

# Emissionsfreie GuD-Kraftwerke durch computergesteuerte stöchiometrische Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff in Dampf

David Bocandé\*, Nancy Kings, Markus Schatz

Professur für Strömungsmaschinen in der Energietechnik / Laboratorium für Strömungsmaschinen

Helmut-Schmidt-Universität Hamburg

Hamburg, Deutschland

[\\*bocanded@hsu-hh.de](mailto:bocanded@hsu-hh.de)

**Kurzfassung – Die Rückverstromung von grünem Wasserstoff mittels Oxyfuel-Verbrennung in thermischen Kraftwerken ermöglicht die effiziente Bereitstellung von elektrischen Nettoleistungen im Gigawatt-Bereich. Mit Wasserdampf als Wärmeträgerfluid werden Wirkungsgrade von über 70 % prognostiziert. Um das Konzept eines H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-gefeuerten Kraftwerks mit Dampf als Arbeitsfluid zu erforschen, wird im Rahmen des Projekts H<sub>2</sub> Oxyfuel, ein Mikrokraftwerk-Demonstrator aufgebaut, in Betrieb genommen und hinsichtlich der Sicherheit und Einbindung in das Energieversorgungsnetz untersucht.**

Die Auslegung des Mikrokraftwerk-Demonstrators erfolgt durch thermodynamische Prozess- und Anlagenmodellierung, wobei die thermischen Belastungsgrenzen der Komponenten insbesondere der Turbine und des Abhitzedampferzeugers die Prozessparameter limitieren. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen werden zusätzlich mögliche Prozesse für Großkraftwerke modelliert und bewertet.

Da bislang kein ausgereiftes Brennkammerkonzept in der Literatur beschrieben ist, werden parallel zur Prozessmodellierung auch Simulationen zur H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Verbrennung in Dampf durchgeführt. Basierend darauf wird im nächsten Schritt eine Brennkammer aufgebaut und experimentell untersucht. Verbrennungseffizienz und -temperatur sowie mess- und sicherheitstechnische Aspekte sind hierbei Gegenstand der Forschung. Die technische Realisierung des Mikrokraftwerk-Demonstrators erfolgt schrittweise. Zunächst wird das Arbeitsmedium für die Brennkammer prozessunabhängig über einen elektrischen Dampferzeuger bereitgestellt, welcher im späteren Verlauf partiell durch einen Abhitzedampferzeuger ersetzt wird. Um die kritischen Komponenten der Anlage gegen Versprödung und Korrosion durch Verbrennungsprodukte zu schützen, wird mit der technischen Umsetzung der H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Verbrennung in Dampf unter atmosphärischen Bedingungen begonnen. Sukzessive werden dann Komponenten ergänzt und der Prozess geschlossen, um mit der Integration der Turbine das Mikrokraftwerk zu finalisieren. Durch Integration des Abhitzedampferzeugers werden weitere Druck- und Leistungssteigerungen der Brennkammer möglich.

**Stichworte – Oxyfuel-Prozesse, Wasserstoffverbrennung, Kraftwerksprototyp**

## NOMENKLATUR

BK	Brennkammer
DR	Dilution Ratio (Verdünnungsverhältnis)
DR <sub>G</sub>	Globale Dilution Ratio
TIT	Turbineneintrittstemperatur
$m$ in kg	Masse

## I. EINLEITUNG

Wasserstoff als Brennstoff in Oxyfuel-Dampfkraftwerken ist ein Konzept, welches seit dem Ende der 70er Jahre bekannt ist [1]. Verschiedene Ausführungen wurden seitdem modelliert. Die Prozesse sind entweder vollkondensierend z.B. der Toshiba- Prozess [2, 3], oder teilkondensierend wie der Graz- [4] oder Mitsubishi-Prozess [5], wobei Prozesssimulationen zeigen, dass Wirkungsgrade von über 70 % unter gasturbinenspezifischen Bedingungen erreicht werden können.

Trotz der vielversprechenden Ergebnisse der Simulationen wurde bis heute kein solcher Prozess gebaut. Für das Arbeitsfluid Dampf fehlt bei den nötigen extremen Prozessparametern die technische und industrielle Erfahrung. Gleichzeitig stellt sich die Frage der Betriebssicherheit im Hinblick auf das Anfahrverhalten, die Regelung, Lastanpassung und die Ansammlung von unverbranntem Wasserstoff und Sauerstoff in den Kraftwerkskomponenten.

