

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/271699815>

KOMBINIERTER GAS-UND DAMPFPROZESS IM EMISSIONSFREIEN H₂-O₂- VERBRENNUNGSMOTOR – ERSTE UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Conference Paper · November 2014

CITATIONS

0

READS

127

2 authors:



Johannes Haller

Nordhausen University of Applied Science

8 PUBLICATIONS 16 CITATIONS

SEE PROFILE



Thomas Link

Nordhausen University of Applied Science

36 PUBLICATIONS 49 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Efficient Zero-Emission Combustion of Hydrogen and Oxygen in Stationary Internal Combustion Engines with High Power Density [View project](#)

KOMBINierter GAS- UND DAMPFPROZESS IM EMISSIONSFREIEN H₂-O₂-VERBRENNUNGSMOTOR – ERSTE UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

J. Haller, T. Link

*Fachhochschule Nordhausen, Institut für Regenerative Energietechnik (in.RET),
Weinberghof 4, D-99734 Nordhausen, haller@fh-nordhausen.de*

Zusammenfassung: Für den weiteren Ausbau Erneuerbarer Energien werden zukünftig in großem Umfang Stromspeicher und flexible Regelenergiekraftwerke benötigt. Ein Weg der Speicherung überschüssiger elektrischer Energie liegt in der Produktion von Wasserstoff aus Wasser und dessen anschließende Rückverstromung. Um diese Rückverstromung in naher Zukunft und zu günstigen Kosten realisieren zu können, wurde ein Verfahren entwickelt, welches die Verbrennung von gespeichertem Wasserstoff mit dem bei der Elektrolyse anfallenden Sauerstoff mit einem hohen Umwandlungswirkungsgrad und ohne Emissionen ermöglicht.

Zur Kühlung des Prozesses wurde in den motorischen Verbrennungsprozess ein Dampfkraftwerksprozess mit zweiter Expansion integriert, sodass die Verbrennungstemperaturen nicht höher als bei üblichen Benzinmotoren liegen und die Kompressionsarbeit des Motors rückgewonnen werden kann. Um den Prozess auf seine Realisierbarkeit hin zu untersuchen wurden zunächst detaillierte thermodynamische Berechnungen mithilfe der Software EES durchgeführt. Auf dieser Grundlage soll der Prozess in einem Einzylindermotor sowohl mithilfe von numerischen Strömungssimulationen, als auch messtechnisch auf einem Prüfstand untersucht und optimiert werden. Um Steuerzeiten, Zündzeitpunkte und Motorgeometrien für den Prozess zu optimieren, liegt der Arbeitsschwerpunkt des Projekts auf der numerischen Strömungssimulation des Verbrennungs- und Dampfprozesses.

Erste Untersuchungsergebnisse zeigen, dass sich theoretische mechanische Wirkungsgrade von über 64% bei materialtechnisch akzeptablen Temperaturen realisieren lassen.

Abstract: For a further development of renewable energies in the future, there will be a great demand for energy storage options and flexible control energy power plants. One option for the storage of surplus electrical energy is the production of hydrogen from water and its reconversion to electrical energy. To implement this reconversion in the near future and at reasonable cost, a process has been developed which allows the combustion of hydrogen with the oxygen that incurs during electrolysis, with high conversion efficiencies and zero emissions.

To cool down the Process, a steam power plant process with a second expansion is being integrated in the engine combustion process, resulting in combustion temperatures not higher than in common gasoline engines and a recuperation of the work of compression. Detailed thermodynamic calculations have been conducted with the software EES to investigate the process for its feasibility. Based on this, the process will be further investigated for a one-cylinder model both theoretically by computational fluid dynamics and by measurement on an engine test bench. To be able to optimize valve timing, ignition timing and engine geometries for the process, the focus of the project is on numerical flow simulation of the combined cycle.

First results show, that theoretical mechanical efficiencies of more than 64% are possible at acceptable temperatures in terms of material.

Schlüsselwörter: Wasserstoffverbrennung, Wasserstoffmotor, Nullemissionsmotor, Verbrennungssimulation, Gas- und Dampfprozess

1. Hintergrund und Zielsetzung

Die vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit beauftragte Leitstudie zum Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland aus dem Jahr 2011 prognostiziert für das Jahr 2050 im mittleren Szenario einen Anteil von 85% der Strombereitstellung aus erneuerbaren Quellen [1]. Dieser Anteil soll sich demnach zu etwa 70% aus Wind- und PV-Strom zusammensetzen. Um die großen Fluktuationen vor allem bei der Bereitstellung von Strom aus Windenergie sowohl kurz- als auch mittelfristig zu puffern, besteht für dieses Szenario ein großer Bedarf an Speicherkapazität. In einer Studie des Fraunhofer IWES wurde der notwendige Speicherbedarf für das Jahr 2050 für verschiedene Szenarien ermittelt und Stromüberschüsse „in beträchtlicher Größenordnung“ prognostiziert [2]. Als einzig realistische Möglichkeit der langfristigen Speicherung größerer Strommengen nennt die Studie die Speicherung in Form chemischer Energieträger wie Wasserstoff oder Methan [2].

