RWTH AACHEN
RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN

Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik im Hüttenwesen

Lehr- und Forschungsgebiet für Energie- und Umweltprozesstechnik in der Materialtechnik

Prof. Dr.-Ing. Heinrich Köhne

Untersuchung zur Stabilisierung Kalter Flammen unter Variation der thermischen Randbedingungen

Diplomarbeit

vorgelegt von
Jayadi Lukito
Matrikel Nr. 223313

Betreuer: Dipl.-Ing. David Diarra **Aachen, August 2006**

Communicated by: Prof. Dr.-Ing. Heinrich Köhne

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 2

1. Einleitung 3

2. Physikalische und chemische Grundlage der Kalte Flamme Reaktion 4

2.1. Wärmefreisetzungsterm 5
2.2. Reaktionsphänomene 6
2.3. Nutzung kalter Flammen zur Unterstützung der Gemischbildung 7

3. Versuchsaufbau 10

3.1. Aufbau des Prüfstandes für den Kalte Flamme Verdampfer 10
3.2. Rezirkulationsrohr 13

4. Untersuchungen zur Stabilität der Kalte Flamme Reaktion 14

4.1. Stabilisierungsbereich 15
4.2. Einfluss der Lufteintrittstemperaturen auf Stabilisierung der Kalte Flamme Reaktion 19
4.2.1. Versuchsdurchführung 19
4.2.2. Ergebnis 19
4.3 Einfluss der Isolationslufteintrittstemperaturen auf Stabilisierung der Kalte Flamme Reaktion 23
4.3.1. Versuchsdurchführung 23
4.3.2. Ergebnisse 24
4.4. Einfluss des Luftverhältnisses auf die Stabilisierung der Kalte Flamme Reaktion 26
4.5. Initiierungsgrenze der Kalte Flamme Reaktion 28
4.6. Einfluss der Strömungsgeometrie auf die Stabilität der Kalte Flamme Reaktion 30
4.6.1. Versuchsdurchführung 30
4.6.2. Ergebnis 30

5. Zusammenfassung 35

Literaturverzeichnis 37
Abbildungsverzeichnis 39
Tabellenverzeichnis 42
Abkürzungen 43
Physikalische Formelzeichen 43
Graphischer Anhang 44

1. Einleitung

Die Nutzung fossiler Brennstoffe ist von großer Bedeutung für die Energieversorgung der Industrienationen. Fossile Brennstoffe decken bis zu 90 % des weltweiten Primärenergiebedarfs. Wachsendes Umweltbewusstsein und knappe Ressourcen erfordern einen schonenden Umgang mit Primärenergiequellen, und bedürfen einer sauberen Energiewandlung mit hohen Wirkungsgraden.

Die Grundlage für eine schadstoffarme Oxidation flüssiger Brennstoffe in Flammen ist ein homogenes Gemisch aus Oxidationsmittel, zumeist Luft, und dampfförmigem Brennstoff, welcher in den Gemischerzeugern bereitgestellt wird. Bei Verbrennung verringert eine möglichst homogene Mischung nicht nur den Anteil an thermisch gebildetem Stickoxid, sondern führt auch zu einem geringen Anteil unverbrannter Kohlenwasserstoffe. Homogene Gemische werden ebenfalls bei der Herstellung von Synthesegasen in Reformern zum Betrieb von Brennstoffzellen benötigt. Zur Erzeugung eines homogenen Gemisches muss der flüssige Brennstoff zunächst auf Siedetemperatur erwärmt und verdampft werden, bevor die Mischung mit dem Oxidator erfolgen kann. Da es sich bei der Verdampfung um einen endothermen Prozess handelt, muss Energie in Form von Wärme bereitgestellt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Gemischbildung von Luft und Heizöl EL als Brennstoff, welches einen Siedebereich von etwa $\vartheta = 170$ °C bis $\vartheta = 370$ °C aufweist untersucht. In diesem Temperaturbereich treten bereits exotherme Niedertemperaturoxidation innerhalb des Gemisches auf, die zu einer weiteren Aufwärmung des Gemisches beitragen und eine Selbstzündung zur Folge haben können. Unter diesen Reaktionen befindet sich die so genannte Kalte Flamme Reaktion.

Kalte Flammen lassen sich unter definierten Randbedingungen stabilisieren. Wegen des exothermen Reaktionsvorgangs wird die Kalte Flamme zur Unterstützung des Verdampfungsprozesses eingesetzt. In dieser Arbeit werden verschiedene Parameter unter bestimmten Randbedingungen in einem Gemischerzeuger für Heizöl EL-Luft Gemische untersucht. Hierzu wird ein zylindrischer Glasreaktor verwendet. Der Reaktor ist ein halbtechnischer Apparat, bei dem die Randbedingungen konstant gehalten werden und der Einfluss einzelner Parameter, wie z.B. der Temperatur ϑ, der Verweilzeit des Gemisches im Reaktor τ, der zugeführten Brennstoffmenge $\dot{m}$ und das Luftverhältnis λ untersucht werden können. Weiterhin ist eine optische Beobachtung der Kalte Flamme Reaktion möglich.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss der Randbedingungen auf die Stabilität und auf den Stabilisierungsort der kalten Flamme zu verstehen, um aus den Ergebnissen Hinweise für die weitere Arbeit zur Auslegung von Gemischerzeugern abzuleiten, um aus den Ergebnissen Datenmaterial für die weitere gezielte Erforschung der Kalten Flamme Reaktion zu gewinnen.

2. Physikalische und chemische Grundlage der Kalte Flamme Reaktion

Das Phänomen der Kalten Flammen wurde erstmals von Sir Humphrey Davy im Jahre 1815 beobachtet [Davy 17]. Der Begriff „Kalte Flammen“ erklärt sich dadurch, dass im Gegensatz zu normalen Flammen mit einer Flammtemperatur von ca. $\vartheta = 1200$ °C bis $\vartheta = 3000$ °C Kalte Flammen eine niedrigere Temperatur von ca. $\vartheta = 330$ °C bis $\vartheta = 400$ °C aufweisen.

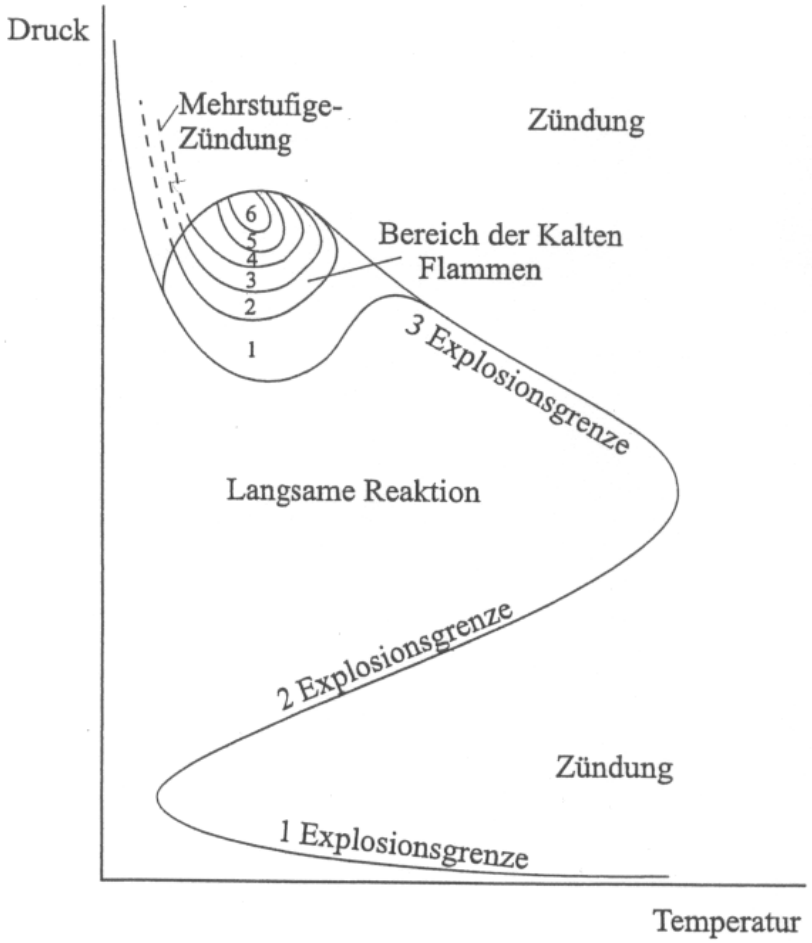


Abbildung 2.1: Idealisiertes *p,T* - Explosionsdiagramm von Kohlenstoff – Oxidator - Gemischen [Warnatz 96]

In Abbildung 2.1 ist das Explosionsdiagramm für Kohlenwasserstoff – Oxidator – Gemische dargestellt. Es existiert ein Gebiet, das von den Kalten Flammen eingenommen wird. Beim höheren Drücken kommt es zur Selbstzündung, wobei es hier je nach Randbedingung auch zur Explosion kommen kann. Beim niedrigeren Drücken findet eine langsame Reaktion (bzw. Oxidation) statt. Zwischen dem Übergang von der langsamen Oxidation zur Zündung liegt das Gebiet der Kalten Flammen, das durch die Zahlen von 1 bis 6 in Abbildung 2.1 gekennzeichnet ist. Kalte Flammen können eine Vorstufe der Zündung sein. Im Übergangsbereich tritt ein

Pulsieren der Kalten Flammen auf, das akustisch sehr gut wahrnehmbar ist. Dies ist messbar anhand der dadurch auftretenden Druckstöße.

Die Kalte Flammen Reaktion ist eine komplexe Kettenreaktion unter Beteiligung freier Radikale mit einer Vielzahl von Zwischenprodukten unterschiedlicher Lebensdauer und unterschiedlicher Reaktionsdauer. Kalte Flammen entstehen nach *Fish* [Fish 68] aufgrund thermischer Radikal – Kettenreaktionen, die zu einer Beschleunigung der Reaktionsgeschwindigkeit führt.

