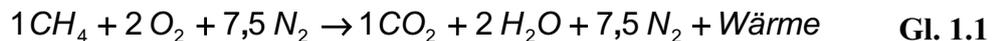


1. Einleitung

Der zunehmend größere Energiebedarf unserer Gesellschaft erfordert eine möglichst effiziente und ökologisch verträgliche Energiewandlung. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Erdöl, Kohle und Erdgas ist ein wichtiger Bestandteil unserer heutigen Energieversorgung. Erdgas, das zu großen Teilen aus Methan besteht (hier Erdgas-Ost 98%, [27]), ist ein wichtiger Energieträger, der in vielen Verbrennungssystemen wie z.B. Gasturbinen, Industrie- und Haushaltsbrennern eingesetzt wird.

In einem Verbrennungsprozess werden Brennstoff und Oxidationsmittel gemischt und verbrannt. Das Oxidationsmittel ist meistens Luft, der Brennstoff kann flüssig, wie bei einem Benzin- oder Dieselmotor, oder fest wie bei einem Kohlekraftwerk oder gasförmig wie bei einem Erdgasbrenner sein. Man nennt die Verbrennung stöchiometrisch, wenn sich Brennstoff (hier CH_4) und Oxidationsmittel (hier O_2) in einem Gemisch zumindest theoretisch vollständig verbrauchen. Wenn man mehr Brennstoff hat, nennt man die Verbrennung fett, wenn man mehr Oxidationsmittel hat, mager. Eine Flamme wird definiert als: "Mischung von Brennstoff, Sauerstoff und Verbrennungsprodukten, in der eine chemische Reaktion abläuft, bei der chemisch gebundene Energie in Wärme (und Licht) überführt wird" [33]. Die Verbrennung von Methan (CH_4) und Luft (21% aus Sauerstoff (O_2) und 79% Stickstoff (N_2)) zu Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) wird oft vereinfacht durch die Reaktionsgleichung Gl. 1.1 beschrieben.



Es ist jedoch aus Flammenmessungen bekannt [36], dass in einer Flamme mehr Spezies vorkommen als die in Reaktionsgleichung Gl. 1.1 aufgeführten.

Eines der größten aktuellen Probleme in der Verbrennung ist die Schadstoffproblematik. Bei fast allen Verbrennungsvorgängen werden Schadstoffe wie z.B. Stickoxide, Schwefelwasserstoffe usw. freigesetzt [4,23, 36]. Der Gesetzgeber reagiert darauf mit immer härteren Grenzwerten für Schadstoffkonzentrationen. Technisch relevante Verbrennungsvorgänge sind meist hochturbulent, da bei einer turbulenten Verbrennung im Vergleich zu laminarer wesentlich höhere Leistungsdichten erreicht werden können [37]. Die turbulente Verbrennung ist allerdings wesentlich komplexer als die laminare. Dies liegt zum einen am chaotischen Charakter der Turbulenz, als auch an Prozessen wie z.B. der Chemie-Turbulenz-Wechselwirkung, die hier eine große Rolle spielen [21]. Um Verbrennungssysteme so auslegen zu können, dass sie den neuen Anforderungen genügen, benötigt man speziell auch ein tieferes Verständnis

der Chemie-Turbulenz-Wechselwirkung. Unter dieser versteht man die gegenseitige Beeinflussung von turbulenter Strömung und chemischer Reaktion in einem reaktiven Gemisch [48,49]. Beispiele für solche Effekte sind das Auftreten von erhöhten Flammgeschwindigkeiten, unvollständige Verbrennung und im Extremfall Flammenlöschung, außerdem das Abheben von Flammen oder Flammenstabilisierung [21]. Durch Messung von Temperatur-, Geschwindigkeits- und Konzentrationsverteilungen in Flammen können neue Erkenntnisse gewonnen werden. Gezielte dem Problem angepasste Experimente ermöglichen eine Entwicklung und Validierung von Modellen zur Beschreibung der komplexen chemischen und physikalischen Vorgänge. Die fortschreitende Entwicklung auf dem Gebiet der Verbrennungsforschung stellt immer höhere Ansprüche an die Entwicklungswerkzeuge. Es genügt nicht mehr, einzelne Größen wie z.B. die Temperatur, Geschwindigkeit oder die Konzentration einzelner Spezies isoliert zu messen. Man benötigt in immer größerem Maß zusätzliche Informationen über die zeitliche und örtliche Entwicklung dieser Größen und der Korrelation dieser Größen miteinander. Der Anspruch, möglichst viele Parameter wie z.B. Temperatur und Spezieskonzentrationen gleichzeitig zu messen, ohne das System dabei zu beeinflussen, stellt an die Messtechnik höchste Anforderungen. Die Art der benötigten Information und die Anforderungen an die Messtechnik hängen von der speziellen Problemstellung ab.

