

# Statistische Analyse von Skalarwerten einer turbulenten Vormischflamme

Dem Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur  
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Thabo Stahler**

aus Frankfurt am Main

|                             |                                 |
|-----------------------------|---------------------------------|
| Berichterstatter:           | Prof. Dr. rer. nat. A. Dreizler |
| Mitberichterstatter:        | Prof. Dr.-Ing. D. Trimis        |
| Tag der Einreichung:        | 26. Mai 2015                    |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 20. Juli 2015                   |

Darmstadt 2015

D17

### **Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;  
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

### **Stahler, Thabo:**

Statistische Analyse von Skalardaten einer turbulenten Vormischflamme  
ISBN 978-3-86376-169-1

### **Alle Rechte vorbehalten**

1. Auflage 2015

© Optimus Verlag, Göttingen

© Coverfotos: Thabo Stahler

URL: [www.optimus-verlag.de](http://www.optimus-verlag.de)

Printed in Germany

Papier ist FSC zertifiziert (holzfrei, chlorfrei und säurefrei,  
sowie alterungsbeständig nach ANSI 3948 und ISO 9706)

Das Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes in Deutschland ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

---

## Danksagung

Die vorgelegte Dissertation ist im Rahmen meiner fünfjährigen Arbeitszeit am Institut für Reaktive Strömungen und Messtechnik entstanden. Aus diesem Grund möchte ich mich zunächst ganz herzlich bei Prof. Dr. rer. nat. Andreas Dreizler, für die Ermöglichung der Promotion bedanken. Er stand mir über den ganzen Zeitraum stets mit guten Ratschlägen sowohl wissenschaftlicher Natur als auch darüber hinaus zur Verfügung. Die vielfältige Arbeit, in die ich involviert war, hat mir zudem die Möglichkeit geboten, weitere Facetten über das Wissenschaftliche hinaus kennenzulernen.

Mein weiterer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Dimosthenis Trimis vom Engler-Bunte-Institut, Bereich Verbrennungstechnik des *Karlsruhe Institute of Technology* (KIT) für die Übernahme des Koreferats, dem daraus resultierenden Interesse an meiner Arbeit und der Möglichkeit, meine Arbeit im Rahmen eines Seminarvortrags in seiner Arbeitsgruppe vorzustellen.

Ich möchte mich außerdem bei meinen Kollegen dafür bedanken, dass sie ein so angenehmes Arbeitsumfeld ermöglicht haben. Bei fachlichen Problemen bekam ich stets ausreichend Unterstützung, woraus regelmäßig angeregte Diskussionen entstanden, die das Verfassen der vorgelegten Arbeit überhaupt erst möglich gemacht haben. Im Speziellen möchte ich hier meinen aktuellen Bürokollegen Felix und meine ehemaligen Bürokollegen Norman, Matthias, Jhon und Benjamin S. nennen. Darüber hinaus habe ich es sehr geschätzt, auch in der Freizeit viel mit den Kollegen unternehmen zu können. Hier seien vor allem die gemeinsamen Sportevents wie Kleinwalsertal-Tour, Datterich und Mittags-Pausen-Lauf genannt. Vielen Dank außerdem an Andreas für das Ludwigen der Dissertationsschrift. Des Weiteren wäre die viele Laborarbeit ohne die fachlich Hochwertige Unterstützung der Mitarbeiter der Werkstatt nicht zu bewältigen gewesen.

Ein ganz großer Dank gilt zudem Prof. Dr.-Ing. Dirk Geyer, Fachbereich Maschinenbau und Kunststofftechnik, Hochschule Darmstadt (hda) Darmstadt. Er hat sich zu jeder Zeit mit guten Vorschlägen eingebracht. Die häufig angeregten Diskussionen haben viele Früchte getragen. Er stand mir außerdem beim Veröffentlichen der Ergebnisse sehr zur Seite und hatte auch so immer ein offenes Ohr.

Ein besonderer Dank gilt außerdem Rob Barlow, Bob Harmon und Gaetano Magnotti. Sie haben mir geholfen, einen großen Teil der in dieser Arbeit gezeigten Daten aufzunehmen. Neben ihrer Hilfe vor Ort (*Sandia National Laboratories, Livermore, CA, USA*) standen sie mir auch im Anschluss immer zu Diskussionen zur Verfügung und haben viele Anstöße zur Interpretation der Ergebnisse geliefert.

Last but not least möchte ich mich von ganzem Herzen bei meiner Familie bedanken. Zum einen haben sie mir überhaupt mein Studium ermöglicht und so für mein unglaubliches Glück gesorgt. Zum anderen standen sie mir auch immer zur Seite und haben Hilfe angeboten, wenn dies nötig war. Ganz besonders möchte ich natürlich meiner Frau Christina danken, die nicht nur meine ganze Pendelei und den Stress der Arbeit über sich hat ergehen lassen müssen, sondern mich überdies hinaus auch noch bei meinem Triathlon und sonstigem Sportprogramm unterstützt.

---

*Wer all seine Ziele erreicht, hat sie zu niedrig gewählt.*  
Herbert von Karajan

---

## Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen als die von mir angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Ich erkläre außerdem, dass ich bisher noch keinen Promotionsversuch unternommen habe.

Thabo Stahler

Darmstadt, den 29. November 2015

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                    |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                                  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Motivation . . . . .                                               | 1         |
| 1.2      | Stand der Forschung . . . . .                                      | 4         |
| 1.3      | Zielsetzung und Aufbau der Arbeit . . . . .                        | 6         |
| <b>2</b> | <b>Theoretische Grundlagen</b>                                     | <b>7</b>  |
| 2.1      | Fluidmechanik . . . . .                                            | 7         |
| 2.1.1    | Erhaltungsgleichungen . . . . .                                    | 7         |
| 2.1.2    | Turbulenz . . . . .                                                | 9         |
| 2.2      | Charakterisierung von Flammentypen . . . . .                       | 12        |
| 2.2.1    | Chemische Reaktion und Reaktionskinetik . . . . .                  | 12        |
| 2.2.2    | Vorgemischte Verbrennung . . . . .                                 | 15        |
| 2.2.3    | Nicht vorgemischte Verbrennung . . . . .                           | 18        |
| 2.3      | Stratifizierte Verbrennung . . . . .                               | 20        |
| 2.3.1    | Experimente in laminaren Strömungen . . . . .                      | 21        |
| 2.3.2    | Experimente in turbulenten Strömungen . . . . .                    | 22        |
| 2.3.3    | Numerische Simulationen . . . . .                                  | 25        |
| <b>3</b> | <b>Grundlagen der Messtechnik und Kalibration</b>                  | <b>29</b> |
| 3.1      | Stratifizierter Brenner . . . . .                                  | 29        |
| 3.2      | Messtechnik . . . . .                                              | 31        |
| 3.2.1    | Thermographische Phosphore . . . . .                               | 32        |
| 3.2.2    | Laserinduzierte Fluoreszenz des CO-Moleküls . . . . .              | 35        |
| 3.2.3    | Raman-/Rayleigh-Linien-Messung . . . . .                           | 38        |
| 3.3      | Kalibrationsströmungen . . . . .                                   | 44        |
| 3.3.1    | Kalibriergase . . . . .                                            | 44        |
| 3.3.2    | Flachflammen-Brenner . . . . .                                     | 45        |
| 3.3.3    | Vertikalflammen-Brenner . . . . .                                  | 46        |
| <b>4</b> | <b>Experimenteller Aufbau und Diagnostik</b>                       | <b>49</b> |
| 4.1      | Raman/Rayleigh-Prüfstand Darmstadt . . . . .                       | 49        |
| 4.1.1    | Experimenteller Aufbau . . . . .                                   | 49        |
| 4.1.2    | Simulierte Emissionsspektren . . . . .                             | 52        |
| 4.1.3    | Erstellen der Apparatfunktion . . . . .                            | 54        |
| 4.1.4    | Dispersion . . . . .                                               | 55        |
| 4.1.5    | Kalibrieren des Messsystems . . . . .                              | 56        |
| 4.2      | <i>Crossed Planar Rayleigh Imaging</i> -Aufbau Darmstadt . . . . . | 58        |