Bei der für den Prozess zentralen Brennkammer (BK) bestehen Herausforderungen hinsichtlich der vollständigen Umsetzung der stöchiometrisch zugeführten Reaktionspartner und der Vermeidung von Dissoziation [6] an Hotspots sowie Quenching [7] an kalten Oberflächen. Verschiedene Konzepte wurden bereits entwickelt [7, 8, 9, 10]. Jüngst wurde ein Brennkammer-Design mit kleinerer Leistung vorgestellt, das den Messungen der Autoren zufolge eine hohe Verbrennungseffizienz aufzeigt [11]. Eine Bestätigung der Ergebnisse steht allerdings noch aus.

Im Rahmen des Projekts soll eine Brennkammer für ein Mikrokraftwerk entwickelt und aufgebaut werden, die einen

sicheren Betrieb bei Leistungen < 100 kW und Drücken bis 3 bar erlaubt. Zudem soll gewährleistet sein, dass nur geringe Mengen komponentenschädigende und gegebenenfalls zündfähige Verbrennungsrückstände im Prozess auftreten.

Zudem werden die Grenzen der technischen Umsetzung von H<sub>2</sub>-gefeuerten Oxyfuel-Kraftwerken aufgezeigt: Vor allem Belastungsgrenzen des Materials wie die maximale Turbineneintrittstemperatur (TIT) und die Temperaturfestigkeit des Abhitzedampferzeugers limitieren die Prozessparameter und damit den erreichbaren Wirkungsgrad. Zur Untersuchung des Prozesses und des Betriebsverhaltens der Brennkammer wird ein Mikrokraftwerk als Demonstrator aufgebaut, wobei die erreichbaren Drücke und Temperaturen aus Kosten- und aus Sicherheitserwägungen niedrig gehalten werden müssen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer starken Dampfkühlung und damit einhergehend ein hoher Dampfbedarf. Dies erfordert die Nutzung eines elektrischen Dampferzeugers.

Da die angestrebte Verbrennungseffizienz von 100 % im Rahmen der Brennkammerentwicklung erst erreicht werden muss, sind unverbrannte Reaktanten im Dampf zu erwarten. Aus diesem Grund sollen Verbrennungsversuche zunächst offen, d.h. atmosphärisch durchgeführt werden, bevor sie in einem geschlossenen Kreislauf mit Gegendruck stattfinden. Dafür wird ein Versuchsstand ausgelegt, welcher anschließend durch geringe konstruktive Maßnahmen in das aufzubauende Mikrokraftwerk integriert werden kann. Die Modellierung des Prozesses im Versuchsstand zur Komponentenauswahl wurde mit der Prozesssimulationssoftware Aspen Hysys durchgeführt. Parallel dazu erfolgte auch die Betrachtung möglicher Kraftwerksprozesse. Das Projekt befindet sich aktuell in der Beschaffungsphase für die Komponenten sowie für die Sensorik der Mess- und Regelungstechnik.

In der nachfolgenden Ausführung wird das Ergebnis des iterativen Auslegungsprozesses und die finale Version des Mikrokraftwerks dargestellt.

## II. AUSLEGUNG DES MIKROKRAFTWERKS

Grundsätzlich muss beim Betrieb des Demonstrators gewährleistet sein, dass Rückstände von Reaktanten komplett aus dem Kreislauf entfernt werden, da während der Entwicklung der Brennkammer eine vollständige Reaktion nicht in allen Betriebspunkten sichergestellt werden kann. Daher wird eine Prozessführung gewählt, bei welcher der gesamte Dampf kondensiert wird, so dass verbleibende Gase wie H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> entfernt werden können. Dies ermöglicht auch eine bessere Bewertung der Brennkammer.

Der den weiteren Betrachtungen zugrunde liegende Prozess ist in ABBILDUNG 1 dargestellt und wird im Folgenden diskutiert.

Zur besseren Verständlichkeit sollen zunächst die verwendeten Bezeichnungen für den Dampfmassenstrom an den jeweiligen Stationen erläutert werden. Die Begriffe sind zur Verdeutlichung auch in ABBILDUNG 1 aufgeführt.

- BK-Dampf: wird durch die Brennkammer geführt und beeinflusst die Reaktionskinetik. Erreicht die höchste Temperatur im Prozess.
- Kühldampf: zur Kühlung der Brennkammer, wird am Austritt mit dem BK-Dampf vermischt.

