



Regeneratoren als Hochtemperaturspeicher – Industrielle Anwendungen

Prof. Dr.-Ing.
Christian Streuber
Fachhochschule Wiesbaden,
Fachbereich Maschinenbau
streuber@maschinenbau.
fh-wiesbaden.de

1. Einleitung

Regeneratoren sind diskontinuierlich arbeitende Wärmeübertrager bzw. Wärmetauscher. Sie werden im industriellen Bereich im Wesentlichen bei hohen Temperaturen eingesetzt. Zu einem kontinuierlichen Betrieb sind mindestens zwei Regeneratoren notwendig. Diese Regeneratoren können als Wärmespeicher und dann auch einzeln eingesetzt werden. Im Folgenden wird erläutert, wie Regeneratoren in der Industrie eingesetzt werden und wie eine Übertragung auf das Gebiet Speicherung ermöglicht werden könnte.

2. Regeneratoreinsatz / Anwendungen

In der Regel werden Regeneratoren anstelle von Wärmeübertragern in der Industrie eingesetzt, wo aus Materialgründen ein metallischer Wärmeübertrager nicht mehr betrieben werden kann. Kennzeichen für den Regeneratoreinsatz sind somit häufig in mehrfacher Kombination:

- Hohe Temperaturen
- Hohe Drücke bzw. Druckdifferenzen zwischen den beiden Fluiden
- Große Fluidströme

Folgende Beispiele können als Regeneratoren genannt werden:

- Winderhitzer am Hochofen zur Heißwinderzeugung

- (Brennluft bzw. Sauerstoff zur Reaktion im Hochofen;
hohe Temperatur und hoher Druck)
- Regenerator an einer Glaswanne zur Brennluft-Vorwärmung
 - Regenerator am Koksofen
 - Luftvorwärmung im Kraftwerk (Ljungström)

Die Technologie der Regeneratoren ist dabei bekannt und entspricht dem Stand der Technik. Aus den Industriebereichen erkennt man, dass es sich im Wesentlichen um einen Einsatz in der Schwerindustrie handelt.

Kleine Regeneratoren werden häufiger auch in sogenannten Regeneratorbrennern eingesetzt. Eine regenerative Nachverbrennung von Schadstoffen wird durchgeführt, da dabei die Temperaturen hoher Abgase direkt wieder zur Vorwärmung ausgenutzt werden können.

Ein typisches Beispiel eines Winderhitzers mit außenstehendem Brennschacht ist in *Abb. 1* dargestellt.

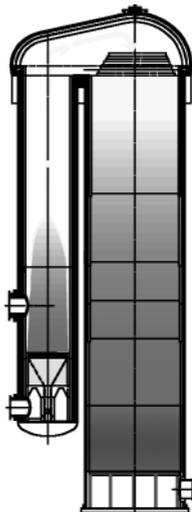


Abbildung 1
Winderhitzer mit
außenstehendem
Brennschacht [1]

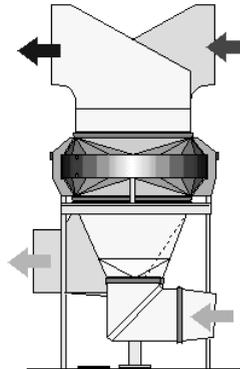
Einige Daten zu Winderhitzeranlagen sind in *Tab. 1* zusammengefasst.

Tabelle 1
Typische
Winderhitzerdaten

	Einheit	ROGESA Dillingen Hochofen 5	Thyssen Krupp Stahl AG, Schwelgern Hochofen 2
Prozesslufttemperatur	°C	1.350	1.350
Prozessluftdruck	bar absolut	6,5	5,5
Heißwindmenge	Nm ³ /h	280.000	480.000
Kuppeltemperatur	°C	1.450	1.450
Brenngasvorwärmung	°C	220	200
Brennluftvorwärmung	°C	550	200

Ein Beispiel für einen Glasschmelzofen mit Regenerator ist in *Abb.2* dargestellt.

Abbildung 2
Glasschmelzofen [2]



Vergleichend sind einige Daten von verschiedenen Regeneratortypen in *Tab. 2* zusammengestellt, bei denen insbesondere auf die Besatz- bzw. Speicherdaten Wert gelegt wurde.