|          |                                                                                       |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.1    | Experimenteller Aufbau . . . . .                                                      | 58         |
| 4.2.2    | Abschätzung der Kolmogorov-Zeit/-Länge . . . . .                                      | 61         |
| 4.2.3    | Charakterisierung der Kameras . . . . .                                               | 64         |
| 4.2.4    | Rauschquellen der Kamera . . . . .                                                    | 64         |
| 4.2.5    | Entrauschen der Aufnahmen . . . . .                                                   | 65         |
| 4.2.6    | Konturerkennung der Flammenfront . . . . .                                            | 66         |
| 4.2.7    | Bestimmung des zur Flammenfront normalen Vektors . . . . .                            | 68         |
| 4.2.8    | Berechnung des Flammennormalenvektors . . . . .                                       | 69         |
| 4.2.9    | Verifikation der Vektorberechnung . . . . .                                           | 70         |
| 4.2.10   | Kombination von Raman/Rayleigh-Spektroskopie und CPRI . . . . .                       | 71         |
| 4.3      | Wandtemperaturbestimmung des Pilotrohrs . . . . .                                     | 74         |
| 4.3.1    | Experimenteller Aufbau . . . . .                                                      | 75         |
| 4.3.2    | Beschichtung des Keramikrohres . . . . .                                              | 77         |
| 4.3.3    | Maskierung und Parametrisierung des Keramikrohres . . . . .                           | 78         |
| 4.3.4    | Anpassen des Auswertalgorithmus . . . . .                                             | 80         |
| 4.4      | <i>Crossed Planar Rayleigh Imaging</i> -Aufbau Sandia National Laboratories . . . . . | 80         |
| 4.4.1    | Experimenteller Aufbau . . . . .                                                      | 81         |
| 4.4.2    | Entrauschen der Aufnahmen . . . . .                                                   | 83         |
| 4.4.3    | Kalibration . . . . .                                                                 | 85         |
| 4.4.4    | Konturerkennung der Flammenfront . . . . .                                            | 86         |
| 4.4.5    | Datenkonditionierung . . . . .                                                        | 87         |
| 4.5      | Axiale Variation der Flammhalterposition . . . . .                                    | 89         |
| <b>5</b> | <b>Experimentelle Ergebnisse</b>                                                      | <b>91</b>  |
| 5.1      | Analyse TSF_A . . . . .                                                               | 91         |
| 5.1.1    | Vergleich TSF_A zwischen Sandia und Darmstadt . . . . .                               | 91         |
| 5.1.2    | Herausstellen markanter radialer Messpunkte . . . . .                                 | 95         |
| 5.1.3    | Variation axialer Flammhalterposition . . . . .                                       | 96         |
| 5.1.4    | Wandtemperaturbestimmung mittels Thermographischer Phosphore . . . . .                | 102        |
| 5.2      | Mehrfachkonditionierte Statistiken TSF_A . . . . .                                    | 105        |
| 5.2.1    | 3D-Flammenvektor und CH <sub>4</sub> -Trajektorien . . . . .                          | 105        |
| 5.2.2    | Konditionierte Temperatur . . . . .                                                   | 109        |
| 5.2.3    | Konditionierte Spezieskonzentrationen . . . . .                                       | 112        |
| 5.3      | Vergleich von TSF_A, TSF_C und TSF_G . . . . .                                        | 116        |
| 5.3.1    | Einordnen der Flammen TSF_A, TSF_C und TSF_G in das Regime-Diagramm . . . . .         | 117        |
| 5.3.2    | Temperatur, Äquivalenzverhältnis und Spezieskonzentrationen . . . . .                 | 117        |
| 5.4      | Radiale Profile der Flamme A und D im Vergleich . . . . .                             | 127        |
| 5.4.1    | Mittelwert und Standardabweichung der Temperatur und Spezieskonzentrationen . . . . . | 127        |
| 5.4.2    | Untersuchung der CH <sub>4</sub> -Massenbruch-Überhöhung . . . . .                    | 131        |
| 5.4.3    | Grenzen der Matrix-Inversion-Methode . . . . .                                        | 135        |
| 5.4.4    | Herausstellen markanter radialer/axialer Messpunkte . . . . .                         | 137        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                                                   | <b>139</b> |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| <b>A Anhang</b>                       | <b>143</b> |
| A.1 Streudiagramme Flamme D . . . . . | 143        |
| <b>Literaturverzeichnis</b>           | <b>147</b> |



# Tabellenverzeichnis

|     |                                                                                              |     |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1 | Sortierung nach Flammentypen . . . . .                                                       | 13  |
| 3.1 | Vermessene Konfigurationen des Brenners . . . . .                                            | 31  |
| 3.2 | Raman-Verschiebungen . . . . .                                                               | 40  |
| 3.3 | Raman-Aktivität einiger einfacher Moleküle . . . . .                                         | 43  |
| 3.4 | Zusammensetzung Kalibriergase . . . . .                                                      | 44  |
| 4.1 | Übersicht über aufgenommene und auswertbare Daten . . . . .                                  | 71  |
| 4.2 | Häufigkeit des Auftretens von <i>back</i> bzw. <i>front support</i> der Flammen. . . . .     | 73  |
| 4.3 | Typische Signal-Zu-Rausch-Verhältnisse . . . . .                                             | 83  |
| 5.1 | Anzahl der Ereignisse für jedes Äquivalenzverhältnis nach der Konditionie-<br>rung . . . . . | 108 |
| 5.2 | Einordnung der Brennerkonfigurationen . . . . .                                              | 117 |

# Abbildungsverzeichnis

|      |                                                                                                     |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Energiekaskade . . . . .                                                                            | 10 |
| 2.2  | Aktivierungsenergie $E_A$ für eine exotherme Reaktion . . . . .                                     | 14 |
| 2.3  | Schematische Darstellung einer vorgemischten Flamme . . . . .                                       | 15 |
| 2.4  | Borghi-Peters-Diagramm . . . . .                                                                    | 16 |
| 2.5  | Laminare vs. turbulente Bunsenflamme . . . . .                                                      | 18 |
| 2.6  | Schematische Darstellung einer Diffusionsflamme . . . . .                                           | 19 |
| 2.7  | Homogene und <i>back supported</i> stratifizierte laminare vorgemischte Flamme                      | 21 |
| 2.8  | <i>Back supported</i> Flamme vs. <i>front supported</i> Flamme . . . . .                            | 22 |
| 2.9  | Flammenstreckung abhängig von der Mischung . . . . .                                                | 24 |
| 3.1  | Verwendeter Stratifizierter Brenner . . . . .                                                       | 30 |
| 3.2  | Flammenfotos . . . . .                                                                              | 31 |
| 3.3  | Phosphoreszenz im Konfigurationskoordinatendiagramm . . . . .                                       | 33 |
| 3.4  | Abklingverhalten eines idealen thermographischen Phosphors. . . . .                                 | 34 |
| 3.5  | Singulett-Potentialverlauf für die niedrigsten Singulett-Zustände von CO .                          | 36 |
| 3.6  | Polarisierung der Rayleigh-Streuung . . . . .                                                       | 40 |
| 3.7  | Elastischer und inelastischer Streuprozess . . . . .                                                | 42 |
| 3.8  | Flachflammen-Brenner . . . . .                                                                      | 45 |
| 3.9  | Vertikalflammen-Brenner . . . . .                                                                   | 47 |
| 4.1  | Raman/Rayleigh-Aufbau am RSM . . . . .                                                              | 50 |
| 4.2  | Abmessungen des Laserstrahls im Kontrollvolumen . . . . .                                           | 50 |
| 4.3  | Temperaturabhängiges Raman-Signal der einzelnen gemessenen Spezies . .                              | 53 |
| 4.4  | <i>Bowling</i> -Effekt der Raman-Kamera . . . . .                                                   | 54 |
| 4.5  | Apparatefunktion basierend auf einer Rayleigh-Aufnahme . . . . .                                    | 55 |
| 4.6  | Kalibration anhand des Flachflammen-Brenners . . . . .                                              | 57 |
| 4.7  | Raman/Rayleigh und <i>Crossed Planar Rayleigh Imaging</i> -Aufbau am RSM,<br>TU Darmstadt . . . . . | 59 |
| 4.8  | Schematische Darstellung der gekreuzten Lichtschnitte . . . . .                                     | 60 |
| 4.9  | Zeitliche Verschaltung des <i>Crossed Planar Rayleigh Imaging</i> (CPRI)-Aufbaus                    | 61 |
| 4.10 | Geschwindigkeitsfluktuation und deren Mittelung . . . . .                                           | 63 |
| 4.11 | Registrierung der Kameras . . . . .                                                                 | 67 |
| 4.12 | Segmentierung in verbrannte bzw. unverbrannte Bereiche . . . . .                                    | 68 |
| 4.13 | Anfitten der Werte und Bestimmung des Tangentenvektors . . . . .                                    | 69 |
| 4.14 | Darstellung des Flammennormalenvektors . . . . .                                                    | 70 |
| 4.15 | Generische Flammenfront zur Verifikation der Vektorberechnung . . . . .                             | 71 |
| 4.16 | Temperatur über der radialen Position . . . . .                                                     | 72 |
| 4.17 | Gradient der Temperatur über der Temperatur . . . . .                                               | 74 |