- Bypassdampf: wird um die Brennkammer geführt und zur Senkung der Prozessdampftemperatur zugemischt.
- Frischdampf: Dampfmenge aus der BK-Dampf, Kühldampf und Bypassdampf gespeist werden. Entspricht der Masse des zu verdampfenden Kondensats.
- Prozessdampf: Dampf aus Verbrennung und Zumischung.

In der Brennkammer (A) wird Wasserstoff und Sauerstoff in Dampf (BK-Dampf) verbrannt. Das Massenverhältnis zwischen BK-Dampf am Eingang der Brennkammer und den Reaktanten wird als Verdünnungsverhältnis oder Dilution Ratio  $DR_G$  bezeichnet. Dieser Parameter bestimmt die adiabate Flammentemperatur in der Brennkammer. Anschließend wird am Austritt der Kühldampf beigemischt, der zum Schutz der Brennkammerwand eingesetzt wird (Zustand 2). Nach dem Zumischen des Bypassdampfes (Zustand 3) ergibt sich das globale Verdünnungsverhältnis

$$DR_G = \frac{m_{\text{Frischdampf}}}{m_{\text{Reaktanten}}} \quad (1)$$

über welches die Temperatur des Prozessdampfes berechnet werden kann.

### A. Design des Prototyps

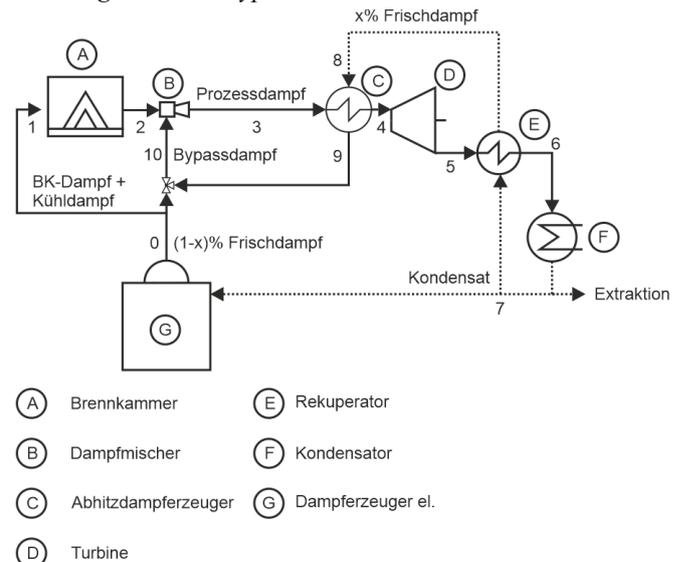


ABBILDUNG 1: DESIGN DES MIKROKRAFTWERKS.

ABBILDUNG 1 zeigt das Modell des Mikrokraftwerks, wie es unter technischen und wirtschaftlichen Bedingungen realisierbar ist. Am Austritt der BK (Zustand 2) dient ein Dampfmischer zur Anpassung der Prozessdampftemperatur (Zustand 3). Stromab folgt der Abhitzedampferzeuger zur Verdampfung des Kondensats bei gleichzeitiger Kühlung des Prozessdampfes auf die TIT (Zustand 4). Nach Expansion in der Turbine (Zustand 5), wird der Dampf durch den Rekuperator (E) geführt. Anschließend wird kondensiert (F) und der Massenanteil der Verbrennungsprodukte extrahiert (Zustand 7). Das restliche Kondensat wird elektrisch (Zustand 0) und durch den Abhitzedampferzeuger (Zustand 8) verdampft.

In den Simulationen für große Kraftwerke im industriellen Maßstab wird mit einer TIT von 1700 °C bei 70 bar (2)

gerechnet. Diese Temperaturen lassen sich nur durch eine intensive Turbinenkühlung erreichen.

Mit den hier vorgegebenen niedrigen Turbineneintrittstemperaturen (Zustand 4, 400 °C) liegt der mit dem Demonstrator erzielbare Wirkungsgrad bei etwa 20-25 % und damit deutlich unter den eingangs angegebenen Werten für Kraftwerksprozesse von etwa 70 %. Bei dem vorgesehenen höchsten Prozessdruck von 3 bar, einem Kondensatordruck von 50 mbar und einem isentropen Turbinenwirkungsgrad von 70 % können die in TABELLE I aufgeführten Prozesswirkungsgrade erreicht werden.