	Einheit	Winderhitzer am Hochofen Prozessluft- erzeugung	Regenerator an einer Glas- wanne Brenn- luftvorwärmung
Anzahl Regeneratoren	-	3	2
Besatzgewicht je Regenerator	t	3.260	175
Besatzvolumen je Regenerator	m ³	2.000	180
Heißluftmenge	Nm ³ /h	300.000	100.000
Heißlufttemperatur	°C	1.300	1.350
Kaltlufttemperatur	°C	200	20
Kaltluftdruck	bar absolut	5	1
Leistung	GJ/h MW	500 140	19 5,3
Spezifische Anlagenkosten	DM/kW	650	660

Tabelle 2
Besatz- und
Speicherdaten zu
Regeneratoren

Insbesondere zur Brennluftvorwärmung werden sehr häufig rotierende Wärmeübertragermassen eingesetzt (Ljungström-Wärmeübertrager). Hierzu ist ein Beispiel in *Abb. 3* (Rotor System der Firma Rothemühle) in einer Prinzipskizze dargestellt.

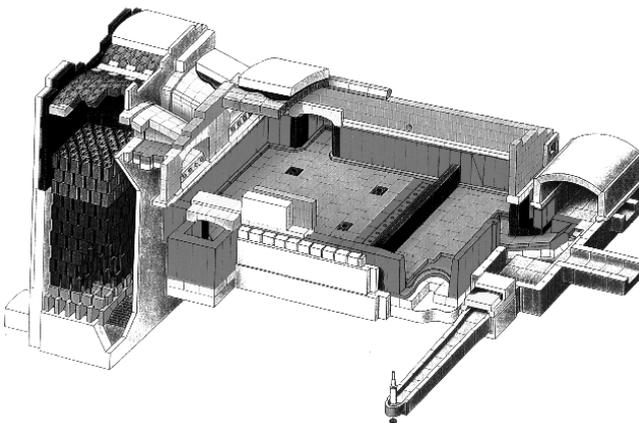


Abbildung 3
Ljungström-
Wärmeübertrager [3]

Regeneratoren werden in der Industrie selten als Wärmespeicher eingesetzt. So kann man mit Hilfe eines Regenerators jedoch bei Batchprozessen mit diskontinuierlich anfallender Wärme hoher Temperatur die Abwärme recht gut nutzen. Ebenso gibt es Temperaturpuffer bei sehr wechselnden Abgastemperaturen zum Temperatenausgleich.

Insgesamt wurde in verschiedenen Studien und Forschungsvorhaben Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnis ist, dass Regeneratoren auch in der solaren Kraftwerkstechnik als Speicher eingesetzt werden können. Dies bietet sich insbesondere bei Solarturmkraftwerken an, um eine Zeitspanne nach Sonnenuntergang oder bei Wolken zu überbrücken. Prinzipiell ist eine Überbrückung der gesamten Nacht denkbar, aber zum jetzigen Zeitpunkt sicherlich nicht sinnvoll im Sinne der hohen Investitionskosten.

3. Regeneratorbetrieb

Die Einsatztemperaturen bei Regeneratoren sind unterschiedlich. Hochtemperatur sei hier so definiert als eine Temperatur größer 500 °C. Die Grenzen sind jedoch fließend. Die maximale Temperatur bei Regeneratoren liegt zur Zeit in der Größenordnung von 1500 °C.

Die Einsatztemperaturen am Austritt eines Rekuperators oder Regenerators werden in *Tab. 3* zusammengefasst.

Tabelle 3
Austrittstemperaturen an
Rekuperatoren /
Regeneratoren

Bauart	Austrittstemperatur zum Beispiel Brennluft
Stahl – Rekuperator	700 °C
Keramischer Rekuperator	1.000 °C
Regenerator (keramisch)	1.300 °C

In *Abb. 4* ist der Energieverbrauch verschiedener Prozessanlagen in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur aufgetragen [4]. Man kann ersehen, dass ca. 2/3 der Gesamtenergie auf den Bereich Hochtemperatur entfällt. Insbesondere der Prozesstemperaturbereich 1200 °C bis 1500 °C ist dabei von besonderer Bedeutung. Gerade dieser Bereich wird durch Regeneratoren abgedeckt (zum Beispiel in der Stahlindustrie). Insofern kommt der Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet durchaus Bedeutung zu, jedoch ist gerade der Schwerindustriebereich in der Regel relativ konservativ, insbesondere wenn es funktionierende, bewährte Technologien gibt.