|      |                                                                                                                   |     |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.18 | Temperaturdifferenz durch Winkelfehler . . . . .                                                                  | 75  |
| 4.19 | Aufbau zur Bestimmung der Wandtemperatur mittels Thermographischem<br>Phosphor . . . . .                          | 76  |
| 4.20 | Lochmaske zur Bestimmung der räumlichen Auflösung und der Tiefenschärfe                                           | 76  |
| 4.21 | Beschichtung des Keramikrohres mit Phosphor . . . . .                                                             | 77  |
| 4.22 | Maskierung des Aufnahmebereichs . . . . .                                                                         | 78  |
| 4.23 | Markierung der relevanten Bereiche auf dem Keramikrohr . . . . .                                                  | 79  |
| 4.24 | Raman/Rayleigh- und CPRI-Aufbau am CRF . . . . .                                                                  | 81  |
| 4.25 | Kalibration anhand der Vertikalflamme . . . . .                                                                   | 86  |
| 4.26 | Temperaturgradient über der Reaktionsfortschrittsvariable für verschiede-<br>nen Äquivalenzverhältnisse . . . . . | 88  |
| 4.27 | Axiale Variation der Flammhalterposition . . . . .                                                                | 89  |
| 5.1  | Vergleich von TSF_A zwischen Sandia und Darmstadt . . . . .                                                       | 92  |
| 5.2  | Radiale Position des <i>flame brush</i> bzw. der Mischungsschicht . . . . .                                       | 96  |
| 5.3  | Temperatur- und Speziesprofile über dem Radius . . . . .                                                          | 98  |
| 5.4  | Vergleich von Spezieskonzentrationen über der Temperatur . . . . .                                                | 100 |
| 5.5  | Vergleich von Spezieskonzentrationen über der Temperatur . . . . .                                                | 101 |
| 5.6  | Axiale Wandtemperaturverteilung . . . . .                                                                         | 103 |
| 5.7  | Berechnung der Stratifizierung . . . . .                                                                          | 106 |
| 5.8  | CH <sub>4</sub> -Trajektorien für verschiedene Äquivalenzverhältnisse . . . . .                                   | 107 |
| 5.9  | Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Stratifizierung . . . . .                                                 | 108 |
| 5.10 | Temperatur über Flammenkoordinate . . . . .                                                                       | 110 |
| 5.11 | 3D Temperaturgradient . . . . .                                                                                   | 111 |
| 5.12 | Äquivalenzverhältnis im Zustandsraum . . . . .                                                                    | 114 |
| 5.13 | CO-/H <sub>2</sub> -Massenbruch im Zustandsraum . . . . .                                                         | 115 |
| 5.14 | Flammen TSF_A, TSF_C und TSF_G im Borghi-Peters-Diagramm . . .                                                    | 118 |
| 5.15 | Radialprofile TSF_A, TSF_C und TSF_G bei $z = 5$ mm und $z = 15$ mm .                                             | 119 |
| 5.16 | Radialprofile TSF_A, TSF_C und TSF_G bei $z = 35$ mm und $z = 75$ mm                                              | 121 |
| 5.17 | Streudiagramm der Temperatur über $\Phi$ . . . . .                                                                | 124 |
| 5.18 | Radialprofile von Flamme A und Flamme D bei $z = 5$ mm und $z = 15$ mm                                            | 128 |
| 5.19 | Radialprofile von Flamme A und Flamme D bei $z = 35$ mm und $z = 75$ mm                                           | 129 |
| 5.20 | Radialprofile von Flamme A und Flamme D bei $z = 100$ mm . . . . .                                                | 130 |
| 5.21 | Streudiagramm der Skalare im Zustandsraum . . . . .                                                               | 133 |
| 5.22 | Vergleich dreier radialer Positionen im Zustandsraum . . . . .                                                    | 134 |
| 5.23 | Streudiagramm der Skalare im Zustandsraum . . . . .                                                               | 136 |
| 5.24 | Radiale Position des <i>flame brush</i> bzw. der Mischungsschicht . . . . .                                       | 137 |
| A.1  | Streudiagramm Flamme D für $z = 15$ mm . . . . .                                                                  | 143 |
| A.2  | Streudiagramm Flamme D für $z = 35$ mm . . . . .                                                                  | 144 |
| A.3  | Streudiagramm Flamme D für $z = 75$ mm . . . . .                                                                  | 145 |
| A.4  | Streudiagramm Flamme D für $z = 100$ mm . . . . .                                                                 | 146 |



# Nomenklatur

Variablen, deren Einheit nicht eindeutig festgelegt sind, tragen die Einheit „a. u.“. Eine doppelte Belegung der Variablen konnte nicht immer vermieden werden, allerdings ergibt sich aus dem Kontext eine eindeutige Zuordnung. Für die Indizes i, j, und k gilt die Einsteinsche Summenkonvention.

| Große lateinische Buchstaben |                                                                       | Einheit                                                                                    |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\bar{R}$                    | Mittlere Gaskonstante                                                 | $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| $\dot{Q}$                    | Wärmestrom                                                            | $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$                                           |
| I                            | Laserintensität                                                       | $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$                                           |
| J                            | Rotationsquantenzahl                                                  |                                                                                            |
| A                            | Präexponentieller, temperaturabhängiger Faktor des Arrhenius-Ansatzes |                                                                                            |
| D                            | Positiv definierter symmetrischer Tensor                              |                                                                                            |
| E                            | Strahlungsflussdichte (Irradianz)                                     | $\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$                                                            |
| $E_A$                        | Aktivierungsenergie                                                   | $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}$                     |
| $E_m$                        | Energieniveau 1                                                       | $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$                                           |
| $E_n$                        | Energieniveau 2                                                       | $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$                                           |
| G                            | Grauwerte                                                             |                                                                                            |
| G                            | Umwandlungsrate eintreffender Photonen zu Signalcounts (Gain)         |                                                                                            |
| $I_0$                        | Anfangsintensität                                                     | a. u.                                                                                      |
| $K_\sigma$                   | Gauß'scher Kern                                                       |                                                                                            |
| L                            | Charakteristische Länge                                               | m                                                                                          |
| L                            | Strahlungsdichte (Radianz)                                            | $\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$                                       |
| $M_s$                        | Molare Masse                                                          | $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$                                                          |
| N                            | Anzahl der Zeitschritte                                               |                                                                                            |
| N                            | Teilchenzahldichte                                                    | $\text{m}^{-3}$                                                                            |
| $N_A$                        | Avogadro-Konstante                                                    | $\text{mol}^{-1}$                                                                          |
| $N_L$                        | Loschmidt-Konstante                                                   | $\text{m}^{-3}$                                                                            |
| $N_P$                        | Anzahl der gesammelten Photonen                                       |                                                                                            |
| $N_j$                        | Konzentration Spezies j                                               | a. u.                                                                                      |
| P                            | Parität                                                               |                                                                                            |
| P                            | Produktionsterm                                                       |                                                                                            |
| $P_{ij}$                     | Symmetrischer Schubspannungstensor                                    | a. u.                                                                                      |

|                   |                                            |                                                                                            |
|-------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| $R$               | Korrelationsfunktion                       |                                                                                            |
| $R$               | universelle Gaskonstante                   | $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| $RN$              | Dunkelrauschen                             |                                                                                            |
| $S$               | Gemessene Signalintensität                 | a. u.                                                                                      |
| $S$               | Gesamtspinquantenzahl                      |                                                                                            |
| $S_i$             | Raman-Signalvektor                         |                                                                                            |
| $T$               | Räumlich variierender Schwellwert          |                                                                                            |
| $T$               | Temperatur                                 | K                                                                                          |
| $T$               | Zeitschrittweite                           |                                                                                            |
| $T_b$             | Temperatur im Verbrannten                  | K                                                                                          |
| $T_U$             | Umgebungstemperatur                        | K                                                                                          |
| $T_u$             | Temperatur im Unverbrannten                | K                                                                                          |
| $T_{\text{eq}}$   | Gleichgewichtstemperatur (equilibrium)     | K                                                                                          |
| $U$               | Charakteristische Strömungsgeschwindigkeit | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$                                                             |
| $U_{\text{Bulk}}$ | Mittlere Strömungsgeschwindigkeit          | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$                                                             |
| $V$               | Kontrollvolumen                            | $\text{m}^3$                                                                               |

| Kleine lateinische Buchstaben | Einheit                                                                                                                 |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\bar{u}_i$                   | Mittlere Geschwindigkeit $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$                                                                 |
| $\Delta h$                    | Frei werdende Energie $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$                                                  |
| $\dot{q}$                     | Wärmestromdichte $\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$                                                                        |
| $\hbar$                       | Reduziertes Planck'sches Wirkungsquantum ( $1,054571 \cdot 10^{-34}$ ) $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ |
| $a_{R1}$                      | Ellipsenparameter Ring 1 mm                                                                                             |
| $b_P$                         | Ellipsenparameter Pilot mm                                                                                              |
| $b_{R1}$                      | Ellipsenparameter Ring 1 mm                                                                                             |
| $f_{\#}$                      | f-Zahl                                                                                                                  |
| $n$                           | Hauptquantenzahl                                                                                                        |
| $s_l$                         | Spinquantenzahl                                                                                                         |
| $\nabla c$                    | Flächendichtefunktion $\text{m}^{-1}$                                                                                   |
| $\overline{s_{ij}s_{ij}}$     | Gemittelte fluktuierende Streckungsrate $\text{s}^{-1}$                                                                 |
| $a_P$                         | Ellipsenparameter Pilot mm                                                                                              |
| $c$                           | Reaktionsfortschrittsvariable a. u.                                                                                     |
| $c_0$                         | Eingabeparameter für Fit-Fenstereinstellung                                                                             |
| $c_1$                         | Eingabeparameter für Fit-Fenstereinstellung                                                                             |
| $c_2$                         | Eingabeparameter für Fit-Fenstereinstellung                                                                             |
| $c_v$                         | Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen $\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$                  |
| $c_{ij}$                      | Koeffizientenmatrix der Kennlinien und deren <i>crosstalk</i>                                                           |
| $d$                           | Abstand m                                                                                                               |
| $d$                           | Diffusivität $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$                                                                           |