Charakteristisches Indiz für das Vorhandensein von Kalten Flammen ist das sprungartige Ansteigen der Temperatur beim Start der Reaktion [Coffee 79]. Dieser Temperaturanstieg lässt sich dadurch erklären, dass es sich bei den Kalten Flammen um eine exotherme Reaktion handelt.

Die Kalte Flamme ist mit einem bläulichen Leuchten verbunden, das bei Tageslicht nicht wahrgenommen werden kann. Selbst bei Abdunkeln des Raumes ist die Lichtemission erst nach gewisser Adaptionszeit der Augen erkennbar. Dieses Leuchten resultiert aus der Anregung von Formaldehyd nach den folgenden Reaktionsgleichungen [Agnew 65]:

$$CH_3O + OH \rightarrow CH_2O^* + H_2O$$

$$CH_3O + CH_3O \rightarrow CH_2O^* + CH_3OH$$

2.1. Wärmefreisetzungsterm

Die Beschreibung von Zündvorgängen erfolgt über die Bestimmung des Wärmestroms, der bei einem Brennstoff-Luft-Gemisch bei unterschiedlichen Temperaturen auftritt. Zumeist wird für die Modellierung der Ansatz von Arrhenius herangezogen, der eine exponentielle Abhängigkeit beinhaltet. Für eine Reihe von Kohlenwasserstoffen sind die Verhältnisse anders.

Abbildung 2.2 zeigt den Verlauf des freigesetzten Wärmestroms der Reaktion in Abhängigkeit von der Gemischtemperatur für Heizöl EL in einem Kolbenstromreaktor [Edenho. 05]. Die mit Luftvorwärmern auf die gewünschte Eintrittstemperatur erhitzten Gasströme gelangen über den Mischer in den Reaktor, der auf einem modifizierten Rohrbündelwärmetauscher basiert. Der Kraftstoffdampf wird im Verdampfer erzeugt, in dem der flüssige Kraftstoff in einen heißen Stickstoffstrom eingesprüht wird. Der vorverdampfte Kraftstoff und die Verbrennungsluft strömen durch eine Frontplatte mit Löchern und Rohrendstücken in den Reaktor ein. Durch Multiplikation der Wärmekapazitätsströme des Gemisches im Reaktor mit dem gemessenen Temperaturgradienten entlang der Reaktorachse kann die differentielle Wärmefreisetzung ermittelt werden. Da die exakte Zusammensetzung der Reaktionsprodukte im Reaktor nicht bekannt ist, wird der Wärmekapazitätsstrom für die Edukte berechnet. Der Temperaturgradient wird mit dem Verfahren der zentralen Differenzenquotienten aus den axialen Temperaturprofilen bestimmt. Bei Gemischtemperaturen $\vartheta_{Gemisch}$ unterhalb $\vartheta = 325$ °C findet praktisch keine Wärmefreisetzung statt. Ab etwa $\vartheta = 325$ °C kommt es zu einem steilen Anstieg der Kurve bis auf $\dot{R} = 1100$ kW/m³. Dieses Niveau (über 1000 kW/m³) wird bis zum Erreichen einer Gemischtemperatur von etwa $\vartheta = 430$ °C gehalten. Ab $\vartheta = 430$ °C

sinkt der freigesetzte Wärmestrom wieder deutlich ab. Bei weiterer Erhöhung der Temperatur kommt es zum Anstieg des Wärmestroms, was zu einer Selbstzündung führen kann.

Der Bereich, in dem ein geringer Wärmestrom freigesetzt wird (ab $\vartheta = 450$ °C), wird als langsame Verbrennung bezeichnet, die Hauptumsatzzone (unter der Kurve zwischen $\vartheta = 350$ °C und $\vartheta = 450$ °C) als Kalte Flamme. Ein wesentliches Merkmal von Heizöl EL, sowie einiger weiterer Kohlenwasserstoffe ist, dass der Umsatz nach dem Einsetzen der Kalten Flamme mit Erhöhung der Temperatur deutlich sinkt. Dieses Verhalten wird als negativer Temperaturkoeffizient (NTC) bezeichnet. Abbildung 2.2 zeigt deutlich, dass der Maximalwert der Wärmefreisetzung bei $\vartheta_{\text{Reaktor}} = 410$ °C im Luftverhältnisbereich $0{,}7 \le \lambda \le 1{,}2$ nahezu konstant bei ca. $\dot{R} = 1100$ kW/m^3 liegt. Für geringere Luftverhältnisse sinkt der Maximalwert deutlich ab (siehe kleines Diagramm in Abbildung 2.2). Auch für $\lambda > 1{,}2$ verringert sich die Wärmefreisetzung.

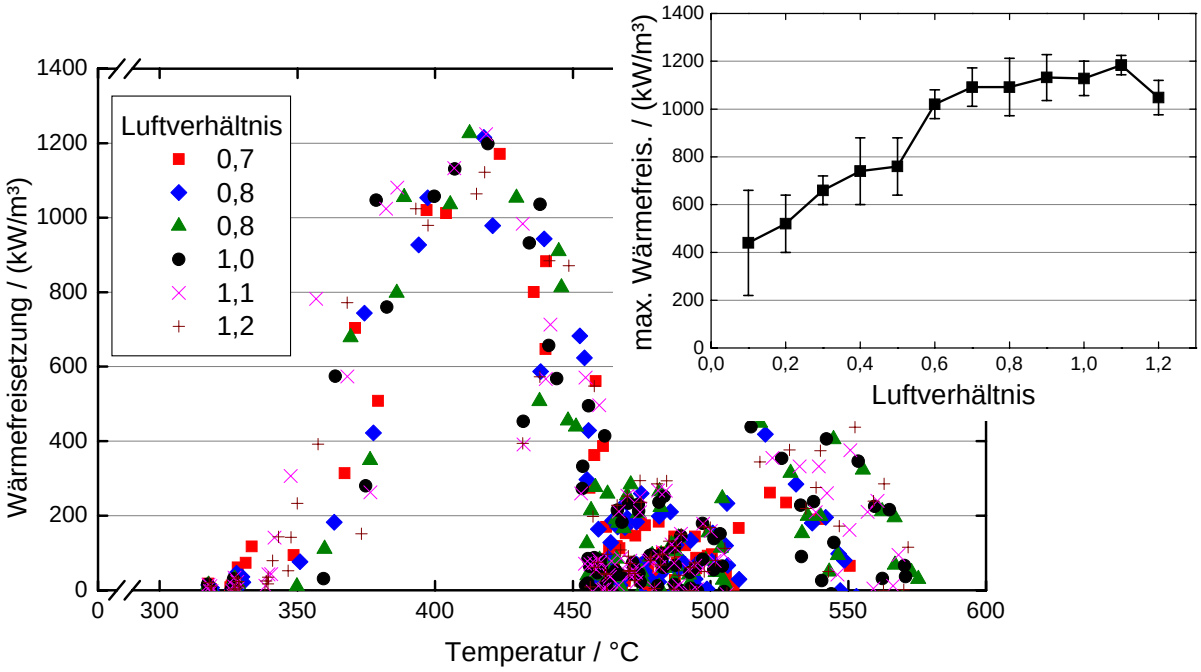


Abbildung 2.2: Differentielle volumenbezogene Wärmefreisetzung für $0{,}7 \le \lambda \le 1{,}2$; kleines Bild: Maximal-Wert der Wärmefreisetzung in Abhängigkeit des Luftverhältnisses [Edenho. 05]

2.2. Reaktionsphänomene

Neben der stationären langsamen Verbrennung (Slow Combustion) und der stationären Kalten Flamme (Cool Flame) treten noch weitere Reaktionsformen auf, die einen dynamischen Charakter aufweisen. Diese liegen im Temperaturfeld zwischen den beiden stationären Reaktionsformen und stellen damit den Übergang von der langsamen Verbrennung zur Kalten Flammen dar. In Abbildung 2.3 sind die verschiedene Oxidationsphänomene nach *Lignola et. al.* zusammengestellt [Lignola 88]. Die Ergebnisse wurden in einem kugelförmigen Rührreaktor / Jet-stirred Flow Reactor (JSFR) mit 100 cm^3 Volumen für Brennstoff-Luft-Gemische aus n-Heptan und iso-Oktan gewonnen. Die Aufenthaltszeit der Gase im Reaktor betrug

τ = 0,4 s. Diese Reihenfolge ergibt sich mit steigender Temperatur innerhalb des Reaktors zu beobachten:

A) Die langsame Oxidation, die mit einem langsamen Temperaturanstieg zu einem stationären Zustand verbunden ist
B) Mehrstufige Niedertemperaturzündungen, bei denen eine Kalte Flamme eine Hochtemperaturzündung vorbereitet
C) Periodisch oszillierende Kalte Flamme
D) Gedämpfte Kalte Flammen
E) Ein sprunghaftes Erreichen des stationären Zustandes, in der Quelle wird dieser als langsame Verbrennung bezeichnet [Gray 81]
F) Periodische Hochtemperaturzündungen.