Die Notwendigkeit, Modelle für turbulente Verbrennungsprozesse zu entwickeln, entsteht aus der Tatsache, dass eine detaillierte Berechnung für technisch relevante Systeme wegen des hohen Rechenaufwandes nicht möglich ist [45]. Um den Rechenaufwand zu minimieren müssen Vereinfachungen in Modellen eingeführt werden; um diese zu überprüfen und weiter zu entwickeln, sind Experimente notwendig.

Am Institut für Technische Verbrennung steht die Modellierung der Chemie im Vordergrund. Es wäre zwar wünschenswert, gleichzeitig die Verteilung von Temperatur, Geschwindigkeits und Konzentration in einer Flamme zu messen, aus experimentellen Gründen wird allerdings nur die Temperatur- und Konzentrationsverteilung gemessen. Bei einem vorgemischten, staukörperstabilisierten Erdgas-Luft-Brenner ist besonders im Rückstromgebiet über dem Staukörper mit einem starken Einfluss der Chemie-Turbulenz-Wechselwirkung zu rechnen. Diese Art von Brenner ist deshalb für Untersuchungen der Chemie-Turbulenz-Wechselwirkung geeignet [44].

2. Turbulenzmodellierung und Experiment

2.1. Turbulente Prozesse

Unter einer Turbulenter Strömung versteht man im allgemeinen eine durch das Auftreten von Wirbeln gekennzeichnete Strömung. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass die Geschwindigkeitsvektoren ungeordneten, chaotischen Änderungen unterworfen sind. Wenn man eine Größe q hat, die solchen Änderungen unterworfen ist, bezeichnet man diese Änderungen und den Prozess der dafür verantwortlich ist als turbulent.

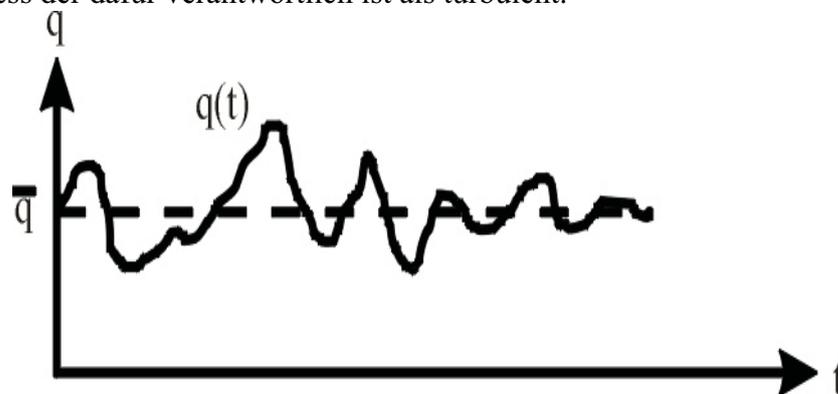


Abbildung 2.1 Beispielhafter, zeitlicher Verlauf einer Größe q

In Abbildung 2.1 wird beispielhaft die zeitliche Entwicklung einer Größe q gezeigt. Dabei fluktuiert die Größe $q(t)$, ist aber im zeitlichen Mittel (\bar{q}) konstant. Man spricht dabei von einem statistisch stationären Prozess. Wenn man einen zeitlich langsam (langsam im Vergleich zu den Fluktuationen) veränderlichen Wert hat, dem eine Fluktuation überlagert ist, bezeichnet man diesen Prozess als statistisch instationär. Dabei ist der zeitliche Mittelwert natürlich stark vom gewählten Mittelungszeitraum abhängig. Wenn kleinste Änderungen wie z.B. die Fluktuation einzelner Parameter schon zu drastischen Änderungen im Verhalten des Gesamtsystems führen können spricht man von Chaos, dies ist in Verbrennungsprozessen aber meist nicht der Fall. Um den exakten zeitlichen Verlauf von $q(t)$ zu beschreiben, benötigt man sehr viele Informationen. Für die Beschreibung einer mittleren zeitlichen Entwicklung benötigt man deutlich weniger Informationen. Es ist deshalb sinnvoll, bei der Beschreibung turbulenter Prozesse den aktuellen Wert einer Funktion als Summe aus seinem Mittelwert und seiner Schwankung darzustellen, wie in Gl. 2.1 gezeigt.

$$q(\vec{r}, t) = \bar{q}(\vec{r}, t) + q'(\vec{r}, t) \quad \text{Gl. 2.1}$$

Dabei ist \bar{q} der Mittelwert und q' die Schwankung von q , was durch den hochgestellten Strich gekennzeichnet wird. Durch Mittelung von Gl. 2.1 erhält man die Bedingung für den zeitlichen Mittelwert der Schwankung q' (Gl. 2.2).

$$\overline{q'} = 0 \quad \text{Gl. 2.2}$$

Die mittlere Größe der Schwankungen (Standardabweichung), speziell die der Geschwindigkeitsfluktuationen werden mit dem Mittelwert ins Verhältnis gesetzt. Diese ist ein Maß für die Turbulenz und wird als Turbulenzintensität bezeichnet.