Für die Rückverstromung der gespeicherten chemischen Energie stellen aufgrund ihres hohen elektrischen Wirkungsgrades von bis zu 60% (bezogen auf den Brennwert) Hochtemperaturbrennstoffzellen die theoretisch beste Alternative dar [3]. Trotz langjährigen intensiven Forschungsbemühungen sind Brennstoffzellen jedoch für viele Anwendungen in Bezug auf Lebensdauer und Kosten noch nicht konkurrenzfähig [4][5]. Wird mit Verbrennungsmotoren auf etablierte und kostengünstige Technologie zur Rückverstromung zurückgegriffen, liegt der mechanische Wirkungsgrad für fremdgezündete Motoren bei etwa 44% [8] und damit der elektrische Wirkungsgrad ohne Nutzung der Abwärme bei etwa 42% (bei einem Generatorwirkungsgrad von 95%).

Um den Wirkungsgrad dieses Umwandlungspfades zu erhöhen, kann die Verbrennung des Wasserstoffs für stationäre Anwendungen mit dem bei der Elektrolyse anfallenden Sauerstoff betrieben werden (siehe Abbildung 1). Die hohen Flammengeschwindigkeiten bei der Verbrennung von Wasserstoff mit reinem Sauerstoff bieten thermodynamische Vorteile gegenüber anderen Brennstoffen, da die idealisierte Gleichraumverbrennung des Otto-Prozesses besser realisiert werden kann [11]. Zudem werden durch die Abwesenheit von Kohlenstoff und Stickstoff faktisch keine Schadstoffe emittiert. Da die Verbrennungs- und Abgastemperaturen bei dieser Verbrennung sehr hoch sind, wurde ein motorischer Prozess entwickelt, welcher die Spitzentemperaturen auf ein materialtechnisch vertretbares Niveau reduziert und die verbleibende Abgasenergie als mechanische Arbeit nutzbar macht.

Das Entwicklungsziel dieses Projekts ist sowohl der auf einen hohen Wirkungsgrad optimierte Prozessentwurf für einen emissionsfreien Stationärmotor zur Rückverstromung von Wasserstoff, als auch der Nachweis und die Optimierung seiner Wirksamkeit durch numerische Simulationen und die Umsetzung eines 1-Zylinder-Prototypen.

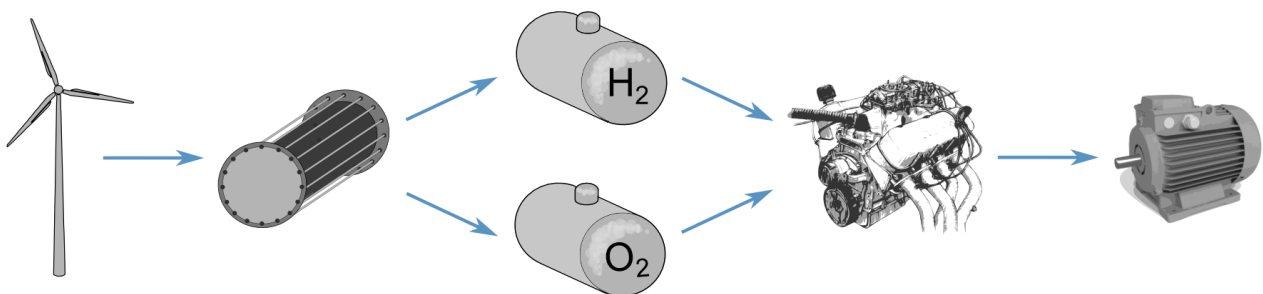


Abbildung 1: Gesamtumwandlungspfad des Speicherkonzeptes: Elektrolyse, Speicherung von H_2 und O_2 , motorische Verbrennung und Rückverstromung der mechanischen Energie

2. Prozesskonzept

Der entwickelte motorische Prozess kombiniert in zwei Stufen die ottomotorische Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff mit einem klassischen Dampfkraftprozess innerhalb eines Zylinders. In Anlehnung an einen kombinierten Gas-und-Dampfprozess (GuD) wird die Abgaswärme des Verbrennungsprozesses zur Verdampfung und Überhitzung in einem Dampfprozess genutzt und so ein höherer Wirkungsgrad erreicht, als in den Einzelprozessen möglich. Anstelle von zwei getrennten Prozessen soll hierbei der bei der Verbrennung entstehende Wasserdampf als Arbeitsfluid beide Teilprozesse durchlaufen. Abbildung 2 zeigt die schematische Abfolge der Zustandspunkte dieses Arbeitsfluids in p-v-Diagrammen.