|         |                                                                               |                                                      |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| $d$     | Partikelgröße                                                                 | m                                                    |
| $e$     | Innere Energie                                                                | $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$     |
| $g$     | Gewichtskraft                                                                 | $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$                       |
| $g$     | Grundzustand                                                                  |                                                      |
| $h$     | Planck'sches Wirkungsquantum ( $6,62606957 \cdot 10^{-34}$ )                  | $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$     |
| $j$     | Diffusiver Fluss                                                              | $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| $j_s$   | Diffusiver Stofftransport                                                     | $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$ |
| $k$     | Geschwindigkeitskonstante                                                     | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$                       |
| $k_i$   | Verschiedene Kräfte                                                           | a. u.                                                |
| $l$     | Nebenquantenzahl                                                              |                                                      |
| $l_0$   | Integrales Längenmaß                                                          | m                                                    |
| $l_f$   | Dicke der Flammenfront                                                        | m                                                    |
| $l_K$   | Kolmogorov-Längenmaß                                                          | m                                                    |
| $m_1$   | Magnetquantenzahl                                                             |                                                      |
| $n_i$   | Brechungsindex des Mediums i                                                  |                                                      |
| $p$     | Druck                                                                         | $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$  |
| $q$     | Kinetische Energie                                                            | $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$     |
| $q_i$   | Wärmeleitung                                                                  | $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$     |
| $r$     | Radiale Position                                                              | m                                                    |
| $r$     | Radius                                                                        | m                                                    |
| $r$     | Reaktionsgeschwindigkeit                                                      | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$                       |
| $r^*$   | Relative radiale Position                                                     | m                                                    |
| $r_c^*$ | Relative radiale Position konditioniert auf die Reaktionsfortschrittsvariable | m                                                    |
| $s_L$   | Laminare Flammengeschwindigkeit                                               | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$                       |
| $s_U$   | Anströmgeschwindigkeit                                                        | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$                       |
| $t$     | Diffusionszeit                                                                | s                                                    |
| $t$     | Zeit                                                                          | s                                                    |
| $t_f$   | Flammenzeit                                                                   | s                                                    |
| $t_K$   | Kolmogorov-Zeitmaß                                                            | s                                                    |
| $u_i$   | Geschwindigkeit                                                               | $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$                     |
| $u_j$   | Geschwindigkeit                                                               | $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$                     |
| $v$     | Vibrationsenergieniveau                                                       |                                                      |
| $w$     | Mittlere Molmasse                                                             | $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$                    |
| $w_s$   | Molare Produktionsrate                                                        | $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$                     |
| $z$     | Axiale Position                                                               | m                                                    |

## Große griechische Buchstaben

## Einheit

|        |                     |
|--------|---------------------|
| $\Phi$ | Datensatz           |
| $\Phi$ | Skalierungsfunktion |

|          |                      |       |
|----------|----------------------|-------|
| $\Phi$   | Äquivalenzverhältnis |       |
| $\Pi$    | Gesamtdrehimpuls     | a. u. |
| $\Psi$   | Mutter-Wavelet       |       |
| $\Psi$   | Wellenfunktion       | a. u. |
| $\Sigma$ | Gesamtdrehimpuls     |       |

| Kleine griechische Buchstaben |                                                 | Einheit                                                              |
|-------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$                      | Polarisierbarkeit                               | $\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$                        |
| $\alpha$                      | Vorfaktor                                       |                                                                      |
| $\alpha$                      | Winkel                                          | °                                                                    |
| $\alpha_{0v}$                 | Mittlere Polarisierbarkeit                      | $\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$                        |
| $\alpha_{1v}$                 | Maximalamplitude der Polarisierbarkeit          | $\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$                        |
| $\chi$                        | Dissipationsrate                                | $\text{s}^{-1}$                                                      |
| $\chi_c$                      | Skalare Dissipationsrate                        | $\text{s}^{-1}$                                                      |
| $\epsilon$                    | Turbulente Dissipationsrate                     | $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$                                     |
| $\lambda$                     | Kontrastparameter                               |                                                                      |
| $\lambda$                     | Luftzahl                                        |                                                                      |
| $\lambda$                     | Wellenlänge                                     | m                                                                    |
| $\lambda$                     | Wärmeleitkoeffizient                            | $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ |
| $\lambda_c$                   | Grenzwellenlänge eines Filters (engl.: cut-off) | m                                                                    |
| $\nabla\nu$                   | Ramanverschiebung                               | $\text{m}^{-1}$                                                      |
| $\nu$                         | Faktor                                          |                                                                      |
| $\nu$                         | Kinematische Viskosität                         | $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$                                     |
| $\nu$                         | Vibrationsquantenzahl                           |                                                                      |
| $\nu_v$                       | Schwingungsfrequenz                             | $\text{s}^{-1}$                                                      |
| $\omega$                      | Frequenz                                        | $\text{s}^{-1}$                                                      |
| $\rho_s$                      | Partialdichte der Spezies s                     | $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$                                      |
| $\sigma$                      | Standardabweichung                              |                                                                      |
| $\sigma$                      | Wirkungsquerschnitt                             | $\text{m}^2$                                                         |
| $\sigma_{\text{Ph}}$          | Photonenrauschen                                |                                                                      |
| $\tau$                        | Abklingzeit                                     | s                                                                    |
| $\tau_0$                      | Integrales Zeitmaß                              | s                                                                    |
| $\theta$                      | Winkel des Flammennormalenvektors               | °                                                                    |
| $\varphi$                     | Zylinderkoordinate                              |                                                                      |

### Tiefgestellte Indizes

---

|           |                             |
|-----------|-----------------------------|
| $\cdot_0$ | Ursprungszustand (zeitlich) |
| $\cdot_1$ | Endzustand (zeitlich)       |



---

|         |                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------|
| ·a      | Absorbierend                                            |
| ·e      | Emittierend                                             |
| ·i      | Anregungsvorgang                                        |
| ·i      | Spezies i                                               |
| ·s      | Relaxationsvorgang                                      |
| ·s      | Spezies s                                               |
| ·cb     | Erreichtes Energieniveau                                |
| ·eq     | Indexwert für Gleichgewichtszustand (engl. equilibrium) |
| ·f      | Indexwert für Vorwärtsreaktion                          |
| ·max.   | Maximum                                                 |
| ·min.   | Minimum                                                 |
| ·Ray    | Rayleigh                                                |
| ·Ry     | Rayleigh                                                |
| ·R      | Raman                                                   |
| ·r      | Indexwert für Rückwärtsreaktion                         |
| ·stöch. | Stöchiometrische Mischung                               |
| ·i,j,k  | Indexwert (ganzzahlig)                                  |

### Hochgestellte Indizes

---

|                |                       |
|----------------|-----------------------|
| ·'             | Angeregter Zustand    |
| ·'             | Schwankungsgröße      |
| ·+             | Parität               |
| · <sup>a</sup> | Stoffabhängige Potenz |
| · <sup>b</sup> | Stoffabhängige Potenz |
| <sup>1</sup> · | Spinmultiplizität     |

### Operatoren und Symbole

---

|                             |                                                                                       |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $\frac{D\Phi}{Dt}$          | Materielle Ableitung der Größe $\Phi$                                                 |
| $\leftarrow\leftarrow$      | Zwei-Photonen-Übergang                                                                |
| $\mathcal{O}$               | In der Größenordnung                                                                  |
| $\text{O}_2 \ll \text{N}_2$ | exemplarischer <i>crosstalk</i> der Spezies $\text{N}_2$ auf die Spezies $\text{O}_2$ |
| $\nabla\Phi$                | Änderung der Größe $\Phi$                                                             |
| $\nabla$                    | Nabla Operator                                                                        |
| $\partial\Phi$              | Partielle Ableitung der Größe $\Phi$                                                  |
| $div$                       | Divergenz                                                                             |

**Dimensionslose Kennzahlen**

---

|             |                          |
|-------------|--------------------------|
| $Da$        | Damköhler-Zahl           |
| $Ka$        | Karlovitz-Zahl           |
| $Ka_\delta$ | Karlovitz-Zahl           |
| $Re$        | Reynolds-Zahl            |
| $Re_T$      | Turbulente Reynolds-Zahl |
| $Re_{krit}$ | Kritische Reynolds-Zahl  |