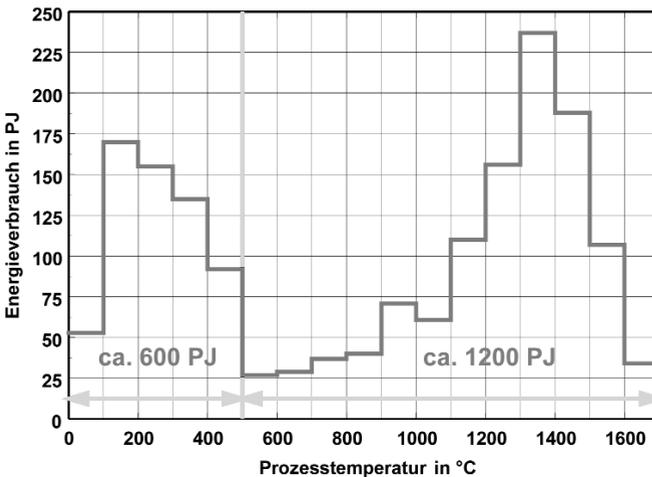
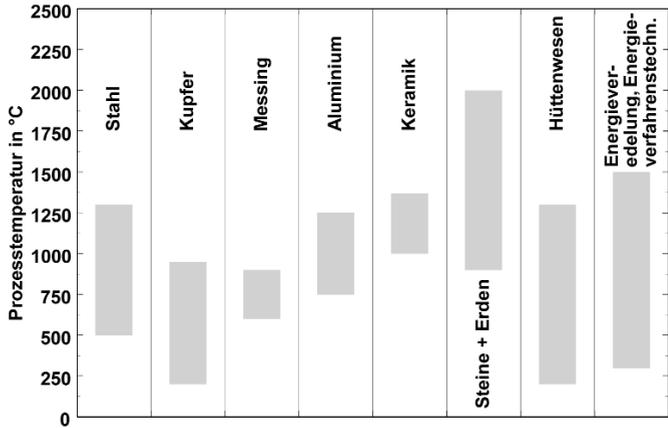


Abbildung 4
Energieverbrauch von
Prozessanlagen, nach [4]

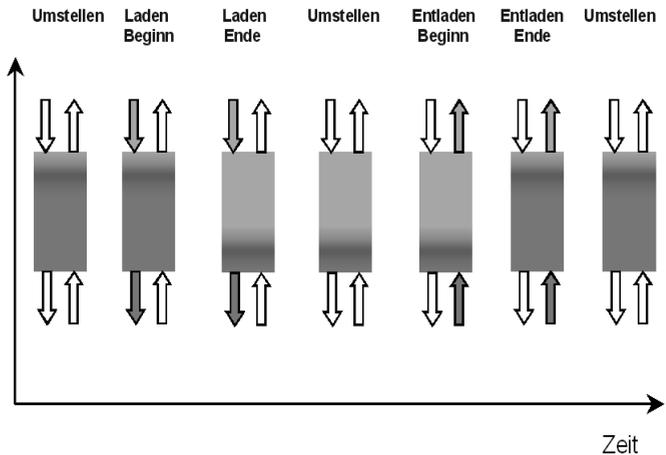
In *Abb. 5* sind die Prozesstemperaturen nach Industriebereichen aufgliedert. Es ist ersichtlich, dass es sich hier um meist traditionelle Industriebereiche handelt.

Abbildung 5
 Prozesstemperatur für
 ausgewählte Prozesse
 in verschiedenen
 Industriebetrieben
 nach [4]



Der Ablauf eines Regeneratorzyklus ist in *Abb. 6* näher erläutert. Um zum Beispiel kontinuierliche Heißluftmengen und Heißlufttemperaturen erzielen zu können, wird dieser angegebene Zyklus immer wieder von mindestens zwei Regeneratoren im Wechsel wiederholt.

Abbildung 6
 Regeneratorzyklus



4. Regeneratorauslegung

In der Regel werden Regeneratoren als modifizierte Wärmeübertrager ausgelegt. Das zeitliche Verhalten eines Regenerators wird über einen „korrigierten“ k-Wert des sogenannten Besatzes (Speichermaterial) berücksichtigt. Diese Berechnungsart ist jedoch nur bei kontinuierlichem Betrieb mehrerer Regeneratoren möglich. Ein Regeneratorbesatz wird durch folgende Parameter beschrieben:

- Spezifische (freie) durchströmte Fläche
- Spezifische Oberfläche
- Spezifisches Wärmespeichervermögen
- Effektive Wanddicke
- Effektiver Strömungskanaldurchmesser

In *Abb. 7* ist aufgezeigt, wie durch die Veränderung der Wanddicke und des Rasterabstandes die spezifische Heizfläche beeinflusst werden kann. Dabei wird von runden Kanälen, die auf einem Raster aus gleichseitigen Dreiecken aufgebaut sind, ausgegangen. Es gilt also: Kanaldurchmesser gleich Rasterabstand minus Wanddicke.