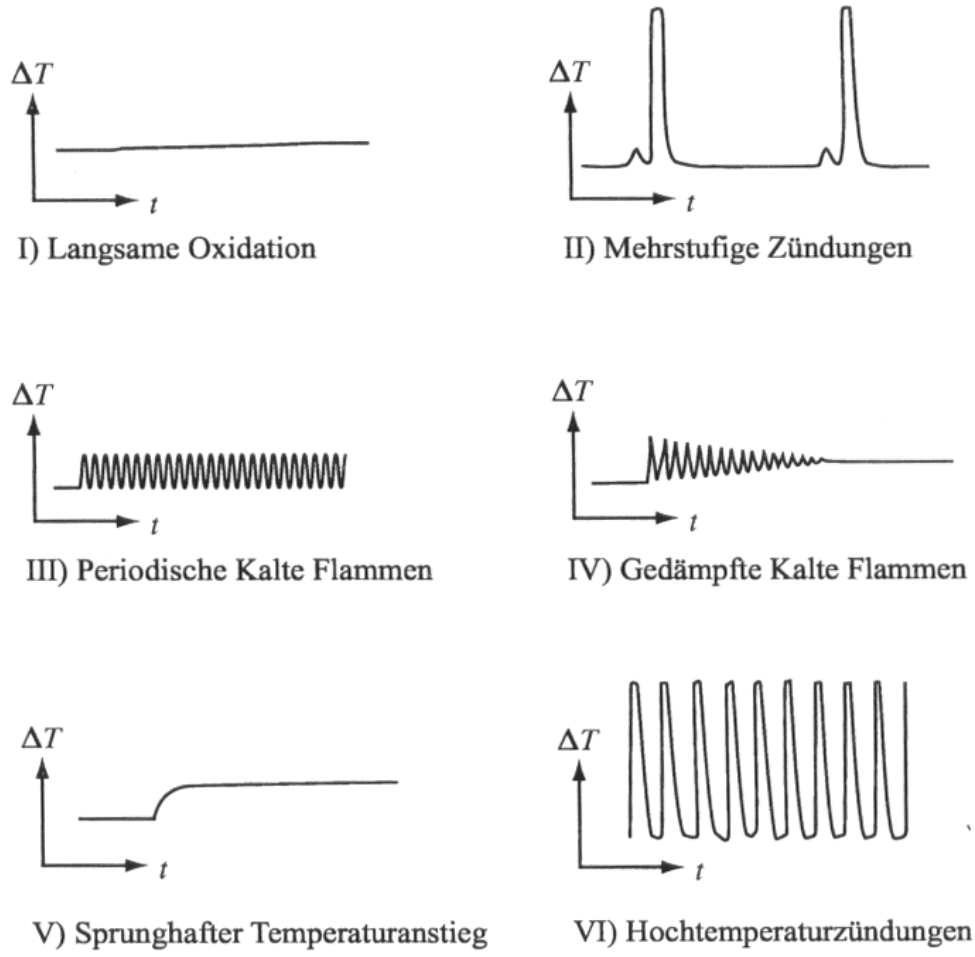


Abbildung 2.3: Übersicht über das Temperatur-Zeit-Verhalten der verschiedenen Oxidations-Phänomenen stöchiometrischer n-Heptan & iso-Oktan – Luft – Gemische bei der Niedertemperatur-Oxidation in einem JSFR; τ_V = 0,4 s [Lignola 88]

2.3. Nutzung Kalter Flammen zur Unterstützung der Gemischbildung

Ein wesentliches Kriterium zur Sicherung der Qualität des Reaktionsprozesses ist die Realisierung einer homogenen Brennstoffs – Luft – Mischung. Inhomogenitäten können zur Bildung unerwünschter Nebenprodukte führen und weitere negative Folgen verursachen. Die Gemischbildung lässt sich unterteilen in die Verdampfung

des Brennstoffs und die nachfolgende Mischung mit der Verbrennungsluft. Die Verdampfung ist im physikalischen Sinne der Übergang eines flüssigen Stoffs in den gasförmigen Zustand durch Verdunstung und Sieden. Die Verdampfungsentalphie beschreibt die Wärmemenge, die benötigt wird, um die Flüssigkeit bei unverändertem Druck in Dampf gleicher Temperatur zu überführen [Brockha. 06].

Sieden ist der Übergang einer Flüssigkeit in den gasförmigen Aggregatzustand bei einer bestimmten Temperatur, dem Siedepunkt [Brockha. 06]. Die Siedetemperatur steigt mit wachsendem Druck. Im Allgemeinen wird die Verdampfungstemperatur eines flüssigen Stoffes mit seiner Siedetemperatur bei Atmosphärendruck gleichgesetzt. In DIN 51603-1 wird der Siedebereich für Heizöl EL (HEL) angegeben [DIN 51603]. Nach den Richtlinien dürfen nicht mehr als 65 % des Volumens bei $\vartheta = 250$ °C verdampfen, jedoch müssen bis $\vartheta = 350$ °C 85 % des Brennstoffs in der Gasphase vorliegen. Für Dieselkraftstoff wird darüber hinaus in DIN EN 590 eine Mindestverdampfungsmenge von 95 % bei $\vartheta = 370$ °C gefordert [DIN 590]. Zur Mischung von Brennstoffdampf und Oxidationsmittel werden unterschiedliche Vormischtechniken eingesetzt. *Lucka* unterscheidet drei Vormischtechniken [Lucka 00]

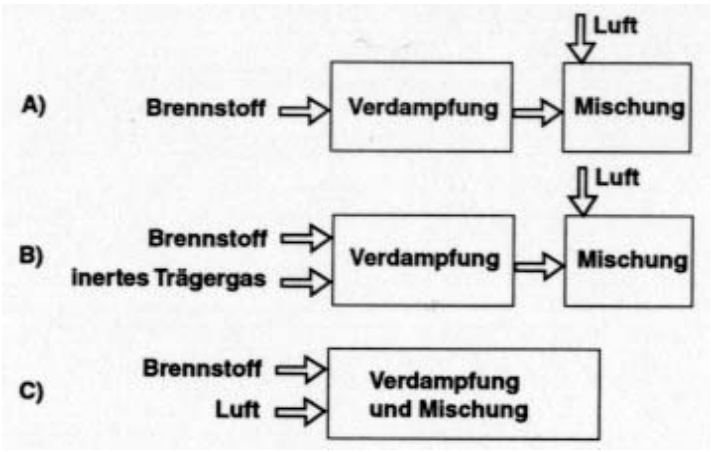


Abbildung 2.4: Varianten der Vormischtechnik flüssiger Brennstoffe [Lucka 00]

Die erste Variante (Abbildung 2.4, Fall A) wird mit einer direkten Verdampfung des Brennstoffes im Bereich der Siedetemperatur betrieben. Nach der Verdampfung erfolgt eine Mischung mit Oxidationsmittel in einem zweiten Prozessschritt. Die notwendige Energie zur Verdampfung des Brennstoffes wird über beheizte Verdampferflächen bereitgestellt.

Eine weitere Variante (Fall B bei Abbildung 2.4) stellt die Verdampfung des flüssigen Brennstoffes in einem inerten Gasstrom vor der Mischung mit Luft dar. Die Verdampfung wird über die Sättigungstemperatur beschrieben. Technische Apparate, die nach diesem Prinzip arbeiten, sind Sättiger, die in Laborapparaten eingesetzt werden.

Die dritte Variante (Fall C) arbeitet mit direkter Verdunstung des Brennstoffs in Anwesenheit von Luft. In diesem Fall ergeben sich Vorteile hinsichtlich der notwendigen Prozessführung, da Verdunstung und Mischung in einem Schritt erfolgen. Die zur Verdampfung des Brennstoffes notwendigen Temperaturen ergeben sich wiederum aus den Partialdruckverhältnissen. In diesen Bereich fallen auch die

Verfahren der Eindüsung eines flüssigen Brennstoffes mittels Zerstäuberdüse in einen Luftstrom.

Nachdem Brennstoff und Oxidationsmittel in Kontakt gekommen sind, können abhängig vom Systemdruck und der Temperatur unterschiedliche Prozesse auftreten. *Lucka et. al.* unterscheidet für den Fall der Brennstoffeindüsung von Heizöl in Luft drei Bereiche [Lucka 99].

Bei Temperaturen unterhalb von etwa $\vartheta = 300$ °C kommt es zu keinen nennenswerten Reaktionen, der Brennstoff verdunstet in dem Luftstrom. Die Verdampfungsenthalpie muss von außen bereitgestellt werden oder führt zu einer Abkühlung des Luftstromes. Bei diesen Temperaturen ist eine so genannte langsame Oxidation von n-Heptan festzustellen, die jedoch nicht zu einer signifikanten Erwärmung des Systems führt [Lignola 88].

Bei einer Erhöhung der Temperatur kommt es zur Kalten Flammen Reaktionen. Diese stabilisieren sich auf einem erhöhten Temperaturniveau, bei Heizöl EL etwa im Bereich zwischen $\vartheta = 400$ °C bis $\vartheta = 500$ °C [Lucka 99]. Durch die Reaktion tritt eine Umsetzung langkettiger Kohlenwasserstoffe in kurzkettige Moleküle auf, wobei eine Vielzahl von Reaktionsprodukten festzustellen ist [Pilling 97].

Oberhalb von $\vartheta = 500$ °C kommt es abhängig von den speziellen Randbedingungen zu einer Selbstzündung, d.h. einer spontanen Entflammung des Gemisches ohne externe Zündquelle, nach der so genannten Zündverzugszeit τ [Warnatz 96].

3. Versuchsaufbau

3.1. Aufbau des Prüfstandes für den Kalte Flamme Verdampfer

Der in dieser Arbeit verwendete Reaktor ist als Verdampfungsreaktor konzipiert und wurde von *Klein* konstruiert [Klein 02]. Einige Anpassungen wurden durchgeführt, um die Untersuchungen, die in dieser Arbeit durchgeführt wurden, zu ermöglichen.

Der Verdampfer ist aufgebaut aus einer Grundplatte und einer Abschlussplatte aus Edelstahl, zwischen die ein Reaktorzylinder und ein umgebender Isolationszylinder aus hochtemperaturfestem Duran-Glas gespannt wurden (siehe Abbildung 3.1). Dies ermöglicht die optische Identifikation der Kalten Flammen. In den Grundplatten wurden Nuten vorgesehen, damit die durch Wärmezufuhr auftretende Ausdehnung nicht zur Zerstörung der Glaszylinder führt, welche eine unterschiedliche Wärmeausdehnung haben.