# Abkürzungsverzeichnis

|                                    |                                                                                                   |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | Aluminiumoxid                                                                                     |
| <b>a. u.</b>                       | <i>arbitrary unit</i> , arbiträre Einheit                                                         |
| <b>bgr</b>                         | <i>background</i> , Hintergrund                                                                   |
| <b>CCD</b>                         | <i>Charge Coupled Device</i> , ladungsträgergekoppelte Schaltung                                  |
| <b>CCS</b>                         | <i>Carbon Capture and Storage</i> , CO <sub>2</sub> -Sequestrierung                               |
| <b>CH<sub>4</sub></b>              | Methan                                                                                            |
| <b>CO</b>                          | Kohlenstoffmonoxid                                                                                |
| <b>CO<sub>2</sub></b>              | Kohlenstoffdioxid                                                                                 |
| <b>CPRI</b>                        | <i>Crossed Planar Rayleigh Imaging</i> , gekreuzte planare Rayleigh-Bildaufnahme                  |
| <b>CRF</b>                         | <i>Combustion Research Facility</i>                                                               |
| <b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></b>  | Ethen                                                                                             |
| <b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b>  | Ethan                                                                                             |
| <b>CH<sub>2</sub>O</b>             | Formaldehyd                                                                                       |
| <b>DNS</b>                         | Direkte Numerische Simulation                                                                     |
| <b>DME</b>                         | Dimethylether                                                                                     |
| <b>EMB</b>                         | <i>Electron multiplied backside illuminated</i>                                                   |
| <b>EU</b>                          | Europäische Union                                                                                 |
| <b>FWHM</b>                        | <i>full width at half maximum</i> , Halbwertsbreite                                               |
| <b>GRI</b>                         | <i>Gas Research Institute</i>                                                                     |
| <b>H<sub>2</sub></b>               | Wasserstoff                                                                                       |
| <b>H<sub>2</sub>O</b>              | Wasser                                                                                            |
| <b>hda</b>                         | Hochschule Darmstadt                                                                              |
| <b>HSS</b>                         | <i>High Speed Star</i>                                                                            |
| <b>ISC</b>                         | <i>Inter System Crossing</i> , Übergang zwischen Anregungsniveaus unterschiedlicher Multiplizität |

|                       |                                                                                                 |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>IEA</b>            | <i>International Energy Agency</i> , Internationale Energie-Agentur                             |
| <b>IPCC</b>           | <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>                                                |
| <b>KIT</b>            | <i>Karlsruhe Institute of Technology</i>                                                        |
| <b>LDV</b>            | <i>Laser Doppler Velocimetry</i>                                                                |
| <b>LES</b>            | <i>Large Eddy Simulation</i>                                                                    |
| <b>LIF</b>            | Laserinduzierte Fluoreszenz                                                                     |
| <b>MCS</b>            | Multikomponenten-Transport unter Berücksichtigung des Soret-Effekts                             |
| <b>MFC</b>            | <i>Mass flow controller</i> , Massendurchflussregler                                            |
| <b>MI</b>             | Matrix-Inversion                                                                                |
| <b>N<sub>2</sub></b>  | Stickstoff                                                                                      |
| <b>Nd:YAG</b>         | Neodym-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat (Laser)                                               |
| <b>NLDF</b>           | nicht linearer Diffusionsfilter                                                                 |
| <b>NO<sub>x</sub></b> | Stickoxide                                                                                      |
| <b>O<sub>2</sub></b>  | Sauerstoff                                                                                      |
| <b>PAK</b>            | Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe                                                    |
| <b>pdf</b>            | <i>probability density function</i> , Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion                         |
| <b>PIV</b>            | <i>Particle Image Velocimetry</i>                                                               |
| <b>PLIF</b>           | Planare Laserinduzierte Fluoreszenz                                                             |
| <b>RAMSES</b>         | <i>Raman Scattering Experiment Simulator</i>                                                    |
| <b>RANS</b>           | <i>Reynolds Averaged Navier Stokes Equation</i>                                                 |
| <b>RSM</b>            | Reaktive Strömungen und Messtechnik                                                             |
| <b>sCMOS</b>          | <i>scientific Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>                                       |
| <b>SO<sub>2</sub></b> | Schwefeldioxid                                                                                  |
| <b>TNF</b>            | <i>International Workshop on Measurements and Computations of Turbulent Non-Premixed Flames</i> |
| <b>TSF</b>            | <i>Turbulent Stratified Flame</i> , turbulente stratifizierte Flamme                            |
| <b>TU</b>             | Technische Universität                                                                          |
| <b>USD</b>            | Währung der Vereinigten Staaten von Amerika (US Dollar)                                         |

# Kapitel 1

## Einleitung

In den folgenden Abschnitten wird zunächst die wissenschaftliche Relevanz der vorgelegten Dissertation dargestellt, bevor dann ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung gegeben wird. Abschließend wird die Zielsetzung der Arbeit dargelegt und ein Abriss über die verschiedenen Aspekte der vorgestellten Arbeit präsentiert.

### 1.1 Motivation

Seit etwa einer halben Million Jahre ist die Verbrennung die wichtigste Energiequelle [163]. Bereits vor über 100 000 Jahren wurde das Feuer aktiv verwendet [33]. Eine der wichtigsten Fragen, deren Beantwortung sich Forscher seither widmen, ist die nach der optimalen Auslegung des Verbrennungsprozesses bei möglichst geringem Aufwand zur Bereitstellung des Brennstoffs, ohne den Menschen zu gefährden [40]. Im Laufe der Jahre haben sich spektroskopische Methoden zum Verständnis der Verbrennung als die erfolgreichsten zur Charakterisierung von Temperatur und Spezieskonzentrationen herausgestellt [50, 103]. Die Methodik zur Charakterisierung erfährt eine ständige Weiterentwicklung sowohl in Bezug auf Raum- und Zeitauflösung als auch auf Nachweisgrenzen sowie Akkuratheit und Präzision [39, 149]. Bei der Verbrennung wird eine chemisch exotherme Reaktion in Gang gebracht. Zunächst lag der Fokus auf der Verwendung von Diffusionsflammen, bevor im Laufe der Jahre die vorgemischte Verbrennung an Bedeutung gewann. Die Verbrennung an sich hat enorme Auswirkungen auf bzw. für den Menschen und den Planeten Erde.

Unter der Voraussetzung, dass die aktuell gesteckten Emissionsziele erreicht werden, liegt die Produktion von CO<sub>2</sub> noch immer 13,7 Milliarden Tonnen, in anderen Worten 60 %, über der Höchstmenge, um die maximale Erderwärmung auf 2° C bis 2035 zu begrenzen [68]. Im Allgemeinen gibt es zwei Möglichkeiten, die CO<sub>2</sub>-Produktion zu verringern. Zum einen CO<sub>2</sub>-Reduzierung auf der Erzeugerseite: Dabei müsste die Energiewandlung von fossilen Brennstoffen hin zu erneuerbaren verändert werden, inklusive dem sogenannten *Carbon Capture and Storage* (CCS)-Verfahren, bei dem CO<sub>2</sub> abgespalten und unterirdisch gelagert wird. Zum anderen CO<sub>2</sub>-Reduzierung auf der Verbraucherseite: Hierzu muss ein Umdenken in der Gesellschaft stattfinden sowie die Effizienz der Verbraucher verbessert werden. Aktuell werden jedoch noch etwa 80 % der weltweit verbrauchten Energie aus fossilen Brennstoffen gewonnen. Diese 80 % lassen sich nahezu zu gleichen Teilen in Erdöl,

Kohle und Erdgas trennen. Es ist jedoch erwähnenswert, dass 2014 erstmals seit 40 Jahren die Produktion des klimaschädlichen Treibhausgases  $\text{CO}_2$  leicht rückläufig war, wenn Weltwirtschaftskrisen herausgerechnet werden [68].

Betrachtet man den Fakt, dass noch immer etwa 18 % der Weltbevölkerung keinen oder nur schlechten Zugang zu Strom haben, so ist zu erwarten, dass der Verbrauch in den nächsten Jahren weiter steigen wird. Die *International Energy Agency* (IEA) [68] hat für den Zeitraum von 2005 bis 2030 einen um 50 % steigenden Weltenergiebedarf angesetzt. Als positives Signal kann der Zeitraum zwischen 2001 und 2011 gesehen werden, da in diesem der Energieverbrauch, basierend auf Investitionen in die Effizienzsteigerung, um etwa 5 % gesenkt werden konnte. 5 % entsprechen einer größeren Menge als der Verbrauch der Bundesrepublik Deutschland und der Vereinigten Staaten von Amerika zusammen. Laut IEA [68] wurden alleine 2013 knapp 80 Milliarden USD verschwendet, weil nicht auf modernste Technologien zurückgegriffen wurde. Die jährlichen Einsparungen in Bezug auf Treibstoff des Transportsektors innerhalb der EU belaufen sich auf etwa 190 Milliarden USD ab dem Jahr 2020, wenn auf modernste und effiziente Technologien gesetzt wird.

