine Ethernet-Schnittstelle werden die Daten mit dem Messrechner verbunden. Dort wurde mit Hilfe des Programms „NI-LabVIEW“ eine Bedienungsfläche erstellt, die es erlaubt, den Prüfstand in Echtzeit zu steuern.

Im nächsten Projektschritt erfolgte die Auslegung der makrozellularen Reaktoren. Um eine optimale Durchführung von allen physikalischen, thermodynamischen und chemischen Prozessen in Verbrennungsreaktoren zu gewährleisten und die zu erwartenden Prozesseigenschaften zu erreichen, galt es, vorerst die Verbrennungsreaktorarchitektur zu untersuchen und anschließend auszulegen. Dazu wurden zwei keramische Varianten bestimmt, welche in CAD-Programm konzipiert wur-

den. Die Einsetzbarkeit der makrozellularen Reaktoren sollte dabei so flexibel wie möglich gestaltet werden. Am Institut für Glass und Keramik der Friedrich-Alexander-Universität (FAU) Erlangen erfolgte dann die Herstellung. Final wurde eine rechteckige Struktur mit 2 x 3 x 4 Poren entwickelt (siehe Abbildung 1). Die kubische Form der Poren ist dabei Namensgeber der makrozellularen Reaktoren, der „Cubes“ (engl. Würfel).



Abb.1: Cube-Reaktor: fertige makrozelluläre Strukturen aus Keramik

Zur Steigerung der Brennerstrahlungsleistung wurden zwei neue Reaktor-Geometrien entwickelt. Diese wurden ebenfalls zuerst in CAD definiert und anschließend durch die FAU gefertigt. Die Prozesseigenschaften wurden daraufhin optimiert und zwei Prototypen der sogenannten „Flächenstrahler Reaktoren“ an der FAU produziert (siehe Abbildung 2).

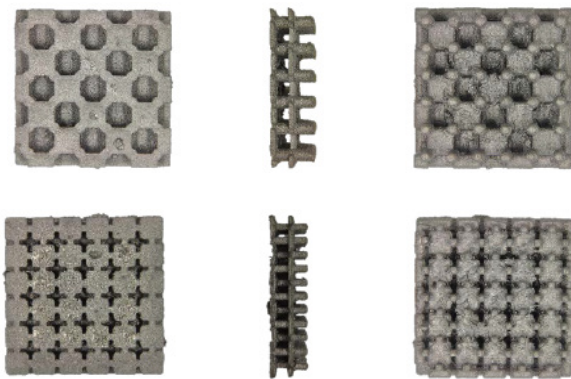


Abb.2: Drauf-, Seiten und Untersicht Prototyp 1 (oben) und Prototyp 2 (unten)

Im weiteren Projektverlauf wurden Betrachtungen am Grundsystem ohne Reaktor durchgeführt. Diese sollten nachweisen, dass ein homogenes Gemisch und konstante Zuführbedingungen, wie homogene Gemischverteilung vorliegen. Da die Flammensperre für alle Reaktoren gleiche Zuführbedingungen schaffen soll, wurde sie vorab mit Hilfe von Messungen der Leistungsgrenzen gesondert untersucht. Die Flammensperre ist eine Sicherheitsarmatur, um einen FlammenRückschlag in die Mischstrecke zu verhindern und somit ein wichtiger Bestandteil des Verbrennungssystems.

Für die Bewertung der strömungsmechanischen Eigenschaften der Reaktoren wurden der Staudruck und die Péclét Zahl (Wert für Wärmetransport) als charakteristische Größen herangezogen. Der Staudruck sollte Aufschluss darüber geben, wie sich die Reaktor-Geometrie auf die Strömungsmechanik innerhalb des Verbrennungsreaktors und somit auf den Verbrennungsprozess an sich auswirkt. Dabei ging hervor, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Gebläsedrehzahl und dem Gemischdurchfluss besteht.

Anschließend folgten Versuche zur Verbrennung im Referenzreaktor in Form eines Metall-Schaumreaktors. Es war festzustellen, dass sich diese für die Anwendung im Hochtemperatur-Bereich nicht eignen. Schon nach kurzer Betriebszeit von etwa fünf Minuten im unteren Lastbereich wurden glimmende Partikel im Abgasstrom sichtbar. Bei der darauffolgenden Untersuchung des Reaktors zeigte sich, dass der Metallschaum

teilweise geschmolzen ist und seine mechanische Stabilität verloren hat. Zudem war die Flamm Sperre – durch das Aufschmelzen der Reaktorstruktur – komplett zerstört. Deswegen wurden die Metallschaum-Reaktoren nicht mehr länger für weitere Analysen berücksichtigt und es wurde zudem ein neuer, kleinerer Brennkopf konzipiert. Danach galt es, die vom Reaktor emittierende Wärmestrahlung zu ermitteln, wofür eine Thermokamera am Prüfstand installiert wurde. Hierfür wurden unterschiedliche Betriebspunkte des Brenners aufgenommen.

Die letzten Tests konzentrierten sich auf die Verbrennung und das resultierende Verhalten der verschiedenen Reaktorvarianten. Beleuchtet wurden dabei drei Varianten der Cube Reaktoren PH2 mit 22 mm Höhe, PH3 mit 33mm Höhe und PH4 mit 44 mm Höhe sowie die Prototypen 1 und 2 der Flächenstrahler Reaktoren.