2.2. Turbulenzmodellierung

Mit der Methode der direkten numerischen Simulation (DNS) kann theoretisch ein Verbrennungssystem berechnet werden [21]. Dabei werden die Navier-Stokes-Gleichung, die Kontinuitätsgleichung und die Spezieserhaltungsgleichungen direkt gelöst. Dabei müssen sowohl die kleinsten als auch die größten Längenskalen aufgelöst werden. Die benötigte Rechenzeit beschränkt diese Methode allerdings auf kleinste Bereiche ca. 1 cm. Die Berechnung eines technisch relevanten Systems, wie einem Motor oder ein Kraftwerksbrennraum ist deshalb in absehbarer Zeit nicht möglich. Bei einer DNS würde man den exakten zeitlichen Verlauf einer Realisierung erhalten. Dies würde in der Formulierung von Kap. 2.1 der Beschreibung eines exakten Verlaufes von $q(t)$ bedeuten. Man hätte dabei zwei große Probleme, zum einen hätte man sehr viele Informationen über lokale Strukturen, an denen man gar nicht interessiert ist und zum Anderen benötigt man, um statistische Aussagen machen zu können sehr viele solcher Realisierungen.

Um ein Verbrennungssystem auslegen zu können, ist meist nicht die Kenntnis aller lokalen Strukturen notwendig. Es genügen oft einige systembestimmende Parameter wie z.B. die mittlere zeitliche Entwicklung von Temperatur, Zusammensetzung und Turbulenzgrad. Ein Ansatz dafür ist die Mittelung der Navier-Stokes-Gleichung [38]. Dazu werden die Werte durch die Summe aus ihrem Mittelwert und ihrer Schwankung ersetzt (Gl. 2.1). Durch Mittelung der Navier-Stokes-Gleichung bekommt man die Reynoldsschen Gleichungen. Mit den in Kap. 2.1 neu eingeführten Schwankungen erhält man allerdings zusätzliche Glieder in den Gleichungen, die Reynoldsspannungen genannt werden [38]. Das Problem dabei ist, dass man durch die Einführung neuer Variablen mehr Unbekannte als Gleichungen erhält; dies nennt man das Schließungsproblem der Turbulenz. Um die Reynoldsspannungen zu beschreiben, werden verschiedene Modelle eingesetzt, die diese in Abhängigkeit von den

Mittelwerten beschreiben. Ein kurzer Überblick wird in [21] gegeben. Sobald die Chemie mit berücksichtigt wird, kommt ein chemischer Quellterm hinzu. Er beschreibt die Bildung und den Verbrauch der einzelnen Spezies. Um den Quellterm berechnen zu können, benötigt man die mittleren Reaktionsgeschwindigkeiten ω der Spezies. Diese kann aber nicht aus den Mittelwerten von Temperatur (T) und Zusammensetzung (Molenbrüche x_i) berechnet werden, da die funktionale Abhängigkeit stark nichtlinear ist.

$$\overline{\omega(\mathbf{T}, \mathbf{x}_i)} \neq \omega(\overline{\mathbf{T}}, \overline{\mathbf{x}_i}) \quad \text{Gl. 2.3}$$

Dadurch entsteht ein neues Schließungsproblem. Diese kann man dadurch „lösen“, dass man die entsprechenden Werte experimentell bestimmt oder modelliert [44,47].

Da der Gesamtkomplex äußerst kompliziert ist, versucht man, die Modelle modulweise aufzubauen, mit Submodellen für Chemie, Turbulenz und Kopplung. Diese Modelle werden meist nochmals in Teilprobleme aufgespalten, soweit dies möglich ist. Man ist bestrebt, die Probleme so weit zu isolieren, dass man mit speziell angepassten Experimenten solche Teilprobleme detailliert untersuchen kann. Mit den Ergebnissen können dann Modelle validiert und weiterentwickelt werden. Im Idealfall kann jeder einzelne Schritt im Modell mit experimentellen Daten belegt werden.

2.3. Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

Der zeitliche Mittelwert einer beliebigen Größe ist leicht berechenbar, wenn man die entsprechende Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (englisch: **probability density function** kurz **PDF**) kennt.

$$P(\rho, v_x, v_y, v_z, x_1, \dots, x_s, T; \vec{r}) d\rho dv_x dv_y dv_z dx_1, \dots, dx_s dT \quad \text{Gl. 2.4}$$

Sie gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass das Medium am Ort \mathbf{r}

- eine Dichte zwischen ρ und $\rho+d\rho$ hat,
- die Geschwindigkeit in x-Richtung zwischen v_x und v_x+dv_x liegt,
- die Geschwindigkeit in y-Richtung zwischen v_y und v_y+dv_y liegt,
- die Geschwindigkeit in z-Richtung zwischen v_z und v_z+dv_z liegt,
- die Molenbrüche x_i , Werte zwischen x_i und x_i+dx_i haben und
- die Temperatur im Bereich T bis $T+dT$ liegt.