Die Häufigkeit an Wetterextremen hat bereits merklich zugenommen, was unter anderem auch auf die unumkehrbare Temperaturerhöhung der letzten Jahre zurückzuführen ist (laut *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) ca.  $1^\circ$  Celsius von 1850 bis 2005) [69]. Sowohl die Verfügbarkeit von fossilen Ressourcen als auch der voranschreitende Klimawandel an sich sind stark vom Bevölkerungswachstum der nächsten Jahrzehnte, von den insbesondere in den Schwellenländern verwendeten Technologien als auch vom generellen Einsatz modernster Technologien abhängig. Daraus ergibt sich die Wichtigkeit über das Verständnis von Verbrennungsprozessen. Dies gilt sowohl für fossile Brennstoffe als auch bei Brennstoffen aus erneuerbaren Quellen, wie z. B. Wasserstoff, Biogas, Biokraftstoff etc. Hierbei spielen neben den entstehenden Kosten auch die Zuverlässigkeit während der Verbrennung eine signifikante Rolle.

Bei Verbrennungsprozessen sind die Temperatur, die Konzentrationen und die Geschwindigkeiten die zentralen zu messenden Größen, die nötig sind, um den Vorgang zu charakterisieren. Die Temperatur wiederum ist über die Reaktionsgeschwindigkeit eng an die Chemie der Verbrennung gekoppelt. Sowohl durch die Chemie als auch über die Temperatur lässt sich eine Aussage zur Wärmefreisetzung und vor allem auch zur Schadstoffentstehung treffen. Klassische Luftschadstoffe sind z. B.  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , Kohlenwasserstoffe, Ruß, Feinstaub und Lärm [155]. Die Temperatur hat aufgrund ihrer Verknüpfung mit der Dichte und der Viskosität einen direkten Einfluss auf die Strömung des Verbrennungsvorgangs. Die Verbrennungsforschung hat deshalb die Aufgabe, die nötige technische Neu- bzw. Weiterentwicklung voranzutreiben. Von der Grundlagenforschung bis hin zur praktischen Anwendung, von Experimenten bis zu numerischen Simulationen reicht die Spannweite der einzelnen Forschungsgebiete. Vor allem das Zusammenspiel zwischen numerischen Berechnungsverfahren, der Flammentheorie und den Experimenten gewinnt mehr und mehr an Bedeutung, da auf diese Weise eine Effizienzsteigerung der Entwicklungsarbeit bei zum Teil deutlich kürzerer Entwicklungszeit erreicht werden kann.

Getrieben durch den technischen Fortschritt haben die numerischen Berechnungsverfahren in den letzten Jahren massiv an Bedeutung bei der Auslegung und Optimierung von Ver-

brennungssystemen gewonnen. Direkte Numerische Simulationen sind jedoch sehr rechenintensiv, lassen sich deshalb nur auf kleinsten Rechengebieten durchführen. Außerdem sind die Randbedingungen teilweise nicht bekannt. Aus diesem Grund werden numerische Verfahren verwendet, die nicht alle Skalen, weder die Strömung noch die detaillierte Chemie, auflösen. Um diese Rechnungen validieren zu können, sind experimentelle Untersuchungen an generischen Brennern mit bekannten Randbedingungen nötig. Für die Durchführung dieser Experimente bieten sich laseroptische Verfahren an, da diese nicht invasiv sind, die Strömung und den Verbrennungsprozess also nicht beeinflussen, und außerdem eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung zulassen.

Als Benchmark hat sich für den Austausch zwischen Ergebnissen aus numerischen Berechnungen und den entsprechenden Experimenten der sogenannte Workshop *International Workshop on Measurements and Computations of Turbulent Non-Premixed Flames* (TNF) entwickelt [150]. Im Rahmen dieses Workshops werden gut dokumentierte, einfach gehaltene und auf Labordimensionen skalierte Verbrennungsvorgänge vorgestellt, die als Basis für die numerische Simulation dienen. Ein Brenner, der im Rahmen dieses Workshops untersucht wird, ist der in dieser Arbeit vorgestellte Stratifizierte Brenner. Die Datenbanken, die zur Verfügung gestellt werden, steigen in Bezug auf ihre Komplexität. So ist nicht mehr nur das Strömungsfeld eines Brenners von Interesse, sondern auch die Informationen über die ablaufenden chemischen Reaktionen spielen eine immer signifikantere Rolle. Die Forschung richtet sich deshalb mittlerweile dahingehend aus, dass immer höhere Strömungsgeschwindigkeiten bzw. Mischungsraten untersucht werden, die vor allem durch in die Strömung eingebrachte Staukörper oder aber, wie in dieser Arbeit verwendet, eine pilotierte Flamme stabilisiert werden. Eine Übersicht über die Verknüpfung zwischen numerischen Berechnungen und dem experimentellen Gegenpart wurde von Barlow [11] zusammengestellt. Die aus dieser Arbeit mittels der angewendeten Raman/Rayleigh-Spektroskopie erhaltenen Ergebnisse dienen als Basis für das Verständnis bzgl. der Turbulenz-Chemie-Interaktion in turbulenten Flammen.

Bei dem in dieser Arbeit beschriebenen Fall handelt es sich neben dem hohen Maß an Turbulenz außerdem um eine stratifizierte Flamme. Das Thema Stratifizierung wird in Abschnitt 2.3 näher erläutert. Stratifizierte Verbrennung spielt eine signifikante Rolle für praktische Anwendungen, da sie sowohl in Verbrennungskraftmaschinen, in Industrieöfen als auch in Öltröpfchenverbrennung Anwendung findet. Bezug nehmend auf die Effizienzsteigerung bei gleichzeitiger Reduzierung der ausgestoßenen Schadstoffe spielt diese Form der Verbrennung eine wichtige Rolle. Da durch die stratifizierte Verbrennung jedoch eine räumlich inhomogene Mischung aus Brennstoff und Oxidator entsteht und diese Phänomene noch nicht detailliert experimentell analysiert wurden [120], stellt dies einen Großteil der hier präsentierten Arbeit dar. Eine besondere Fragestellung ist hierbei das Verhalten der Flammen bei Fortschreiten der Flamme durch unterschiedliche Äquivalenzverhältnisse, bei denen der Gradient nicht mehr vernachlässigbar ist [120].

## 1.2 Stand der Forschung

Ein fundamentaler Parameter, der zur Charakterisierung vorgemischter Verbrennung herangezogen wird, ist die laminare Flammengeschwindigkeit  $s_L$ . Um diesen Parameter quantifizieren zu können, wurden sowohl theoretische [165] als auch experimentelle [156] und numerische [56] Untersuchungen in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen durchgeführt. Ein ausführlicher Überblick über verschiedenste Methoden und Herangehensweisen ist in Glassmann [53] zu finden. Für homogen zusammengesetzte Gemische ist der Mechanismus, der zur Bestimmung der laminaren Flammengeschwindigkeit  $s_L$  Anwendung findet, wenig bekannt [102]. Für die deutlich komplexeren Mischungen bei stratifizierten Bedingungen wird deshalb eine deutliche Veränderung dieses Mechanismus erwartet. Aus diesem Grund werden vermehrt laminare Flammen in stratifizierten Umgebungen sowohl experimentell [70, 136] als auch numerisch [164] untersucht. Diese Untersuchungen haben einen Unterschied zu rein homogenen Gemischen erkennen lassen. Der Mechanismus, der zu diesen Unterschieden führt, ist jedoch aktuell nicht bekannt.

Es hat sich gezeigt, dass die hohen Temperaturen hinter der Flamme die magere Verbrennungsrichtung bestimmen. Die Flamme brennt daher in den meisten Fällen vom stöchiometrischen in Richtung des mageren Gemischs. Dies führt zu einer deutlich erhöhten Geschwindigkeit im stratifizierten Fall verglichen zu dem homogenen Fall. Eine ausführliche Literaturrecherche bzgl. stratifizierter Verbrennung von numerischer und experimenteller Seite wird in Abschnitt 2.3 dargelegt. Die Ausbreitung der Flamme bei brennstoffreicher Verbrennung (fetter Verbrennung) wird bestimmt durch die Produktion und den Verbrauch von Wasserstoff ( $H_2$ ) in der Flammenfront und im verbrannten Gas. Es kommt hierbei der Effekt zum Tragen, dass im Inneren der Flamme kein Sauerstoff ( $O_2$ ) zur Oxidation des Wasserstoffs vorhanden ist, weshalb sich die Flamme nach außen beschleunigt, da dort genügend Sauerstoff zur Verbrennung zur Verfügung steht. Daraus ergibt sich zudem, dass Flammen, die von stöchiometrischen Mischungen in Richtung fetter Mischungen brennen, zeitlich verzögert werden, während im umgekehrten Fall eine Beschleunigung messbar ist. Dies gilt jeweils für Mischungen in stratifizierten Umgebungen verglichen mit rein homogenen Mischungen [120].

Eine perfekt homogene Mischung ist vor allem mit Blick auf die limitierte Mischungslänge und Instabilitäten bei der Verbrennung in realen Systemen nahezu unmöglich. Aus diesem Grund bleibt immer ein gewisses Maß an Inhomogenität in Mischungen bestehen. Gezeigt wurde dies unter anderem von Candel [23], Gicquel [52] und Huang [67] in Gasturbinen mit abgehobenen Flammen. In anderen Fällen wird eine inhomogene Mischung allerdings auch bewusst herbeigeführt. Hierdurch lässt sich der Anwendungsspielraum erweitern, und eine Reduktion der Emissionen kann erreicht werden. Ein Beispiel hierfür ist die stratifizierte aufgeladene Direkteinspritzung [1, 31, 109, 166].