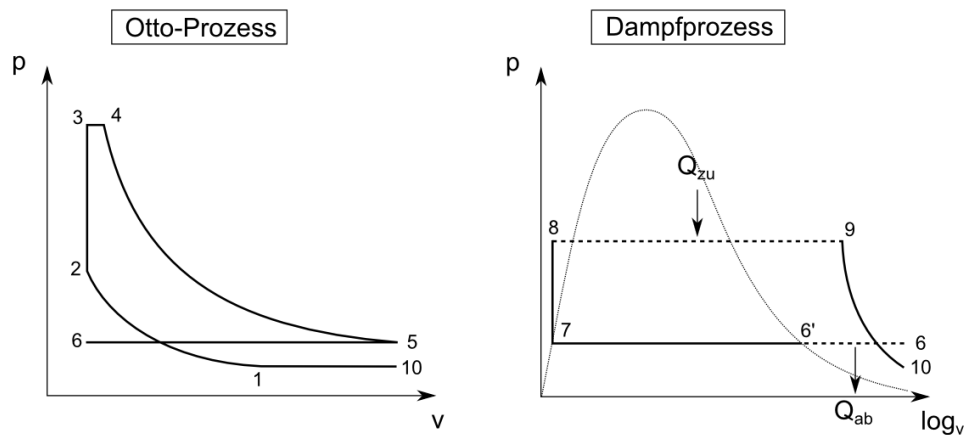


Abbildung 2: Zweistufiger Prozess aus ottomotorischer Verbrennung (links) und Dampfprozess (rechts)

Links in Abbildung 2 ist der innerzylindrische Verbrennungsprozess als realer Otto-Prozess mit folgenden Teilschritten zu sehen: 10→1 teilweises Ausschieben von Abgas, 1→2 Kompression des Wasserdampfes, 2→3 Direktinjektion von H_2 und O_2 und Gleichraumverbrennung, 3→4 Anteil Gleichdruckverbrennung im realen Otto-Prozess, 4→5 Expansion, 5→6 Ausschieben des Abgases. Nach dem Ausschieben aus dem Zylinder wird das Abgas außerhalb des Zylinders dem rechts in der Abbildung zu sehenden Dampfprozess zugeführt. Dem Wasserdampf wird zunächst in einem Wärmetauscher Wärme entzogen (6→6'). Anschließend wird der Dampf kondensiert (6'→7) und das Wasser durch eine Pumpe auf ein höheres Druckniveau gebracht (7→8). Auf diesem Druckniveau wird die zuvor entzogene Wärme wieder zugeführt und das Wasser verdampft und überhitzt (8→9). Der Dampf wird nun wieder in den Zylinder eingebracht und auf Umgebungsdruck und relativ niedrige Temperaturen entspannt (9→10). Dadurch ergeben sich für den Verbrennungsmotor die folgenden vier Takte:

1. Teilweises Ausschieben von Abgas + Kompression + Direkteinblasung von H_2 und O_2
2. Verbrennung + Gasexpansion
3. Ausschieben des Abgases
4. Dampfexpansion

Bisherige Untersuchungen zur motorischen Verbrennung von Wasserstoff konzentrierten sich im Wesentlichen auf mobile Anwendungen und damit auf die Verbrennung mit Luft. Der hier vorgestellte motorische Prozess verbindet einige Vorteile gegenüber der motorischen Verbrennung mit Luft:

- Höhere Leistungsdichte, geringeres Ballastgasvolumen
- Keine Emissionen
- Höherer Wirkungsgrad des zweistufigen Prozesses
- Verringerung der Klopfneigung durch Kühlung des Zylinders mit zweiter Expansion

Der Prozess außerhalb des Zylinders wird wie in Abbildung 3 schematisch zu erkennen durch vier Prozessschritte markiert: die Entwärmung des heißen Abgases, die Abfuhr der latenten Kondensationsenthalpie, die Druckerhöhung des kondensierten Wassers und die Verdampfung und Überhitzung durch die zuvor aus dem Abgas abgeführte Wärme.