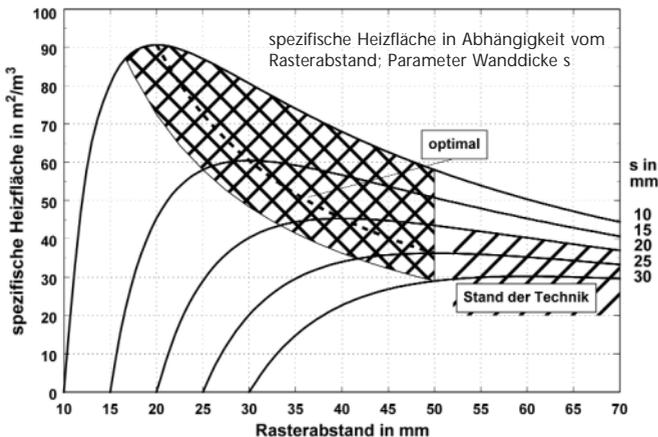


Abbildung 7
Optimierte
Besatzgeometrien [5]

Kleine Kanaldurchmesser mit geringen Wanddicken sind zu empfehlen. Bei der industriellen Anwendung ist jedoch auf die Verunreinigungen des Gases zu achten. Bei Staub beladenen Gasen kann der Kanaldurchmesser nicht zu klein gewählt werden. Bei keramischem Material für Hochtemperaturanwendungen ist bei einer minimalen Wanddicke von ca. 10 mm oft eine Grenze.

5. Bewertung von Regeneratoren

Vorteile von Regeneratoren sind:

- Hohe Temperaturen sind leicht erreichbar.
Keramisches Material ist einsetzbar
- Hohe Drücke sind möglich
- Beladen und Entladen kann bei sehr unterschiedlichen Drücken geschehen, Druckwechsel sind also möglich. Dazu ist jedoch immer eine vom Druck abhängige Zeit für diese Druckwechsel nötig
- Regeneratoren können als Wärmespeicher eingesetzt werden
- Sie sind in der Industrie Stand der Technik

Welche Nachteile ergeben sich?

Die Peripherie mit zum Beispiel Rohrleitungen und Armaturen ist teuer. In der Regel werden bei zwei Regeneratoren mindestens benötigt:

- 2 Armaturen, hoher Druck und hohe Temperatur
- 4 bis 5 weitere Armaturen, hoher Druck und mittlere Temperatur

Aus obigen Gründen sind daher Regeneratoren als Wärmespeicher nur bei großen Leistungen bzw. großen Kapazitäten sinnvoll einsetzbar.

6. Einsatzgebiete / Stand der Forschung

Will man eine Gasturbine in Zusammenhang mit der Nutzung fester Brennstoffe, deren Abgase eventuell noch stark verschmutzt sind, einsetzen, so bietet sich als Zwischenglied eine Regeneratoranlage an. So kann zum Beispiel Holz oder Holzabfall in einer Brennkammer verbrannt werden und die Energie dennoch in einer Gasturbine bei hohem Druck und hoher Temperatur genutzt werden. Als Bindeglied ist eine Regeneratoranlage mit Druckwechsellern nötig.

Insgesamt kann eine Regeneratoranlage zur Abwärmennutzung hoher oder sehr wechselnder Temperatur eingesetzt werden.

Verschiedene Projekte in Zusammenarbeit mit dem DLR wurden durchgeführt. Der Einsatz eines Regenerators bei einem solarthermischen Kraftwerk ist möglich.

Der Stand der Forschung ist zur Zeit wie folgt:

- Besatzsteine mit veränderten Geometrien sind möglich, kleinere Kanaldurchmesser und damit höhere spezifische Heizflächen sind produzierbar
- Besatzmaterialien mit Latenteil (Salzkeramik) wurden im Pilotmaßstab gefertigt und verifiziert. Ein Einsatz in einer Demonstrationsanlage konnte bisher nicht erreicht werden. Durch die Salzkeramik ist eine bessere Nutzung des Besatzvolumens und / oder eine höhere Leistung möglich
- Besatzmaterialien aus Pellets bzw. Kugeln können produziert werden. Diese werden zum Beispiel in Regeneratorbrennern eingesetzt