Bereits 1970 wurden von Liebermann [93] Untersuchungen zu stratifizierter Verbrennung durchgeführt. Hierbei ging es um die Formierung von stratifizierten Schichten aus Methan und Luft an der Decke von Minen. In den letzten Jahren hat sich ein enormer Fortschritt in der Beschreibung der Stratifizierung abgezeichnet, da eine große Datenbank aus experimentellen Untersuchungen für generische Brenner als Plattform für numerische Modelle im Rahmen des TNF [150] generiert wurde.



Die Diskussion über die Auswirkung von Stratifizierungseffekten wird mitunter sehr kontrovers geführt, was sich anhand des Beispiels des sogenannten *flame brush*s (mittlere Flammenfrontposition) aufzeigen lässt. Bonaldo und Kelman [17] berichten bereits 2009 darüber, dass sich die Dicke des *flame brush*s auch bei Stratifizierung nicht verändert, während Robin et al. [128] ein Jahr früher über eine Verringerung der Dicke um etwa 10 % berichtet haben. Im Gegensatz dazu haben Anselmos-Filho et al., Sweeney et al. und Vena et al. [6, 144, 158] experimentell eine Aufdickung des *flame brush*s bestimmt. Ähnlich kontrovers stellen sich Ergebnisse zur Verteilung der Flammenkrümmung dar, die von Vena et al. [158] mit abnehmender und von Anselmo-Filho et al. [6], Sweeney et al. [144] und Renou et al. [125] mit zunehmender Tendenz beschrieben werden. Die beiden angeführten Beispiele zeigen auf, dass noch ein erheblicher Mehraufwand zur Untersuchung dieser Flammenphänomene durchgeführt werden, die Diskussion der Ergebnisse aber nicht immer eindeutig sein muss.

Untersuchungen von Konzentrationen wurden an Methanflammen mittels der ebenfalls in dieser Arbeit verwendeten Raman/Rayleigh/CO-LIF-Messtechnik durchgeführt. Würde hier die Konzentration von Methan oder Kohlenmonoxid über dem Äquivalenzverhältnis aufgetragen, so ließe sich daran erkennen, dass für den stratifizierten Fall, im Vergleich zum rein homogenen Fall, eine überhöhte Wasserstoff- bzw. Kohlenmonoxidkonzentration vorhanden ist [102, 145]. 2013 zeigten Sweeney et al. [147], dass die Stratifizierung einer Flamme ebenfalls einen Einfluss auf die Flammenflächendichte und die skalare Dissoziationsrate haben kann. Bei mehrfacher Konditionierung der experimentellen Daten ist erkennbar, dass sich die Verteilungsfunktion der Flammenkrümmung verbreitert. Um die angesprochene mehrfache Konditionierung überhaupt durchführen zu können, ist es unerlässlich sehr hohe Datenvolumen aufzunehmen. Verlässliche Statistiken lassen sich erst ab etwa 30 000 Aufnahmen pro radialer bzw. axialer Position erstellen. Es ist somit von signifikanter Wichtigkeit, dass nicht nur globale Phänomene der Flamme, z. B. mittels Mittelwerten und Standardabweichungen, zur Auswertung herangezogen werden, sondern zusätzlich einzelne relevante Zonen der Flamme näher (hohe Aufnahmestatistik und entsprechende Konditionierung) untersucht werden.

Zu einem Problem hat sich bei turbulenten stratifizierten Flammen zudem herauskristallisiert, dass Veränderungen der Struktur (Verwinklung, Dicke, Krümmung) nur schwer zu detektieren sind, da diese häufig von den turbulenten Effekten der Flamme überlagert werden. Phänomene wie Wärmefluss und die Diffusion von Wasserstoff und Kohlenmonoxid, die in numerischen Untersuchungen bereits nachgewiesen wurden, vgl. z. B. den sogenannten *back support*, konnten in Experimenten bis dato kaum gezeigt werden. Ein Grund für das Fehlen der experimentellen Ergebnisse ist hierbei der limitierte Zugang zu Diagnostiken mit entsprechend hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung sowie der erforderlichen Akkuratheit und Präzision. Eine Ausnahme stellt hier der von Sweeney et al. [145–147] vorgestellte Stratifizierte Cambridge Drallbrenner dar.

## 1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, ein tieferes Verständnis bezüglich des Einflusses der Stratifizierung und Schichtung von Flammen zu kreieren. Wie bereits beschrieben, handelt es sich hierbei um die Propagation der Flammenfront durch Bereiche unterschiedlicher Äquivalenzverhältnisse, zwischen denen der Gradient nicht mehr vernachlässigbar ist. Des Weiteren ist eine vollständige Datenbank des Stratifizierten Brenners anzustreben, um numerische Berechnungen im Rahmen des TNF [150] und darüber hinaus gewährleisten zu können. Damit alle Randbedingungen des Brenners bekannt sind, muss zusätzlich der Wärmeverlust des Keramikrohrs, welcher von Seffrin [133] abgeschätzt wurde, gemessen werden, da dieser nicht vernachlässigbar ist [87]. Zusätzliche Informationen zu den Randbedingungen für den Stratifizierten Brenner sind vonnöten, da weitere numerische Berechnungen mit adiabaten bzw. nicht-adiabaten Randbedingungen im Rahmen des TNF [150] durchgeführt wurden, Ketelheun et al. [81] und Trisjono et al. [151], die es zu validieren gilt.

In Kapitel 2 werden zunächst einige grundlegende Zusammenhänge in der Fluidmechanik erläutert. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels folgt eine Einteilung in die verschiedenen Flammentypen, bevor sich daran die Bewandnis von Stratifizierung bzw. Schichtung anschließt. Das darauf folgende Kapitel 3 gibt einen Überblick über die zur Kalibration benötigten Strömungen und Brenner. Außerdem wird der in den präsentierten Ergebnissen verwendete Brenner beschrieben. Im weiteren Verlauf des Kapitels werden die zum Verständnis der verschiedenen applizierten Messtechniken nötigen physikalischen Hintergrundinformationen erläutert, bevor im letzten Teil des Kapitels die unterschiedlichen Prüfstände vorgestellt werden. Im Rahmen dessen werden einzelne Ergebnisse bereits vorweggegriffen, da sie zur Veranschaulichung der Prüfstände und den jeweiligen angewendeten Messtechniken dienen. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Messtechniken sowie der verschiedenen Brennerkonfigurationen vorgestellt. Hierbei orientiert sich die Reihenfolge am jeweiligen Messobjekt und nicht an der Messtechnik. So wird zunächst eine ausführliche Erläuterung der Standardkonfiguration des *Turbulent Stratified Flame* (TSF)-Brenners vorgestellt, bevor diese mit ähnlichen Flammen verglichen wird. Das Kapitel schließt mit der Vorstellung zweier weiterer Flammenkonfigurationen, die sich ebenfalls mit dem TSF-Brenner erzeugen lassen. Abgeschlossen wird die vorliegende Arbeit mit Kapitel 6, in dem die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst werden und ein kurzer Ausblick über weitere Möglichkeiten der Anwendung der vorgestellten Messtechniken gegeben wird.

# Kapitel 2

## Theoretische Grundlagen

In den folgenden Abschnitten werden allgemeine Grundlagen beschrieben, die zum besseren Verständnis der Arbeit dienen. Im Speziellen wird in Abschnitt 2.1 auf die Grundlagen turbulenter Strömungen sowie auf allgemeine Erhaltungsgleichungen eingegangen. Als Nächstes werden in Abschnitt 2.2 die unterschiedlichen Flammentypen näher beleuchtet, wobei die Kernaussagen den Unterschied zwischen vorgemischter und nicht vorgemischter Verbrennung betreffen. Im abschließenden Abschnitt 2.3 werden die unterschiedlichen Merkmale, die sich durch stratifizierte Verbrennung ergeben, sowohl von der numerischen als auch von der experimentellen Seite, basierend auf aktuellen Forschungsergebnissen, erläutert.

### 2.1 Fluidmechanik

Werner Heisenberg: *"When I meet God, I am going to ask him two questions: Why relativity? And why turbulence? I really believe he will have an answer for the first."*

In den folgenden Unterkapiteln werden zunächst die grundlegenden Erhaltungsgleichungen beschrieben, bevor dann eine knappe Einführung in die Grundlagen turbulenter Strömungen folgt.