TABELLE I: ERREICHBARE THERMISCHE WIRKUNGSGRAD IN ABHÄNGIGKEIT DER TIT, BASIEREND AUF DEM UNTEREM HEIZWERT.

TIT	Th. Wirkungsgrad
400 °C	21.25 %
500 °C	23.64 %
600 °C	26.11 %

### B. Autarke Dampfbereitstellung

Der Zusammenhang zwischen dem globalen Verdünnungsverhältnis  $DR_G$  und der Prozessdampftemperatur im Zustand 3 wird in ABBILDUNG 2 (linke Achse) aufgeführt. Mit zunehmendem Verdünnungsverhältnis sinkt die Prozessdampftemperatur, wobei der Kurvenverlauf mit steigendem  $DR_G$  asymptotisch wird. Abhängig von der Prozessdampftemperatur kann im Abhitzedampferzeuger (C) ein Teil des Frischdampfes generiert werden (8 → 9).

Dampfturbinen in der Leistungsklasse des Mikrokraftwerks sind auf Grund der Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe auf Turbineneintrittstemperaturen (TIT) von etwa 400 °C limitiert. Deshalb wird der Abhitzedampferzeuger (C) vor die Turbine (D) geschaltet, um die Dampftemperatur abzusenken. Mit der vorgegebenen TIT von 400 °C (Zustand 4), lässt sich mithilfe der Temperatur vor dem Dampferzeuger (Zustand 3) bzw. durch das globale Verdünnungsverhältnis diejenige Frischdampfmenge berechnen, die durch die Wärme des Prozessdampfes quasi autark im Kreislauf generiert werden kann (ABBILDUNG 2 rechte Achse).

Ausgehend von der Dampftemperatur im Zustand 3, d.h. nach der Zumischung des Bypassdampfes (ABBILDUNG 1) wird das entsprechende globale Verdünnungsverhältnis  $DR_G$  bestimmt (gestrichelte Linie) und dann für diesen Wert der Anteil des Frischdampfes abgelesen, der damit generiert werden kann. Für die vorliegende Betrachtung liegt der Verdampfungsdruck bei 1 bar; das zu verdampfende Wasser hat die entsprechende Sättigungstemperatur.

Der derzeitige Stand der Technik in Bezug auf die maximale Temperatur für Wärmeübertrager (Zustand 3) liegt bei etwa 800 °C. Damit kann etwa 43 % des Frischdampfes generiert werden (siehe ABBILDUNG 2). Aus Kostengründen wird allerdings häufig eine Maximaltemperatur von 600 °C gewählt, was bedeutet, dass sich nur ca. 20 % des benötigten Dampfes im Prozess autark erzeugen lassen. Für eine vollständig autarke Frischdampferzeugung müsste unter den hier betrachteten Umständen eine Prozessdampftemperatur  $T_3$  von ca. 1200 °C vorliegen. Hitzebeständige Werkstoffe können zwar im Extremfall auf bis zu 1100 °C eingesetzt werden, sind jedoch als Werkstoffe in Dampfprozessen nicht erprobt. Folglich wird für den Aufbau des Demonstrators auf

jeden Fall ein zusätzlicher elektrischer Dampferzeuger benötigt, um die notwendige Frischdampfmenge zu generieren.

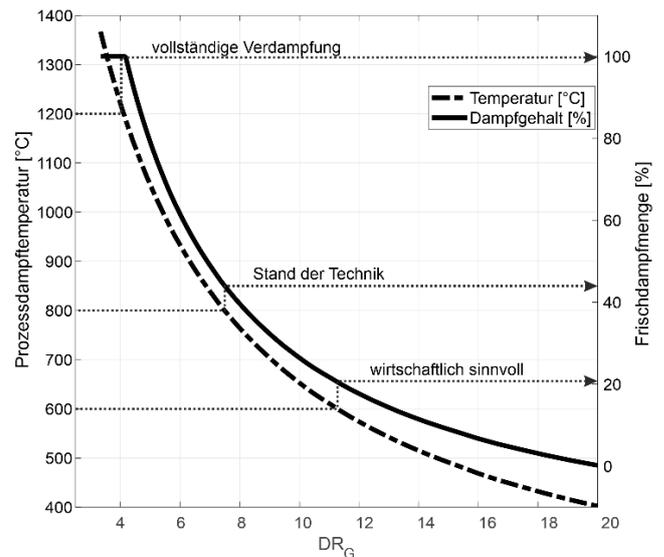


ABBILDUNG 2: ABHÄNGIGKEIT DER GENERIERBAREN FRISCHDAMPFMENGE UND DER PROZESSDAMPFTEMPERATUR VOM GLOBALEN VERDÜNNUNGSVERHÄLTNISS  $DR_G$ ; GRENZEN DER AUTARKEN DAMPFERZEUGUNG IM MIKROKRAFTWERK.