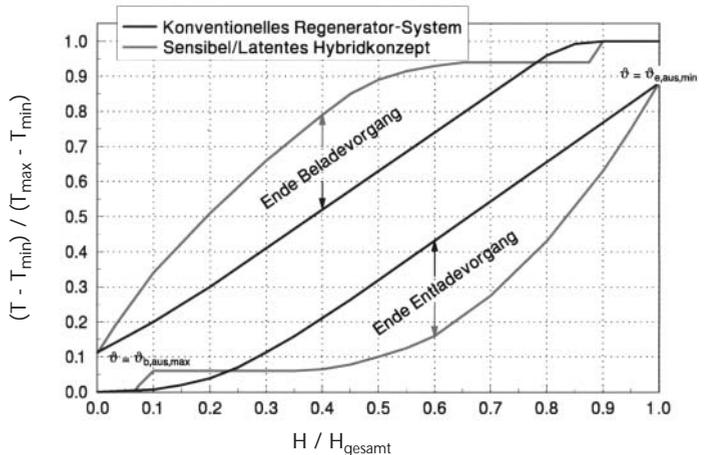
Folgende Besatzsteine aus *Tab. 4* mit veränderten Geometrien wurden gefertigt:

Tabelle 4
Besatzsteine veränderter Geometrien

Typ	Spezifische Heizfläche in m ² /m ³	Hydraulischer Durchmesser bzw. Kugeldurchmesser in mm
Wabenkörper	300	9
Wabenkörper	450	6
Wabenkörper	225	12
Formsteine	90	10
Raschigringe	300	8
Kugeln / Pellets	150	25
Kugeln / Pellets	500	6

In *Abb. 8* ist für einen Regenerator aufgetragen, wie die Temperaturverläufe am Anfang und Ende des Beladevorganges sind. Verglichen wurden Besatzsteine aus reiner konventioneller Keramik und Salzkeramik, jedoch nur in einer oberen und unteren Zone. Dadurch kann erreicht werden, dass die Temperaturspreizung, damit das Speichervermögen, erheblich höher ist, wenn nur ein kleiner Anteil von Salzkeramik eingesetzt wird.

Abbildung 8
Temperaturverläufe im Besatzmaterial, Vergleich bei rein sensiblem Besatz und Hybridbesatz [5]



7. Ausblick / Forschungsansätze

Bei den Anwendungsfeldern für optimierte Regeneratoren ergeben sich zwei Leistungsklassen von einigen Hundert MW sowie einigen MW. Diese sind mit Beispielen in *Tab. 5* erfasst:

Anwendung	Leistung in MW _{thermisch}	Maximale Temperatur in °C
Winderhitzeranlage	30 – 300	1.300 – 1.500
Koksofen	10 – 100	1.050 – 1.200
Solarturmkraftwerk	100 – 300	700 – 800
Wärmerückgewinnung	5 – 7	1.200 – 1.500
Brennluftvorwärmung	0,3 – 5	1.250 – 1.350
Reststoffnutzung	5	1.050

Tabelle 5
Anwendungsfelder
optimierter
Regeneratoren

Welche Entwicklungsmöglichkeiten bestehen und wo ist noch Entwicklungsbedarf?

- Überprüfung kostengünstiger Materialien auf Tauglichkeit für den Regeneratoreinsatz, wie zum Beispiel Lochziegel. Dazu sind die Druckfließeigenschaften, die Temperaturbeständigkeit und die Temperaturwechselbeständigkeit näher für den veränderten Einsatz zu untersuchen
- Entwicklung kostengünstiger Armaturen für hohen Druck und hohe Temperatur
- Untersuchung und Test der Einsatzmöglichkeit natürlich gebrochener Steine als Haufwerk
- Demonstrationsanlagen insbesondere für Hybridmaterial wie Salzkeramik

Insgesamt ist ein hohes Nutzungspotential vorhanden. Im industriellen Bereich hat man es jedoch mit eher konservativen Bereichen zu tun, die eine bewährte Technologie in der Regel ungern aufgeben oder modifizieren. Für völlig neue Anwendungen, wie die Solarthermie, bietet sich eine neue Technologie an. Große Bereiche der Anwendungen sind durch den industriellen Einsatz der Regeneratoren bereits heute verifiziert.

Literatur

- [1] Interne Präsentationsunterlagen, Didier-M&P Energietechnik GmbH, Mainz-Kastel, 2001
- [2] Interne Präsentationsunterlagen, VRD, Wiesbaden, 2001
- [3] Rothemühle, entnommen aus: www.rothemuhle.de
- [4] Ermittlung des Anwendungspotenzials für Klein-Regeneratoren mit latentem Wärmespeichermaterial in der Industrie, Betriebsforschungsinstitut, Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Bericht V 5.45.011, 1996
- [5] Forschungsberichte Verbundprojekt Hochtemperaturwärmespeicher, (HTWS), Projekt - Nr. 0328846 DLR Stuttgart und Didier-Werke AG, 1995