#### 2.1.1 Erhaltungsgleichungen

Für die Herleitung der folgenden Gleichungen bzw. zu deren Notation wird auf die entsprechenden Referenzen [41, 130, 137] verwiesen. Generell wird sich aber in diesem Kapitel an die Einstein'sche Summenkonvention für die Indizes  $i$ ,  $j$  und  $k$  gehalten. Die Erhaltungsgleichungen lassen sich grob in zwei Gruppen unterteilen [72]. Zu der ersten Gruppe zählen die Massenerhaltungsgleichung, die Impulserhaltungsgleichung, die Bilanzgleichung der Energie sowie die Spezieserhaltungsgleichung. In die zweite Gruppe lassen sich Material- und Zustandsgleichungen sortieren. Zusammen ergeben die Gruppen ein System nicht linearer partieller Differentialgleichungen zweiter Ordnung. Sie bilden das grundlegende mathematische Modell der Strömungsmechanik. Sowohl die Turbulenz als

auch die Beschreibung von Grenzschichten werden mithilfe dieses Gleichungssystems beschrieben.

### Massenerhaltung

Volumenkräfte und Quellen spielen bei der Massenerhaltung keine Rolle. Diese lässt sich daher wie folgt darstellen

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0. \quad (2.1)$$

### Spezieserhaltung

Für die Spezieserhaltung ergibt sich unter der Verwendung des Index s für alle Spezies

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial j_{s,j}}{\partial x_j} = M_s \omega_s; \quad (2.2)$$

$\rho_s$  beschreibt die Partialdichte der jeweiligen Spezies s,  $j_s$  den diffusiven Transport,  $M_s$  die molare Masse und  $\omega_s$  die molare Produktionsrate.

### Navier-Stokes-Gleichung

Die Navier-Stokes-Gleichung ist nach Claude-Louis-Navier und George Gabriel Stokes benannt. Sie beschreibt die Bewegung viskoser Fluide. Im Detail handelt es sich hierbei um Newton'sche Flüssigkeiten oder Gase. Die Navier-Stokes-Gleichung stellt eine um die innere Reibung bzw. Viskosität erweiterte Euler-Gleichung (1755) dar. Die hier beschriebene Navier-Stokes-Gleichung gilt für den inkompressiblen Fall

$$\underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial t}}_{\text{zeitliche Schwankung}} + \underbrace{u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_{\text{Konvektion}} - \underbrace{\nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}}_{\text{Diffusion}} = \underbrace{-\frac{\partial w}{\partial x_i}}_{\text{Quellterm}} + \underbrace{g_i}_{\text{Volumenkräfte}}. \quad (2.3)$$

### Energieerhaltung

Die Energieerhaltungsgleichung beschreibt den Zustand, dass sich die Gesamtenergie eines isolierten Systems nicht ändert. Energie kann aber zwischen verschiedenen Formen gewandelt werden, z. B. von Bewegungsenergie in Wärmeenergie. Die Energieerhaltung lässt sich nach folgender Gleichung berechnen [137]

$$\rho \frac{D}{Dt} \left[ \frac{u_i u_i}{2} + h \right] = \frac{\partial p}{\partial t} + \rho k_i u_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (P_{ji} u_i) - \frac{\partial q_i}{\partial x_i}. \quad (2.4)$$

Hierbei beschreibt  $P_{ji}$  den symmetrischen Schubspannungstensor;  $k_i$  wird als Variable für verschiedene Kräfte eingeführt, z. B. Gewichtskraft  $g$ . Die Variable  $h$  ist über die Beziehung  $h = e + \frac{p}{\rho}$  mit der inneren Energie  $e$  verknüpft, welche sich für ein ideales Gas über  $e = c_v T$  errechnet.  $q_i$  lässt sich über die dreidimensionale Wärmeleitungsgleichung  $q_i = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}$  darstellen.

### Zustandsgleichungen

Als Zustandsgleichung wird hier die ideale Gasgleichung angegeben. Unter der Annahme, dass für die mittlere Gaskonstante  $\bar{R} = \frac{R}{w}$  gilt, wobei  $R$  die universelle Gaskonstante und  $w$  die mittlere Molmasse sind, ergibt sich Folgendes:

$$p = \rho \bar{R} T. \quad (2.5)$$

Die Verwendung dieser Gleichung spielt eine große Rolle bei der Berechnung der Temperatur mithilfe der Rayleigh-Spektroskopie. Dies wird in Abschnitt 3.2.3 weiter ausgeführt.

### 2.1.2 Turbulenz

Die beschriebene Navier-Stokes-Gleichung hat für eine laminare Strömung eine stationäre und eindeutige Lösung. Für hohe Reynolds-Zahlen gilt dies nicht mehr. Statt diskreter Werte nimmt die Lösung jetzt die Form einer sogenannten Wahrscheinlichkeitsverteilung an. Eine laminare Strömung ist durch folgende Punkte charakterisiert:

- hohes Maß an Ordnung,
- molekulare Bewegung zwischen den Schichten durch Diffusion, Konvektion oder Leitung,
- Stabilität gegenüber äußeren Einflüssen.

Für eine turbulente Strömung hingegen treten andere Phänomene auf [123]:

- instationär,
- dreidimensional,
- wirbelbehaftet,
- dissipativ.

Der Umschlag von laminarer zu turbulenter Strömung geschieht durch äußere Störungen ab einer bestimmten kritischen Reynolds-Zahl. Für eine Rohrströmung liegt diese kritische Reynolds-Zahl  $Re_{\text{krit}}$  bei 2300 [137].

Als Maß für die Einschätzung, ob eine Strömung turbulent ist oder nicht, dient die bereits erwähnte Reynolds-Zahl. Diese ist definiert über das Verhältnis von destabilisierenden Trägheitskräften zu stabilisierenden Viskositätskräften.

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu}. \quad (2.6)$$

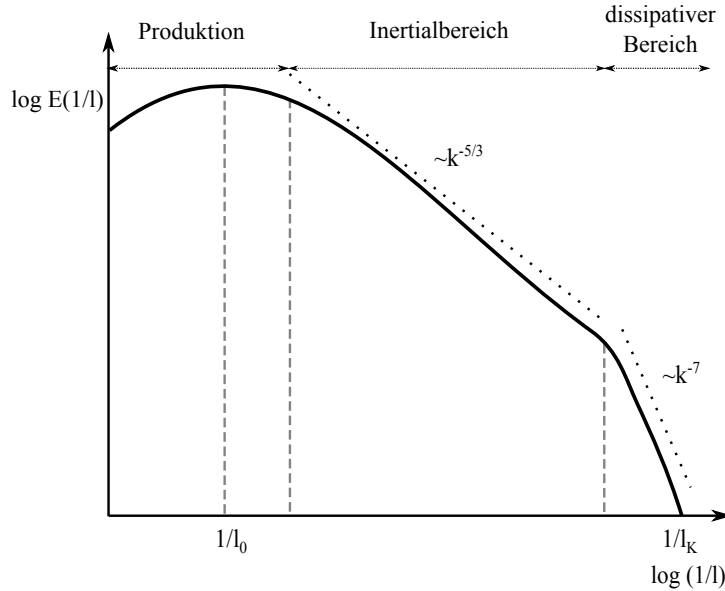
Hierbei beschreibt  $U$  eine für die Strömung charakteristische Geschwindigkeit, während  $L$  eine für die Geometrie charakteristische Länge darstellt. Die kinematische Viskosität des verwendeten Mediums wird mit  $\nu$  bezeichnet. Zwischen laminarer und turbulenter Strömung gibt es eine sehr scharfe Grenze. Diese Grenze wird als viskose Unterschicht

bezeichnet. Da die Strömung nicht stationär ist, fluktuiert diese Unterschicht, was im Allgemeinen als Intermittenz bezeichnet wird [28].

Bei turbulenten Strömungen werden sowohl der Druck als auch die Geschwindigkeit um den Mittelwert durch Schwankungen überlagert, was in Gleichung 2.7 aufgezeigt wird

$$u_i(x_i, t) = \bar{u}_i(x_i) + u'_i(x_i, t). \quad (2.7)$$

Mit steigender Reynolds-Zahl weitet sich der Größen- und Frequenzbereich [84, 85]. Unter der Annahme von lokal homogener und isotroper Turbulenz, überlagert sich die Strömung aus Wirbeln unterschiedlicher Größenordnungen. Hierbei dienen große Wirbel als Energielieferanten, die ihre Energie in Form einer Kaskade an immer kleiner werdende Wirbel abgeben. Die kleinsten Wirbel bleiben solange bestehen, bis sie die mechanische Energie durch viskose Kräfte in Wärme dissipieren. Dieser Prozess ist symbolisch in Abbildung 2.1 dargestellt.



**Abbildung 2.1:** Energiekaskade nach Pope [123].

Große Wirbel entsprechen ungefähr der Größe des um- oder durchströmten Objekts in der Strömung ( $l_0$ ), während kleine Wirbel zu der Größenordnung der sogenannten KolmogorovLänge ( $l_k$ ) korrespondieren. Diese ist definiert nach [123]

$$l_k = \left( \frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (2.8)$$

Äquivalent dazu lässt sich die Kolmogorov-Zeit definieren, welche der Zeit ( $t_k$ ) entspricht, in der die kleinsten Wirbel rotieren

$$t_k = \left( \frac{\nu}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (2.9)$$