Derzeit finden erste Gespräche mit dem Southwest Research Institute (SWRI) statt, um die Möglichkeit zur Herstellung von Hochtemperaturwärmeübertragern durch additive Verfahren zu erörtern.

### III. ENTWICKLUNG DER BRENNKAMMER

Da bisher kein ausgereiftes Brennkammerkonzept in der Literatur beschrieben ist, werden parallel zur Prozessmodellierung Simulationen zur  $H_2/O_2$ -Verbrennung in Dampf durchgeführt. Basierend darauf wird im nächsten Schritt eine Brennkammer aufgebaut und experimentell untersucht. Die Inbetriebnahme dieses Prüfstands stellt auf Grund der Prozessmedien eine Herausforderung für Mess-, Regelungs- und Sicherheitstechnik dar.

#### A. Verbrennungseffizienz

Für die Modellierung wird eine Verbrennungseffizienz von 100 % für die stöchiometrische Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff angesetzt. Dieses Ideal wird für die Umsetzung der Edukte im Brennkammer-Prüfstand angestrebt. Bei stöchiometrischem Mischungsverhältnis aus Wasserstoff und Sauerstoff entsteht bei der Verbrennung gemäß der Globalreaktion nur Wasserdampf:



Bei unvollständiger Verbrennung enthält das Abgas und folglich auch der Prozessdampf unverbrannten Wasserstoff und Sauerstoff. Um die Ansammlung von Reaktanten in den Kraftwerkskomponenten zu vermeiden, ist somit die Verbrennungseffizienz nicht nur aus thermodynamischer Sicht ein Schlüsselfaktor für die Entwicklung des Kraftwerks.

#### B. Auslegung der Brennkammer

Die Integration der Brennkammer in den Prozess setzt u.a. kompakte, technisch realisierbare geometrische Abmessungen für das Flammrohr voraus. Alle Komponenten müssen hohe Sicherheitsanforderungen hinsichtlich Druck und Temperatur

erfüllen, sowie den Dauerbetrieb der Anlage gewährleisten. Die Auslegung der Brennkammer erfolgt in Kooperation mit dem Institut für Verbrennungstechnik des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Die komplexe Interaktion des Strömungs- und Verbrennungsvorgangs wird zunächst durch Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) Simulationen abgebildet. Stationäre Rechnungen ermöglichen hier für verschiedene Brennkammerkonfigurationen numerische Studien zur Verbrennungseffizienz, Wärmefreisetzung, Temperaturverteilung und Abgaszusammensetzung. Anhand der Leistungsabschätzung wurde die Brennkammer dimensioniert und Simulationen zunächst ohne Einbeziehung der Details der Brennergeometrie durchgeführt. Durch Variation des Verdünnungsverhältnisses (DR) bzw. des Dampfmassenstroms lassen sich verschiedene Flammentypen für eine konstante Leistung generieren. In der Literatur (11) werden sowohl für Strahl- als auch für Drallflammen hohe Verbrennungseffizienzen angegeben.

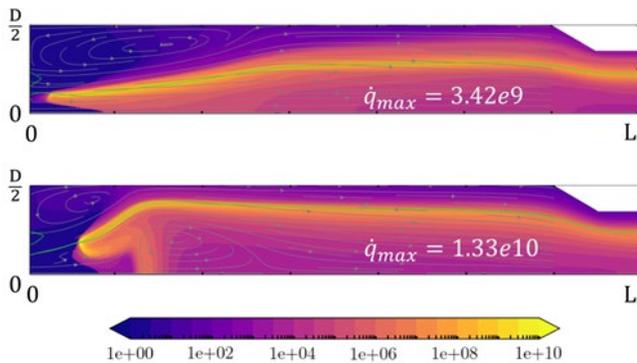


ABBILDUNG 3: VERGLEICH DER WÄRMEFREISETZUNG IN DER STRAHLFLAMME (OBEN) UND IN DER DRALLFLAMME. (QUELLE: DLR)