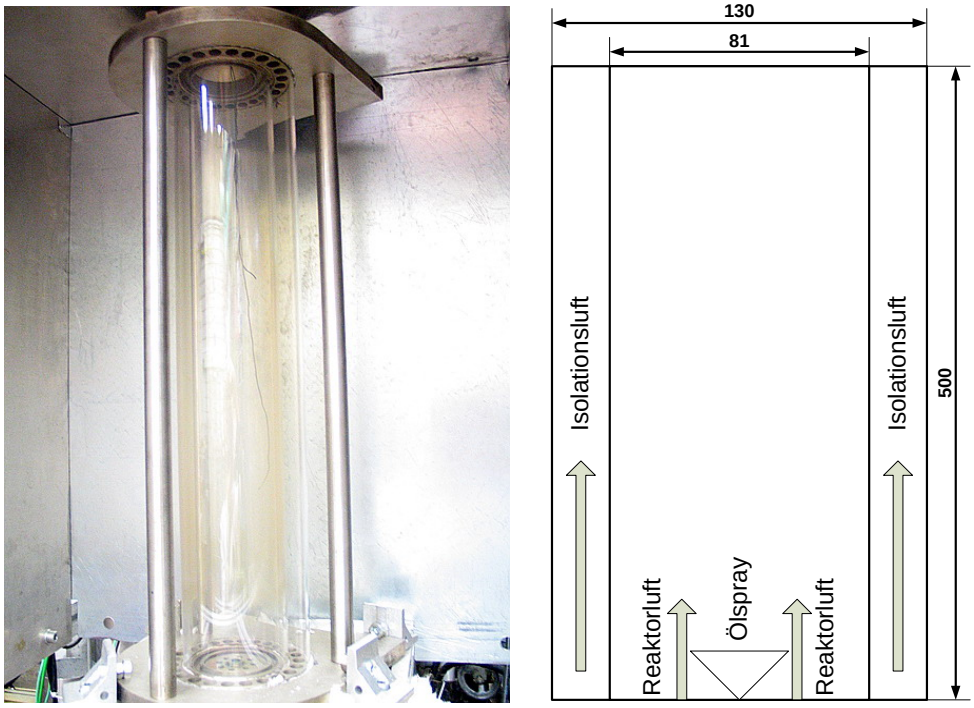


Abbildung 3.1: Kalte Flammen Verdampfer

Zur Sicherstellung von gleich bleibenden Wärmeverlusten des Reaktors und von gleich bleibenden Randbedingungen, ist um den Reaktor ein so genannter Isolationszylinder mit einem Durchmesser von d = 130 mm gebaut worden, der unabhängig von dem Reaktor mit heißer Luft beschickt wird. Ein Gebläse wurde benutzt, um die benötigte Isolationsluftmenge zu fördern. Stromab des Gebläses wird der Volumenstrom anhand eines Schwebekörper- Durchflussmessers eingestellt. Die mittels eines Luftvorwärmers erhitzte Luft wird dem Isolationsluftverteiler zugeführt. Die Isolationsluft und die Prozessluft für den Reaktor sind über die gesamte Reaktorlänge voneinander getrennt. Hier wird der Reaktor aktiv isoliert, solange die $\vartheta_{\text{Umgebung}} < \vartheta_{\text{Mantel, ein}} < \vartheta_{\text{Reaktor}}$ ist.

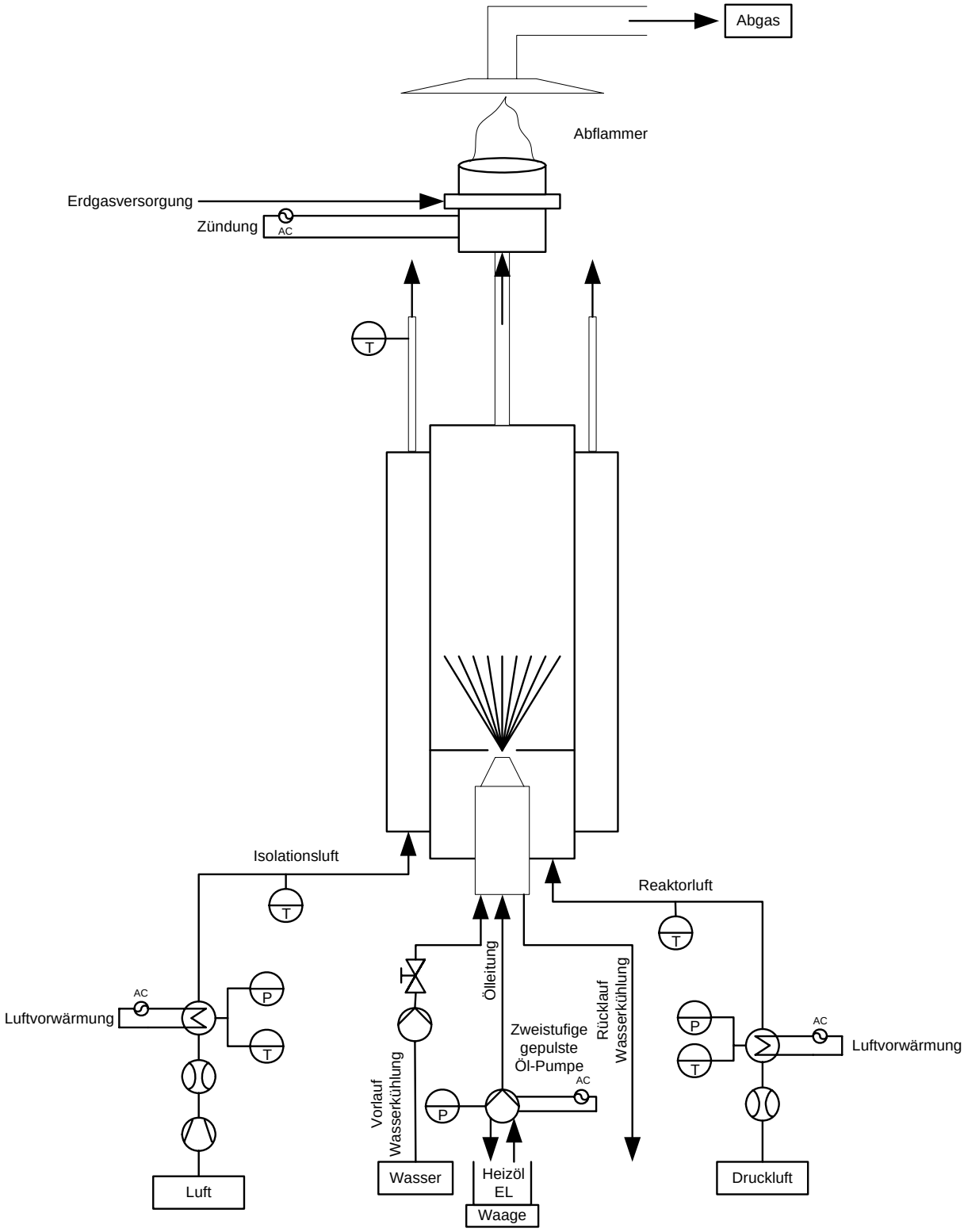


Abbildung 3.2: Verfahrensfließbild des Kalte Flamme Verdampfers

Um die zwei Prozessströme auf die erforderlichen Temperaturen zu bringen, sind zwei Lufterhitzer implementiert. Dabei wird Druckluft durch eine Heizpatrone geschickt, die aus mehreren kreisförmig angeordneten Drahtwendeln bestehen. Jede Drahtwendeln liegt in einem separaten Keramik Kanal.

Mit einer Regelung werden die Heizpatronen für die Prozessluft angesteuert. Die Isolationsluft wurde manuell über Potentiometer eingestellt. Die Istwert-Überwachung

der Temperaturen wurde über ein Thermoelement, das im Heißen Luftstrom angebracht war durchgeführt. Ein Druckwächter diente als Sicherheitsabschaltung für die Regelung.

Um eine thermische Zerstörung der Systeme sowie ein Überhitzen des Brennstoffes und damit Ablagerungen in dem Zerstäubersystem zu vermeiden, wurde eine Wasserkühlung für die Düse vorgesehen. Die Standard Simplex Düsen von Danfoss, die hier benutzt wird, kann aufgrund ihrer Bauweise nur im Bereich der Brennstoffversorgung, das heißt bis zum Gewindeanfang der Düsen gekühlt werden. Bei zu langer Verweilzeit der Düsen im heißen Luftstrom ohne Brennstoffdurchfluss könnte die Temperatur des Brennstoffes in der Düse zu stark ansteigen. Die sich einstellenden Ablagerungen würden zum Defekt der Düse führen. Die Wasserkühlung für die Einspritzdüsen umfasst die Einspritzdüse, so dass längere Verweilzeiten ohne Beschädigung möglich sind.

Das entstehende Produktgas muss wegen der Explosionsgefahr vor dem Eintritt in die Kaminanlage mit einer herkömmlichen Flamme abgebrannt werden. Ein langes Rohr mit kleinem Durchmesser wird hier als Abgasleitung verwendet um die Rückzündung zu vermeiden. Großer Wert wurde auf die Dichtigkeit des gesamten Systems gelegt. Es wurde eine vorhandene Abflammvorrichtung mit einer Zündvorrichtung versehen. Diese kann bei einem nicht zündfähigen Produktgas der Kalten Flammen mit Erdgas versorgt werden.