Insgesamt wurde für den motorischen Verbrennungsprozess unter Annahme eines vollkommenen Motors ein Wirkungsgrad von 50% berechnet. Der Gesamtprozess mit zweiter Gasexpansion erreicht einen theoretischen Wirkungsgrad von 64%.

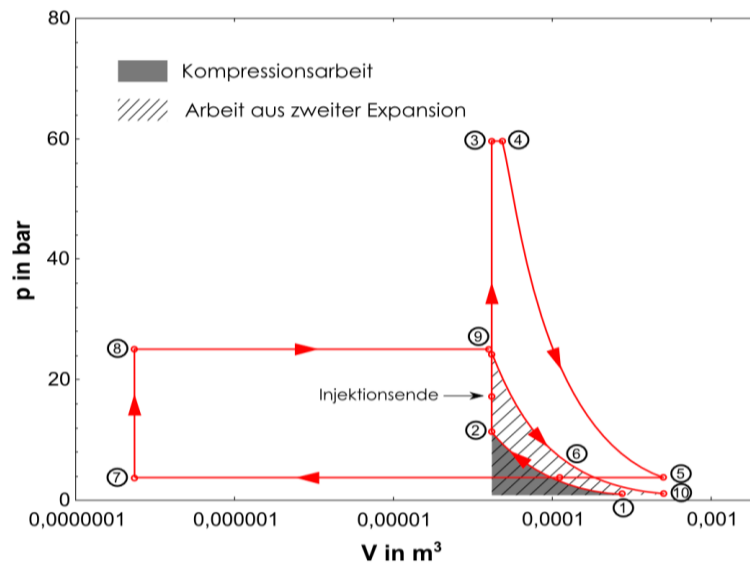


Abbildung 4: p - V -Diagramm der Simulierten Prozessschritte mit Darstellung der Kompressions- und Expansionsarbeit

3.2 Numerische Strömungssimulation

Um neben thermodynamischen auch strömungsmechanische Prozesse zu berücksichtigen und die Entwicklung eines Motorprototypen vorzubereiten, wird derzeit ein CFD-Modell zur Berechnung der innerzylindrischen Prozesse, d.h. der Verbrennung und der zweiten Gasexpansion mithilfe des numerischen Löser ANSYS CFX erstellt. Zur Validierung der zahlreichen Modellannahmen für den speziellen Anwendungsfall wird zunächst eine exakt vermessene Zylinderströmung simuliert und das Modell an die Messdaten angepasst. Abbildung 5 zeigt links das erstellte numerische Gitter für das 1-Zylinder-Modell und rechts die durch *Particle Image Velocimetry* (PIV) erfassten Messdaten zur Validierung. Die von Baum et al. durchgeführte Messungen sind in [8] ausführlich beschrieben.