ABBILDUNG 3 zeigt den Vergleich der Wärmefreisetzung der beiden Flammentypen in einer zylindrischen Brennkammer mit dem Durchmesser  $D$  und der Länge  $L$  für eine Leistung von 10 kW. Die Drallflamme ist gekennzeichnet durch eine hohe Wärmefreisetzung im ersten Drittel der Brennkammer, da die Verweilzeit der Reaktanten in diesem Bereich im Vergleich zur Strahlflamme erhöht wird, was jedoch auch mit hohen Temperaturen nahe der Brennkammerwand verbunden ist. Ferner zeigt ABBILDUNG 3 deutlich, dass in dieser Konfiguration bei beiden Flammentypen noch signifikante Wärmefreisetzung am Brennkammeraustritt stattfindet - die Verbrennungseffizienz also die angestrebten 100 % bisher nicht erreicht. Die weitere Optimierung ist derzeit Gegenstand der Forschung.

### C. Projektierung des Brennkammerprüfstands

#### 1) Sicherheit

Wasserstoff-Sauerstoff-Gemische sind in weiten Konzentrationsgrenzen zündfähig, wobei hohe Verbrennungsgeschwindigkeiten auftreten. Wasserstoffflammen leuchten im ultravioletten Bereich, auf Grund des Fehlens von Kohlenstoffverbindungen ist ihre emittierte Wärmestrahlung eher gering. Prüfstände, bei denen brennbare Gase wie Wasserstoff oder Sauerstoff eingesetzt werden, sind mit entsprechenden Sicherheitseinrichtungen auszustatten und dem Gefahrenpotential durch technische/organisatorische Maßnahmen zu begegnen, um Brand- und Explosionsschutz im Betrieb zu gewährleisten.

### 2) Mess- und Regelungstechnik

Die Ausstattung des Prüfstands mit geeigneter Mess- und Regelungstechnik ist eine Herausforderung: die Nutzung etablierter Sensoren und Messtechniken in der Brennkammer z.T. nicht möglich. Eine Schwierigkeit dabei ist das Diffusionsvermögen von Wasserstoff, aber auch die gleichzeitige Anpassung sowohl an die Reaktanten als auch an den Prozessdampf und der Einsatzbereich bei hohen Verbrennungstemperaturen. In-situ Abgasanalyse und Prozessüberwachung benötigen adäquate Probenentnahmesysteme und empfindliche Sensorik mit hoher Ansprechgeschwindigkeit und Messgenauigkeit zur kontinuierlichen Überwachung des Prozesses. Obwohl eine Vielzahl von Sensoren zur Erkennung von Wasserstoff am Markt existieren, bedarf es für die H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>- Verbrennung in Dampf angepasste Sensortechnologien, die derzeit noch Gegenstand der aktuellen Forschung und Entwicklung sind.

### IV. NÄCHSTE SCHRITTE: BRENNKAMMER-ERPROBUNG UND AUFBAU DES DEMONSTRATORS

Für den Betrieb des Mikro-Kraftwerks muss die Brennkammer zuverlässig und sicher bei höchster Effizienz betrieben werden können. Daher wird der Aufbau des Kraftwerks eng mit dem Fortschritt bzw. der Entwicklung der Brennkammer verzahnt.

Für experimentelle Untersuchungen bei Umgebungsbedingungen wird der am LSM vorhandene Brennkammerversuchsstand verwendet, bevor in der ersten Ausbaustufe ein reiner Brennkammer-Versuchsstand implementiert wird, der aus dem Dampferzeuger, der Brennkammer und einem Gegendruckventil besteht.

Bei dem entworfenen Kraftwerk (ABBILDUNG 1) handelt es sich um einen Hybriden, in dem die Frischdampfgenerierung zwischen einem elektrischen und einem thermischen (Rekuperation) Dampferzeuger aufgeteilt ist. Letzterer und die Turbine sind die kostenintensivsten Komponenten des Kraftwerks und werden deshalb während der ersten Brennkammerversuche nicht integriert, um diese vor bauteilschädigenden Verbrennungsrückständen zu schützen. Hierzu wird ein BK-Versuchsstand vorbereitet, welcher bei erfolgreichem Betrieb später zum Kraftwerk umgerüstet werden kann.