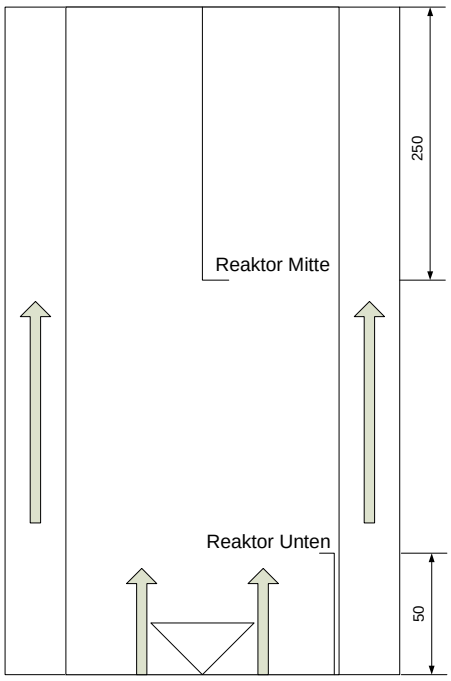


Abbildung 3.3: Temperaturmessstellen in dem Reaktor

Zwei Mantelthermoelemente für die Temperaturmessungen werden in dem Reaktor implementiert. Die beiden haben einen Durchmesser von d = 0,5 mm mit einer 0,5-Wertzeit von $\tau_{0,5}$ = 1,8 s und eine 0,9-Wertzeit von $\tau_{0,9}$ = 5,52 s. Die 0,5/0,9-Wertzeit ist die Zeit, die ein Thermoelement benötigt, um 50 % bzw. 90 % der Differenz eines Temperaturwechsels des Mediums anzuzeigen. Diese Werte sind Referenzwerte, die an Luft mit einer Geschwindigkeit von v = 2 m/s ermittelt worden sind. Die Positionierung der Thermoelemente wird so angepasst, dass die gesamte stabile

Reaktionszone der Kalten Flamme Reaktion erfasst werden kann (siehe Abbildung 3.3). Die Daten von den Thermoelementen werden mit einem Schnelltemperaturmessgerät erfasst. Eine Temperaturmessgenauigkeit bis zu 2 °C und eine Abtastrate von 20 Messungen pro Sekunde von jedem Thermoelement werden hier gewährleistet.

3.2. Rezirkulationsrohr

In dieser Arbeit wurde auch eine Variation der Strömungsführung untersucht. Es sollten Alternativen zur Stabilisierung der Kalten Flamme untersucht werden. Ein Rezirkulationsrohr (siehe Abbildung A.1 im Anhang) wurde zusätzlich in dem Reaktor eingebaut.

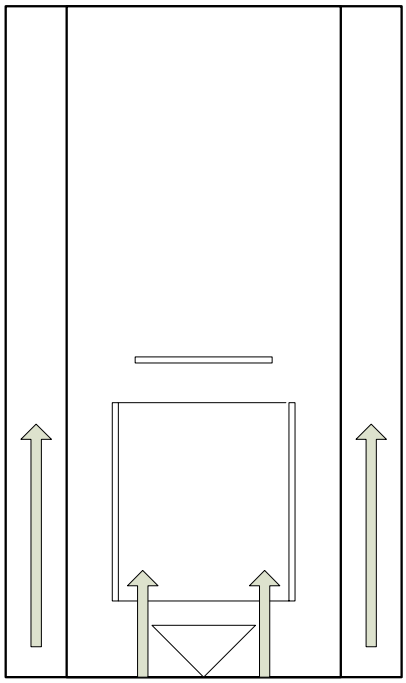


Abbildung 3.4: Position des Rezirkulationsrohres in dem Reaktor

Das Flammrohr wurde direkt über der Düse am Reaktoreintritt mit einem Abstand von 12 mm zu der unteren Platte platziert. Die Strömung der Reaktorluft wurde auch innerhalb des inneren Verdampferrohres gemessen.

4. Untersuchungen zur Stabilität der Kalte Flamme Reaktion

In diesem Teil der Arbeit wurde die Stabilisierung der Kalten Flamme Reaktion untersucht. Verschiedene Eingangsparameter wurden variiert und beobachtet, um deren Einfluss auf die Stabilisierung der Reaktion zu ermitteln.

Insbesondere wurden folgende Parameter variiert:

- die Reaktorlufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$
- die Mantellufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$
- der Reaktorluftmassenstrom $\dot{m}$ bzw. der Reaktorluftvolumenstrom $\dot{V}_{\text{Luft}}$, der in den Reaktor eintritt

Der Reaktorluftvolumenstrom bestimmt das Luftverhältnis λ der Verbrennung. Wegen dem Zusammenhang zwischen Dichte ρ, Volumen V und Temperatur ϑ wurde neben der Lufteintrittstemperatur auch das Luftverhältnis λ mitbestimmt. Die Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ und der Reaktorluftvolumenstrom $\dot{V}_{\text{Luft}}$ bestimmen die theoretische Verweilzeit τ_{th}. Weiterhin dienen die $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ und der $\dot{V}_{\text{Luft}}$ als Energieträger zur Reaktionsbildung in dem Reaktor. Die Mantellufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ soll den Reaktor vor Wärmeverlusten nach Isolationsschicht schützen.

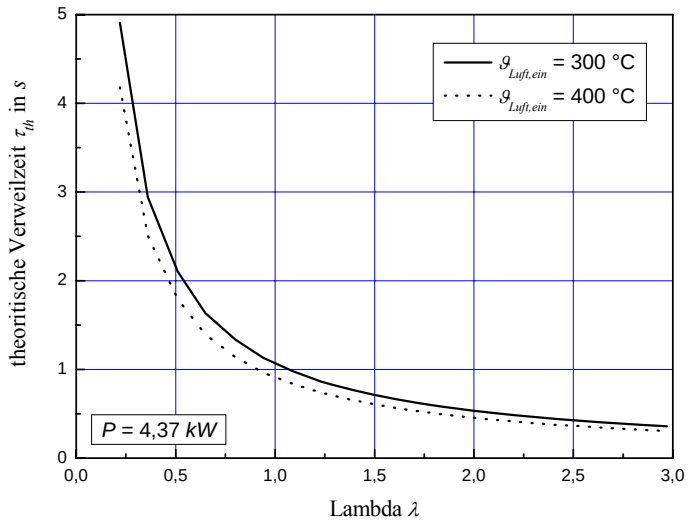


Abbildung 4.1: Theoretische Verweilzeit in dem Reaktor in Abhängigkeit des Luftverhältnisses

Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 zeigen die Abhängigkeit der theoretische Verweilzeit τ_{th} von dem Luftverhältnis λ und der Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$. In den Abbildungen wird deutlich, dass die Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ einen geringeren Einfluss auf die theoretische Verweilzeit τ_{th} hat als das Luftverhältnis λ. In dieser Arbeit

wird der Bereich zwischen den beiden Kurven untersucht. Die gepunktete Linie stellt den theoretischen Verweilzeitverlauf der Luft bei einer Eintrittstemperatur von $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 400\ °C$ in dem Reaktor mit zunehmenden Lambda dar. Diese Temperatur wurde gewählt, da die Obere Lufteintrittstemperaturgrenze der Untersuchungen in dieser Arbeit bei diesem Wert liegt.

Die Versuche wurden in einem abgedunkelten Raum durchgeführt. Eine Hysteresekurve wurde anhand des gespeicherten Temperaturverlaufs erstellt, damit die Reaktionen besser zu erkennen sind.

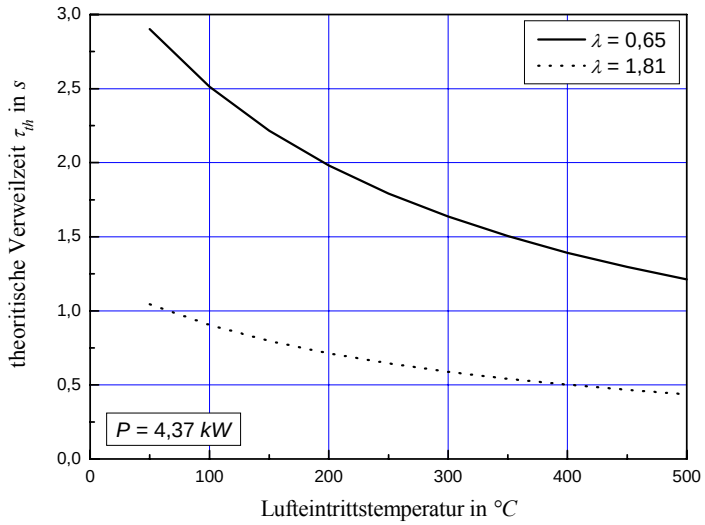


Abbildung 4.2: Theoretische Verweilzeit in dem Reaktor in Abhängigkeit der Lufteintrittstemperatur

4.1. Stabilisierungsbereich

Die Kalte Flamme stabilisiert sich unter bestimmten Randbedingungen. Außer den oben genannten in Kapitel 2.2 wurden verschiedene Phänomene beobachtet. Stabile Reaktionszonen der Kalten Flamme im Mehrstrahlsystem wurden nur in zwei verschiedenen Reaktionsbereichen beobachtet (siehe Abbildung 4.3). Diese Zone ist als helle weiße Zone erkennbar. Die Eigenschaften der Zonen werden beeinflusst von den Randbedingungen. Zwei Thermoelemente wurden genau in den Bereichen eins und zwei platziert um die Temperatur des Reaktors, insbesondere der Kalten Flamme Reaktion zu messen.