## Ergebnisse

Während des Projektverlaufs stellte sich heraus, dass die makrozellularen Verbrennungsreaktoren in den meisten Disziplinen hinter der Erwartung zurückblieben. Die definierte Neu-Konstruktion der Reaktor-Geometrie (Prototyp 1 und 2) zielte auf die Ausweitung des Wärmestrahlungspotenzials aus dem Brenner ab. Die Gestaltung der Reaktoroberfläche sollte die Abstrahlung begünstigen. Im Versuch zeigte sich, dass dieser theoretische Ansatz in der Praxis nicht umsetzbar war. Die Wärmeleitung des Keramikmaterials war bei Betriebstemperatur zu gering, um einen höheren Wärmestrom zur Oberfläche zu ermöglichen. So stieg die Temperatur der Abgase bei den Prototyp Reaktoren im Versuch weiter an als die Oberflächentemperatur, wodurch die Strahlungsemission begrenzt wurde. Diese Begrenzung führte dazu, dass die Prototypreaktoren durchschnittlich nur circa 60 % der vom etablierten Schaumreaktor emittierten Wärmestrahlung ausgeben konnten. Besser schnitten hier die Cube Reaktoren mit circa 70% der Wärmestrahlung des Referenzreaktors ab.

Die Betrachtung des Strahlungswirkungsgrades lieferte interessante Erkenntnisse: Für eine möglichst effiziente Umwandlung der zugeführten Heizleistung sollte der Brenner vorzugsweise mit stöchiometrischem Luftverhältnis und geringer Brennerleistung betrieben werden. Damit ließe sich beim Siliciumcarbid-Schaum ein Strahlungswirkungsgrad von mehr als 45 % umsetzen. Auch die Prototypen bestätigen diesen Trend zur maximalen Strahlungsausbeute bei unterer Teillast, jedoch liegt der Strahlungswirkungsgrad hier bei nur 28 %, für die Cube Reaktoren bei 39 %. Gemäß dieser Erkenntnis sollte die Leistungsmodulation der Brenner im strahlungsrelevanten Einsatz vorzugsweise über zuschaltbare Brennerflächen umgesetzt werden als über die Regelung der lokalen Brennerleistung.

Ergänzend wurden auch Untersuchungen zum Strömungswiderstand der Strukturen durchgeführt. Diese zeigten, dass die Prototypen einen zu großen Strömungswiderstand aufweisen. Beim Prototyp 2 verdoppelte sich der Staudruck im Brenner. Im Betrieb würden dadurch die Energiekosten für den Antrieb des Lüfters sowie die akustische Emission des ansonsten leisen Brenners ansteigen. Die Cube-Strukturen zeigten aufgrund der großen Porengröße einen ähnlichen Strömungswiderstand wie der Referenzreaktor.

Während der Prozessanalyse der Rolle der Reaktorstruktur mit den Cube-Reaktoren konnte analysiert werden, wie sich die eigentliche Verbrennungsreaktion innerhalb des Verbrennungsreaktors während der Leistungsmodulation innerhalb

der Reaktorstruktur verschiebt. So wurde deutlich, dass im unteren Lastbereich die eigentliche Verbrennung im unteren Bereich des Reaktors stattfindet, nahe der Flammensperre. Mit steigender Flächenlastanforderung verschiebte sich die Verbrennungsreaktion immer weiter in die Reaktormitte. Im mittleren Lastbereich von etwa 500 kW/m<sup>2</sup> bis 2500 kW/m<sup>2</sup> stabilisierte sich die Verbrennungsreaktion. Erst mit Erreichen der oberen Leistungsgrenzen begann dann das rapide Auskühlen des Reaktors, wenn die Verbrennungsreaktion nicht mehr in der Reaktorstruktur gehalten werden konnte. Einzig bei dem PH4-Cube-Reaktor ließ sich das Auskühlen des Reaktors noch nicht beobachten, jedoch stieß dieser bei einer weiteren Flächenlasterrhöhung an die Grenzen der thermischen Stabilität des Verbrennungsreaktors.

Auf der Grundlage der Projektergebnisse wurde ein neues Konzept eines effizienten und emissionsarmen Wärmeerzeugers-Wärmestrahlers auf der Basis der deterministischen Reaktorarchitekturen erstellt und realisiert. Die Optimierung des Reaktors wurde gemäß folgenden Kriterien durchgeführt:

- Größere Porengröße, um eine Verbrennungsreaktion innerhalb des Reaktors zu ermöglichen. Bei zu kleiner Porengröße kann keine Verbrennungsreaktion im Reaktor stattfinden und die Gefahr besteht, dass bei entsprechender Materialdicke der Staudruck zu hoch wird.
- Richtige Wahl der Steg- und Oberflächendicke, so dass die Wärmeleitung innerhalb des Reaktors in die Bereiche der Strahlungsoberfläche begünstigt und nicht verhindert wird.
- Wahl des Reaktorwerkstoffs, da dieser grundlegend verantwortlich ist für die Wärmeleitung und die Wärmebelastbarkeit des Reaktors während des Betriebes und die damit verbundenen Strahlungseigenschaften.

---

Projektleiter  
Prof. Dr.-Ing. Martin Cichon  
Telefon: 0911/ 5880-1346  
E-Mail: martin.cichon@th-nuernberg.de

Institut für Fahrzeugtechnik (IFZN)  
Technische Hochschule Nürnberg  
Georg Simon Ohm

[www.th-nuernberg.de](http://www.th-nuernberg.de)

## Fördergeber

Bayerisches Staatsministerium für  
Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst



## Projektpartner aus der Wissenschaft

**FAU** FRIEDRICH-ALEXANDER  
UNIVERSITÄT  
ERLANGEN-NÜRNBERG

**TH** TECHNISCHE HOCHSCHULE NÜRNBERG  
GEORG SIMON OHM

## Projektpartner aus der Industrie

Promeos GmbH