#### A. Vom Versuchsstand zum Kraftwerk

ABBILDUNG 4 zeigt die ersten drei Phasen der Entwicklung:

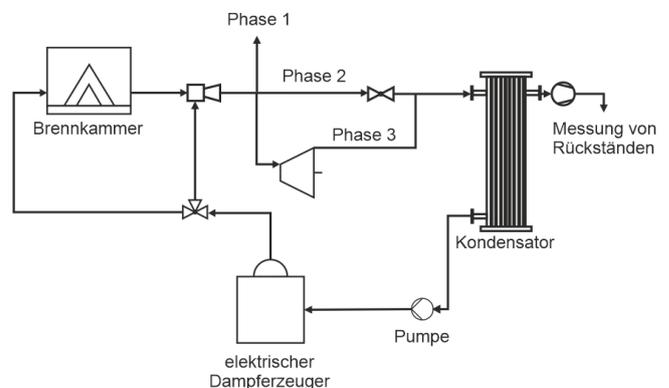


ABBILDUNG 4: ERSTE DREI PHASEN DER ENTWICKLUNG VOM VERSUCHSSTAND ZUM KRAFTWERK.

### 1) Phase 1: Atmosphärische Verbrennung

Die BK wird offen, d.h. unter atmosphärischen Bedingungen in Betrieb genommen; es werden Verbrennungstemperaturen bestimmt und in-situ Messungen von Verbrennungsrückständen durchgeführt. Ziel ist es, einen sicheren Betrieb und eine effiziente Reaktionsumsetzung zu erreichen. Für die Dampfzufuhr wird ein elektrischer Dampferzeuger beschafft, welcher atmosphärische Brennkammerversuche mit Leistungen von bis zu 450 kW ermöglicht. In dieser Phase wird ebenfalls die Mischung von Kühl- und Bypassdampf für den Prozess optimiert.

### 2) Phase 2: Schließung des Prozesses

Nach Erreichen einer sicheren und effizienten atmosphärischen Verbrennung wird im geschlossenen Prozess gefahren. Die dadurch entstehende Änderung des Gegendrucks beeinflusst die Strömungsbedingungen und die Verbrennungskinetik.

Der Dampf wird nach einer Drosselung in den Kondensator geführt. Die Drossel ersetzt die Funktion der Turbine und kann bei Versprödung leichter ersetzt werden.

### 3) Phase 3: Integration der Turbine

Ist eine sichere Verbrennung bei höheren Leistungen und Drücken gewährleistet, kann die Turbine anstelle der Drossel eingesetzt werden. Dies geschieht bereits bei relativ niedrigen BK-Leistungen von ca. 50 kW und einer Prozessdampf Temperatur von 400 °C. Zu diesem Zeitpunkt können die ersten Messdaten des Prototyps aufgenommen werden. In dieser Konstellation können BK-Leistungen von bis zu 150 kW bei 3 bar gefahren werden.

### B. Finale Version und Ausbau der BK-Leistung

Die finale Version ist in ABBILDUNG 1 dargestellt. Die Integration des Rekuperators (Komponente E) und des Abhitzedampferzeugers (Komponente C) vervollständigt den Prozess. In Bezug auf den Abhitzedampferzeuger besteht jedoch noch technischer Klärungs- und Entwicklungsbedarf aufgrund der hohen thermischen Belastung unter Druck.

Der Frischdampfbedarf steigt invers proportional zur Prozessdampf Temperatur. Durch Zuschalten eines hitzebeständigen Abhitzedampferzeugers (Komponente C aus ABBILDUNG 1) kann eine Reduktion des globalen Verdünnungsverhältnisses ( $DR_G$ ) von 20 auf 8 erreicht werden. Daraus entstehen mehrere Vorteile:

- Eine Reduzierung der Dampfmenge für die Zumischung. Somit werden Kapazitäten für den elektrischen Dampferzeuger frei.
- Ein erhöhter Anteil autarker Dampferzeugung durch Abwärme. Somit sinkt der Anteil der elektrischen Leistung an der Frischdampfgenerierung.
- Freiwerdende Kapazitäten des elektrischen Dampferzeugers ermöglichen eine Erweiterung des Betriebsbereichs der Brennkammer im geschlossenen Prozess. Der Anteil des Bypassdampfes am globalen Verdünnungsverhältnis ist sehr hoch. Wird dieser reduziert können auch höhere Leistungen der Brennkammer getestet werden. Die maximale Leistung des Dampferzeugers beträgt 450 kg/h. Damit können BK-Leistungen von 90 kW bei 400 °C Prozessdampf Temperatur erreicht werden. Bei einer Erhöhung auf 800 °C liegt die mögliche BK-Leistung bei 240 kW und bei 440 kW für 1200 °C. Diese

höchste realisierbare Temperatur ist abhängig von der thermischen Belastungsgrenze des nachgeschalteten Abhitzedampferzeugers und ist Gegenstand einer Markt- und Literaturstudie.