Bei einem geringeren Luftvolumenstrom $\dot{V}_{\text{Luft}}$ unter konstanter Leistung P und konstanter Manteleintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ bildete sich ein Reaktionsgebiet zunächst im unteren Bereich (Bereich 1), es blieb jedoch nicht stabil und erlosch sofort. Ab einem bestimmten Temperaturniveau von $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ wurden die beiden Zonen stabil. Der erste Bereich ist im Rezirkulationsgebiet zu beobachten. Die lange Verweilzeit begünstigt die Reaktion in diesem Bereich um die kalte Flamme zu stabilisieren. Die hohe Mantellufteintrittstemperatur unterstützt die Reaktionsbildung in diesem Bereich, da sie

den Wärmestrom bzw. die Wärmeverluste von dem Reaktor nach außen dämmt. Die Reaktionszone wurde als ringförmige Zone beobachtet. Aufgrund dieser Form ist die Berührungsfläche zwischen Reaktionszone und Reaktorwand groß. Dieser Zustand verursacht eine Abhängigkeit dieses Gebietes von der Richtung des Wärmestromes zwischen Reaktor und Isolationsluft. Bei niedrigerer Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ war die Reaktionszone schwer zu stabilisieren, weil nicht immer genügend Energie zum Starten der Kalte Flamme Reaktion vorhanden war.

Mit derselben Einstellung bei höheren $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ entstand die obere Reaktionszone (Bereich 2) nach dem ersten Bereich. Der liegt ungefähr in der Mitte des Reaktors. Bei großem Luftvolumenstrom entstand das zweite Gebiet zum ersten Mal. Die Position der oberen Zone (Bereich 2) ist vom Luftvolumenstrom bzw. der Art der Strömung abhängig. Sie wurde bei höherem Luftvolumenstrom zum Ende des Reaktors hin verlagert. Bei niedrigerem Lambda stabilisierte sie sich im Mittelteil des Reaktors. Dieses Gebiet dehnte sich mit zunehmender Temperatur aus.

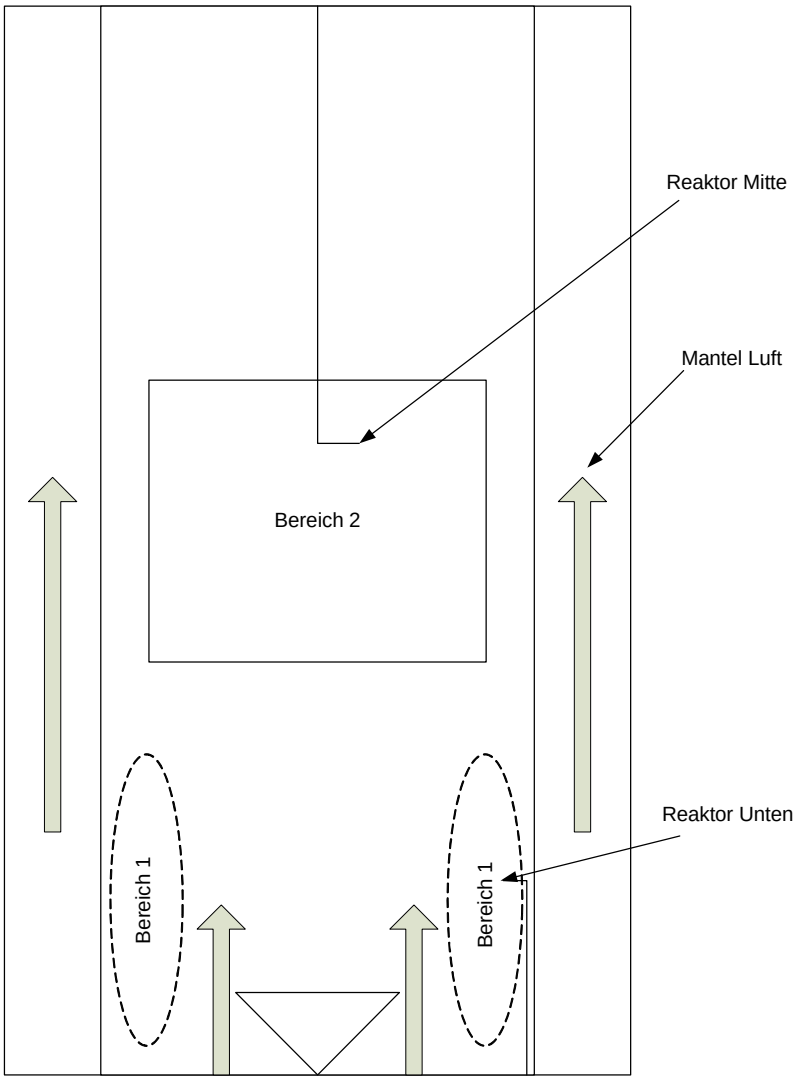


Abbildung 4.3: Verteilung der Kalte Flamme Reaktion Gebiet in dem konventionellen Reaktor

Bevor die Kalte Flamme sich stabilisierte, wurde eine Instabilität in Form einer Oszillation beobachtet, und zwar in zwei verschiedenen Formen. Der erste Typ ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Zu Beginn des Vorgangs bildet sich am Reaktorausgang eine Reaktionszone, diese wandert entgegen der Strömungsrichtung im Reaktor. Das rechte Bild zeigt, dass im Eintrittsbereich des Reaktors schlagartig eine größere Zone entsteht, die das Rezirkulationsgebiet einschließt. Unmittelbar im Anschluss an dieses Phänomen erlosch die Reaktion im gesamten Reaktor. Der Vorgang wiederholte sich periodisch. Mit zunehmender Lufteintrittstemperatur wurde die Frequenz immer größer bis eine stabile Kalte Flamme Reaktion entstand.

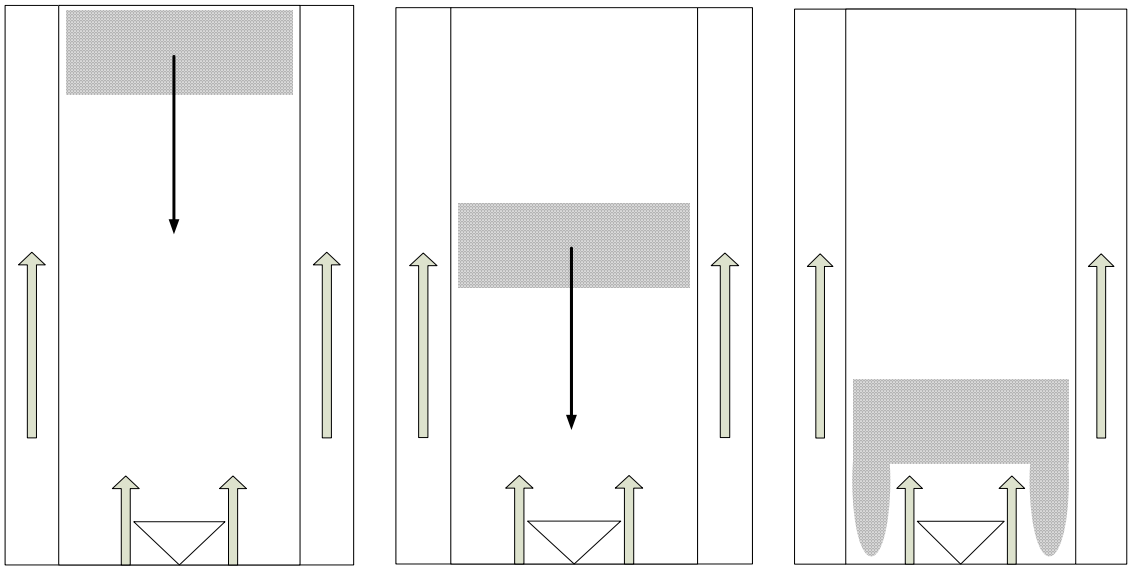


Abbildung 4.4: Erster Typ der oszillierenden Kalten Flamme Reaktionszonen in dem Reaktor

Der zweite Typ der Bewegung der Reaktionen im Reaktor entsprach im Wesentlichen dem oben beschriebenen. Allerdings wurde die Existenz einer ortsstabilen Reaktionszone im Rezirkulationsbereich beobachtet (siehe Abbildung 4.5). Zu Beginn des Vorgangs entsteht mit dem Reaktionsgebiet am Ende des Reaktors auch eines im Eintrittsbereich. Die Bewegung der Reaktionszone vom Reaktorausgang zum Reaktoreingang erfolgte wie beim ersten Typ. Nach Vereinigung der Zonen, erlischt die Reaktion und der Vorgang setzt von neuem ein. Auch hier stieg mit zunehmender Lufteintrittstemperatur die Frequenz bis eine stabile Reaktionszone entstand.

Das Erlöschen der Reaktion nachdem sich die beiden Gebiete vereinigten wird auf die plötzliche Vergrößerung des Reaktionsvolumens zurückgeführt, was zu einer höheren volumetrischen Wärmefreisetzung bei gleich bleibender Verlustwärme führt. Aufgrund der Charakteristik des negativen Temperaturkoeffizienten der Reaktion kommt es zu einem Verlöschen.

Abbildung 4.6 zeigt das Temperaturprofil an verschiedenen Stellen des Reaktors bei Bewegung des nicht ortsstabilen Reaktionsgebietes entlang des Reaktors. Eine zunehmende Frequenz ist hier zu erkennen, weil hier ein Anstieg in Lufteintrittstemperatur stattfindet.