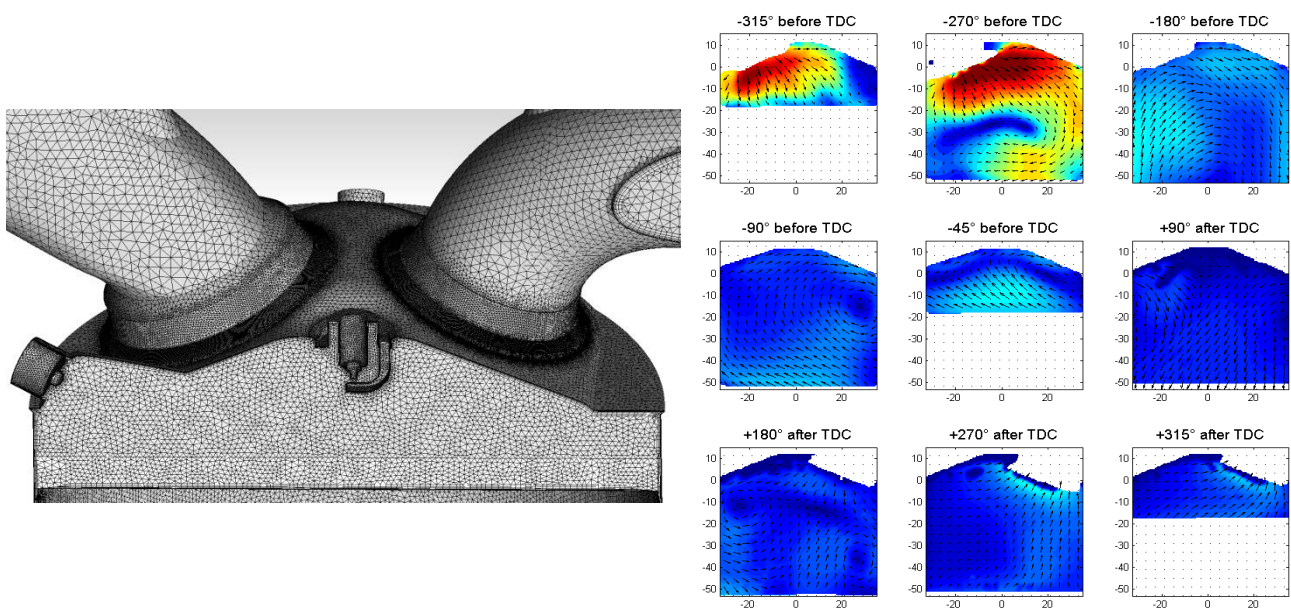


Abbildung 5: Numerisches Gitter zur Validierung des CFD-Modells (links) und gemessene mittlere Strömungsgeschwindigkeiten im Zylinder für verschiedene Kurbelwinkel (rechts)

Mithilfe des validierten CFD-Modells kann der gesamte Prozess in einer Prototypengeometrie zuverlässig simuliert werden. Anhand des Modells lassen sich geometrische Optimierungen sowie Form und Zeitpunkt der Gasinjektion in den Zylinder vorab berechnen und Zündzeiten optimal anpassen.

4. Prototyp und Motorprüfstand

Aufbauend auf Erkenntnissen aus den durchgeführten CFD-Simulationen soll zum praktischen Nachweis der Durchführbarkeit des Prozesses ein 1-Zylinder-Prototyp entwickelt werden. Als Grundlage hierfür dient ein 1-Zylinder-Schiffsdieselmotor der Firma Farymann mit einem angepassten Zylinderkopf mit drei Ventilen (Einlass-, Auslass- und Ablassventil), zwei Gasinjektoren zur Direkteinblasung von Wasserstoff und Sauerstoff und einer Zündkerze mit Druckindizierung. Der Prototyp soll den zweistufigen Prozess realisieren und muss demnach auch den Dampfkraftprozess mit Wärmetauschern, Kondensator und Kondensatpumpe umfassen sowie in einem Motorenprüfstand die Messung der Drücke, Temperaturen und Leistungsabgabe ermöglichen.

5. Ausblick und Herausforderungen

Mit dem vorgestellten Prozess soll ein kostengünstiges System zur Rückverstromung von Wasserstoff mit höherem Wirkungsgrad als wasserstoffbetriebene Motor-BHKWs und höherer Zuverlässigkeit als Brennstoffzellen-BHKWs entwickelt werden. Dazu muss zunächst die theoretisch berechnete Wirksamkeit unter Verwendung von 3D-CFD-Simulationen und einem zu entwickelnden Prototypen praktisch bewiesen werden. Besonderes Augenmerk gilt bei der Entwicklung einerseits der Beherrschung des Klopfverhaltens und andererseits dem Handling der heißen Abgase von bis zu 1500°C im Dampfkraftprozess.

Literatur

- [1] J. Nitsch et al.: „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“, Schlussbericht der Leitstudie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2012
- [2] M. Sterner et al.: „Energiewirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Windgas-Angebotes“, Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), 2011
- [3] A. León: „Hydrogen Technology: Mobile and Portable Applications“, Springer, 2008
- [4] H. Wendt: „Brennstoffzellen“, *BWK- Das Energie Fachmagazin*, Band 60, 2008
- [5] H. Wendt: „Stationäre Brennstoffzellen“, *BWK- Das Energie Fachmagazin*, Band 58, 2006
- [6] S. Ellgas: „Simulation of a hydrogen internal combustion engine with cryogenic mixture formation“, Culliver Verlag, 2008
- [7] U. Gerke: „Numerical analysis of mixture formation and combustion in a hydrogen direct-injection internal combustion engine“, Culliver Verlag, 2007
- [8] E. Baum et al.: "On the validation of LES applied to internal combustion engine flows: part 1: comprehensive experimental database", *Flow, Turbulence and Combustion*, Band 92, 2014
- [9] H. Eichlseder, M. Klell: „Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung“, Springer, 2010
- [10] S. Verhelst: "A Study of the Combustion in Hydrogen-Fuelled Internal Combustion Engines", Dissertation, Ghent University, 2005
- [11] S. Verhelst, R. Sierens, S. Verstraeten: "A critical review of experimental research on hydrogen fueled SI engines", SAE Technical Paper, 2006