## V. ZUSAMMENFASSUNG

Oxyfuel-Dampfkraftwerke mit Wasserstoffverbrennung können eine schadstofffreie Stromproduktion im MW- oder GW-Bereich mit thermischen Wirkungsgraden höher als 70 % ermöglichen. Um diese Prozesse realitätsnah zu erforschen, wurde im kleinen Maßstab ein Demonstrationskraftwerk ausgelegt, welches im weiteren Projektverlauf aufgebaut wird. Die wirtschaftlichen und technischen Grenzen der Komponenten des Mikrokraftwerks erfordern einen zusätzlichen Dampferzeuger sowie eine schrittweise Umsetzung. Kraftwerk und Brennkammer werden parallel aufgebaut und in Abstimmung zueinander erweitert.

## DANKSAGUNG

Die Autoren danken Andreas Rauch, Peter Ess und Oliver Lammel vom Institut für Verbrennungstechnik des DLR in Stuttgart für die zur Verfügung gestellte ABBILDUNG 3 und für die Förderung bei dtcc.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr [Projekt H<sub>2</sub> Oxyfuel].

## Literatur

- [1] Wojkowsky H, Schnurnberger W, Sternfeld HJ, Peschka W. Hydrogen as an Energy Vector // Stromerzeugung aus Wasserstoff: Proceedings of the International Seminar, held in Brussels, 12-14 February 1980. Dordrecht: Springer Netherlands; 1980.
- [2] Funatsu T, Fukuda M, Dohzono Y. Start Up Analysis of a H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> Fired Gas Turbine Cycle. In: ASME 1997 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition: June 2-5, 1997, Orlando, Florida, USA. New York, N.Y.: ASME; 1997.
- [3] Fukuda M, Dozono Y. Double Reheat Rankine Cycle for Hydrogen-Combustion, Turbine Power Plants. Journal of Propulsion and Power 2000; 16(4):562–7.
- [4] Sanz W, Braun M, Jericha H, Platzer MF. Adapting the zero-emission Graz Cycle for hydrogen combustion and investigation of its part load behavior. International Journal of Hydrogen Energy 2018; 43(11):5737–46.
- [5] Sugishita H, Mori H, Uematsu K. A Study of Advanced Hydrogen/Oxygen Combustion Turbines. In: Hydrogen Power: Theoretical and Engineering Solutions: Proceedings of the Hypothesis II Symposium held in Grimstad, Norway, 18-22 August 1997. Dordrecht: Springer; 1998. p. 511–6.
- [6] DIRECT THERMAL DECOMPOSITION OF WATER. In: Ohta T, editor. Solar-hydrogen energy systems: An authoritative review of water-splitting systems by solar beam and solar heat ; hydrogen production, storage and utilisation. 1. ed. Oxford: Pergamon Press; 1979. p. 59–79.
- [7] Haidn O, Davidenko D, Gökalp I. Clean Smart Grid: Primary Frequency Control Applying H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Rocket Combustor Technology 2010.
- [8] Malyschenko SP, Prigozhin VI, Savich AR, Schastlivtsev AI, Il'ichev VA, Nazarova OV. Effectiveness of steam generation in oxyhydrogen steam generators of the megawatt power class. High Temp 2012; 50(6):765–73.
- [9] Hashimoto T. Hydrogen combustion characteristics in a model burner with a coaxial injector. International Journal of Hydrogen Energy 1998; 23(8):713–20. Available from: URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319997000761>.
- [10] STERNFELD H, HEINRICH P. A demonstration plant for the hydrogen/oxygen spinning reserve. International Journal of Hydrogen Energy 1989; 14(10):703–16.
- [11] Tanneberger T, Schimek S, Kossatz M, Paschereit CO, Stathopoulos P. Development of a swirl-stabilized H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> combustion system under humidified conditions; 2017.