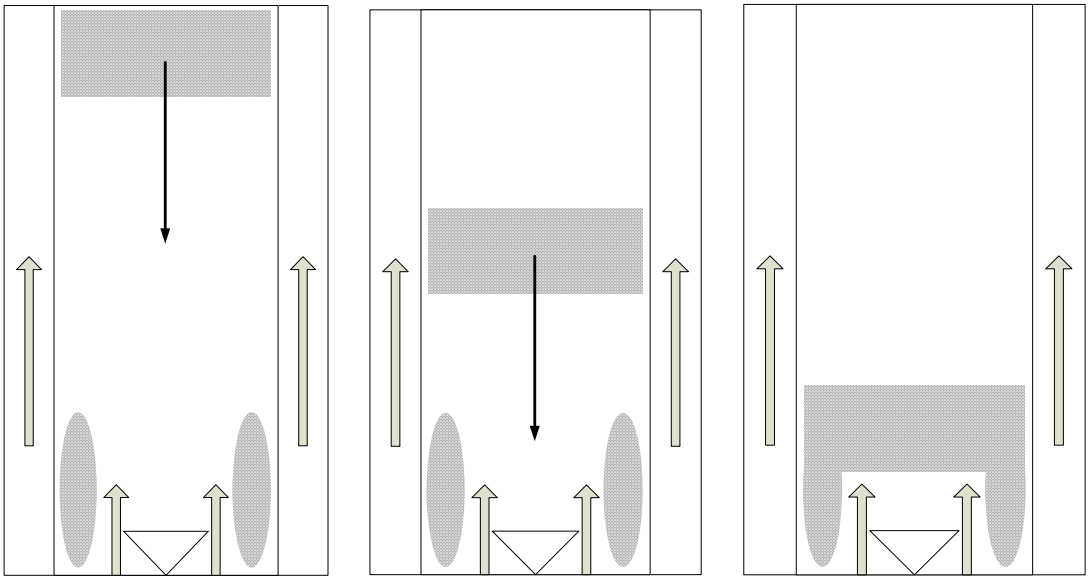


Abbildung 4.5: Zweiter Typ der oszillierenden Kalten Flamme Reaktionszonen in dem Reaktor

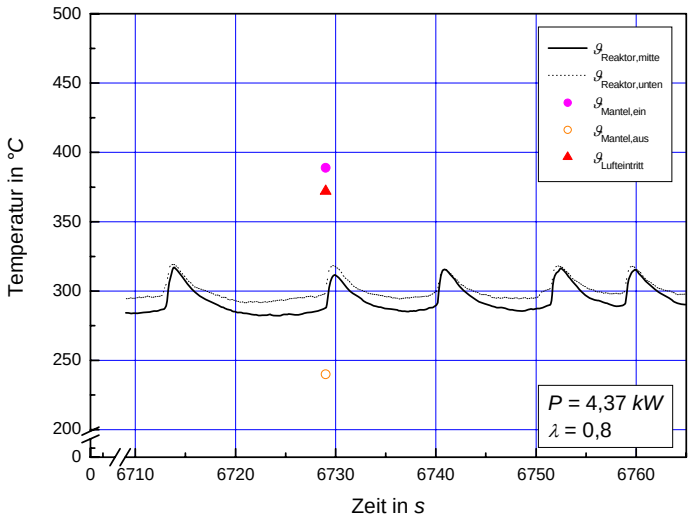


Abbildung 4.6: Reaktortemperatur von beweglicher stabiler kalte Flamme Zonen in Abhängigkeit der Zeit

Bei einem Luftverhältnis $\lambda = 3$ sowie bei niedrigerer $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ gab es eine scharfe Trennung zwischen den beiden Reaktionszonen. Mit zunehmender $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ wurde dieses schwarze Gebiet immer kleiner. Bei einer $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ über 400 °C verschwand das Gebiet.

4.2. Einfluss der Lufteintrittstemperaturen auf Stabilisierung der Kalte Flamme Reaktion

4.2.1. Versuchsdurchführung

Als Randbedingung wurde eine Isolationslufteintrittstemperatur von $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 390$ °C festgelegt. Der Grund dafür ist, dass eine Beheizung des Reaktors verhindert werden soll. $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ soll so niedrig wie möglich sein, damit der Wärmestrom von dem Reaktor nach Außen fließt. Die Versuche wurden mit einem Luftverhältnis von $\lambda = 0{,}65$ bis $\lambda = 0{,}94$ betrieben.

Versuch	$\dot{V}_{\text{Luft}}$	λ	$\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$	$\vartheta_{\text{Mantel, aus}}$
01	45 SLM	0,65	389 °C	250 °C
02	55 SLM	0,80	391 °C	250 °C
03	65 SLM	0,94	390 °C	246 °C

Tabelle 4.1: Parameterset für die Bestimmung des Einfluss der Lufteintrittstemperaturen $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ auf die Stabilisierung der Kalte Flamme Reaktion, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW

Zunächst wurde ein stationärer Zustand mit einer stabilen Reaktionszone im Reaktor eingestellt. Danach wurde von diesem Betriebspunkt die Lufteintrittstemperatur bis zum Verlöschen der Reaktion reduziert. Anschließend wurde die Lufteintrittstemperatur bis zum erneuten Einsetzen der Reaktion erhöht. Hierbei wurde die Temperatur kontinuierlich geändert. Die Einstellung der Stationarität des Gesamtsystems wurde nicht abgewartet.

4.2.2. Ergebnis

Bei stationärem Betrieb bei einer Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ über 400 °C waren beide Reaktionszonen stabil und eine leichte Temperaturschwankung im Bereich von 2 K wurde gemessen. Mit abnehmender Temperatur wurden Oszillationen vom Typ II beobachtet (siehe Abbildung 4.5). Eine Erhöhung der Amplitude der Temperaturschwankung wurde hier beobachtet bei einer Frequenz von $f = 3$ Hz. Bei weiter fallenden Lufteintrittstemperaturen stiegen die Amplituden bei gleichzeitig sinkender Frequenz. Bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 240$ °C trat eine Zündung im Reaktor ein, dann wurde der Brennstoff direkt abgestellt. Unmittelbar vor der Zündung wurde eine Frequenz von $f = 0{,}3$ Hz beobachtet und eine Amplitude der Temperaturschwankung bis 20 K wurde gemessen. Als Grund für die Selbstzündung bei Verringerung der Lufteintrittstemperatur und somit Herabsetzung der Reaktortemperatur wird die höhere Verweilzeit angenommen. Andererseits stieg aufgrund des negativen Temperaturkoeffizienten die Wärmefreisetzung an, was zu einer Zündung führen kann.

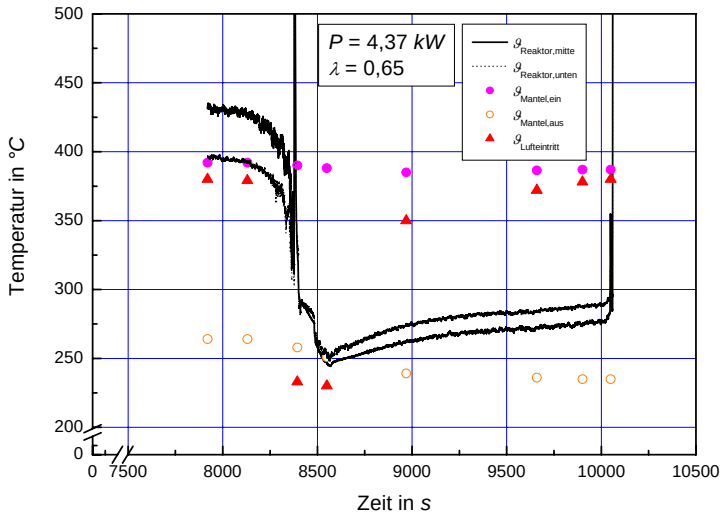


Abbildung 4.7: Temperaturverlauf im Reaktor in Abhängigkeit von der Zeit bei Variation der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 0{,}65$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 389\ °C$

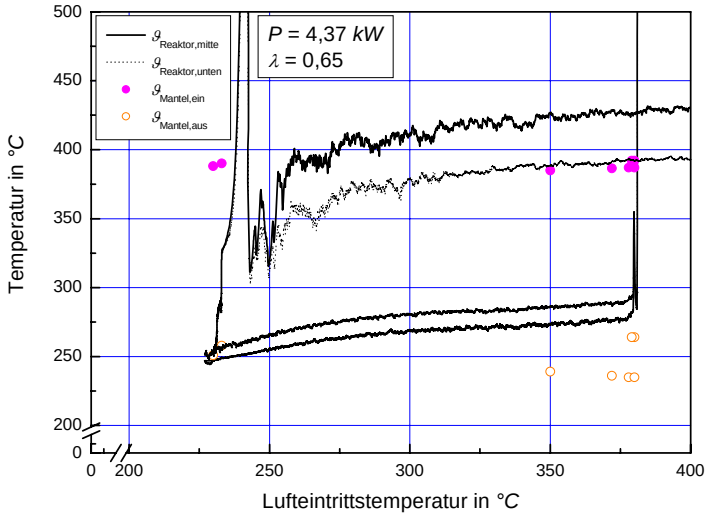


Abbildung 4.8: Temperaturverlauf im Reaktor in Abhängigkeit der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 0{,}65$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 389$ °C

Während des weiteren Versuchsverlaufes blieb die Brennstoffzufuhr aktiviert und die Lufteintrittstemperatur wurde erhöht. Die Anfangstemperatur der Reaktorlufteintrittstemperatur lag bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 230$ °C und wurde auf $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 380$ °C erhöht. Bis zu einer Reaktortemperatur von $\vartheta_{\text{Reaktor, mitte}} = 250$ °C wurde keine Reaktion beobachtet. bei höheren Temperaturen wurde eine Vorreaktion beobachtet. Sie wurde am oberen Teil des Reaktors gebildet und wanderte stromaufwärts entsprechend der Oszillationen vom Typ I (siehe Abbildung 4.4). Unmittelbar nach den Oszillationen kam es zur Selbstzündung. Beim Hochfahren der Lufteintrittstemperatur entstand die Selbstzündung wegen des plötzlichen Anstiegs der verfügbaren Energie. Die Summe der Energie aus der

kalten Flamme und der Energie aus der Lufteintrittstemperatur führte zur Selbstentzündung.

Der zweite Versuch wurde mit einem Luftverhältnis $\lambda = 0{,}80$ durchgeführt. Die weiteren Randbedingungen entsprachen denen der vorherigen Versuche. Zu Beginn des Versuches wurde eine stabile Reaktion beobachtet. Bei abnehmender Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ wurde die Reaktion instabil und oszillierendes Verhalten wurde beobachtet. Die

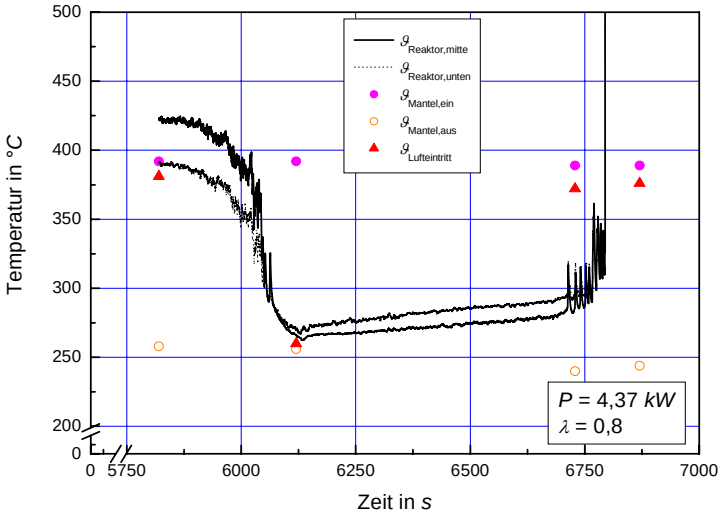


Abbildung 4.9: Temperaturverlauf im Reaktor in Abhängigkeit von der Zeit bei Variation der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 0{,}80$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 391$ °C

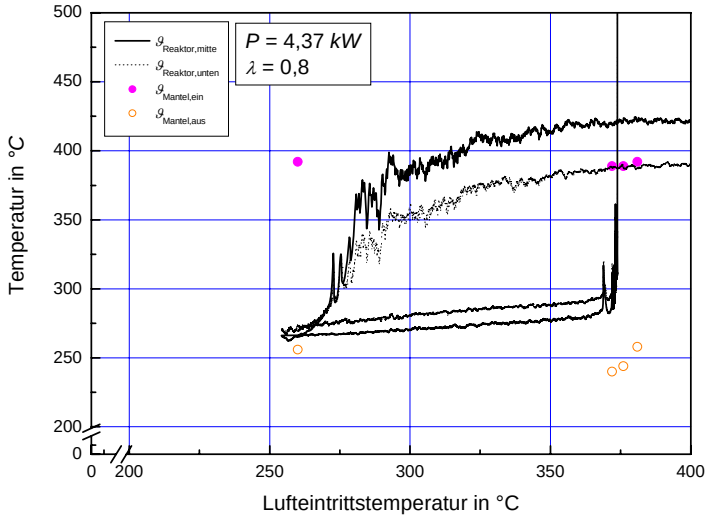


Abbildung 4.10: Temperaturverlauf im Reaktor in Abhängigkeit der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 0{,}80$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 391$ °C

Oszillation verringerten die Frequenz. Die Reaktion erlosch bei $\vartheta_{\text{Reaktor, mitte}} = 275$ °C und die Reaktortemperatur sank deutlich. Es wurden keine Selbstzündungen beobachtet.

Bei Erhöhung der Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ wurde eine Zündung bei einer Reaktortemperatur von $\vartheta_{\text{Reaktor, mitte}} = 325$ °C beobachtet. Die Ursache der Zündung war vergleichbar mit der bei vorherigen Versuchen aufgetretenen Ursache. Bevor die Selbstzündung entstand, wurde eine Oszillation vom Typ I beobachtet.

Der dritte Versuch wurde mit einem Luftverhältnis $\lambda = 0{,}94$ durchgeführt. Es wurde ein ähnlicher Temperaturverlauf wie bei den vorherigen Versuchen gemessen. Zunächst verlief die Reaktion stabil, aber mit Reduzierung der Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ wurde eine Oszillation vom Typ II beobachtet. Zunächst wurden kleine Amplituden der Temperaturschwankungen gemessen, aber mit fallender Temperatur wurden sie größer, solange bis die Reaktion erlosch. Die Kalte Flamme Reaktion erlosch bei $\vartheta_{\text{Reaktor, mitte}} = 300$ °C.

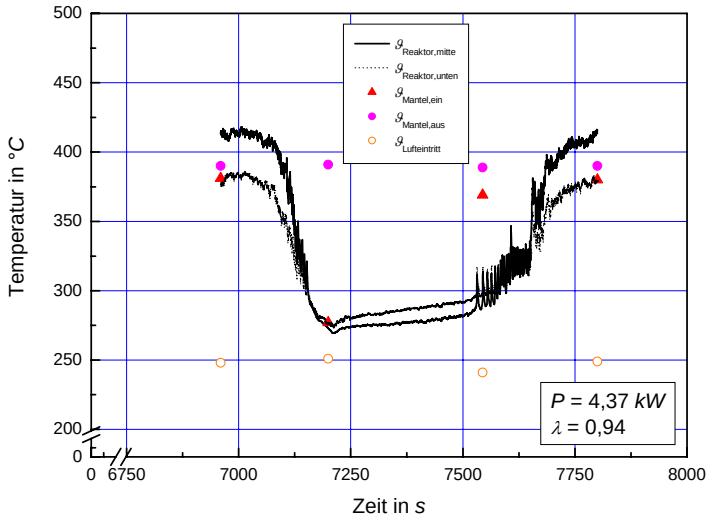


Abbildung 4.11: Temperaturverlauf im Reaktor in Abhängigkeit von der Zeit bei Variation der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 0{,}94$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 390$ °C

Bei Erhöhung der Lufteintrittstemperatur fand die erste Kalte Flamme Reaktion bei $\vartheta_{\text{Reaktor, mitte}} = 280$ °C statt, es wurde keine Zündung beobachtet. Am Anfang wurde eine Oszillation vom ersten Typ mit einer Frequenz von $f = 0{,}3$ Hz beobachtet und die Temperaturschwankung war relativ groß. Danach waren eine steigende Frequenz und eine Verringerung der Amplitude der Oszillation mit zunehmender Temperatur zu beobachten. Danach stabilisierte sich die Kalte Flamme Reaktion. Bei diesem Versuch gab es keine Zündung wie bei vorherigen Versuchen. Ein möglicher Grund hierfür könnte die Grosse Masse an inertem Stickstoff in der Luft gewesen sein

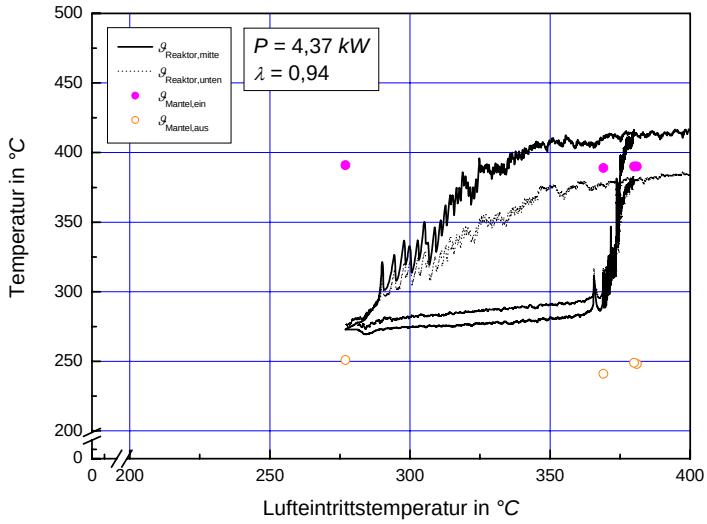


Abbildung 4.12: Temperaturverlauf im Reaktor in Abhängigkeit von der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 0{,}94$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 390$ °C

4.3 Einfluss der Isolationslufteintrittstemperaturen auf die Stabilisierung der Kalte Flamme Reaktion

Neben der Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ spielt die Isolationslufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ eine wichtige Rolle bei der Stabilisierung der Kalten Flammen Reaktion. Die Isolationsschicht dient zur Verringerung der thermischen Verluste vom Reaktor an die Umgebung. Die Versuchsergebnissen zeigten, dass die Isolationslufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ die Stabilität der Reaktion auch beeinflusst. Es ist klar geworden, dass ohne Isolationsluft keine Kalte Flamme Reaktion entstehen kann, weil die Wärmeverluste bzw. der Wärmestrom nach außen zu groß wurde. In diesem Fall würde zu wenig Energie zur Verfügung stehen, um diese Reaktion zu ermöglichen. Deswegen wurden die Versuche mit einem Mantellufteintrittstemperatur ab $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 380$ °C untersucht.

4.3.1. Versuchsdurchführung

Mit einer Leistung $P = 4{,}37$ kW wurden jeweils drei verschiedene Manteleintrittstemperaturen $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ bei Luftverhältnissen von $\lambda = 0{,}65$ und Lambda $\lambda = 0{,}80$ untersucht. Die Lufteintrittstemperatur wurde von dem hohen Niveau auf das untere Temperaturniveau reduziert und direkt nach Verlöschen der Reaktion wurde eine Erhöhung der Lufteintrittstemperatur ohne Abschaltung des Brennstoffs durchgeführt.

Versuch	$\dot{V}_{\text{Luft}}$	λ	$\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$	$\vartheta_{\text{Mantel, aus}}$
04	45 SLM	0,65	389 °C	250 °C
05	45 SLM	0,65	418 °C	256 °C
06	45 SLM	0,65	458 °C	278 °C
07	55 SLM	0,80	391 °C	250 °C
08	55 SLM	0,80	427 °C	267 °C
09	55 SLM	0,80	467 °C	281 °C

Tabelle 4.2: Parameterset für Bestimmung des Einflusses der Manteleintrittstemperaturen $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ auf die Stabilisierung der Kalte Flamme Reaktion, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 0,65 und λ = 0,80

4.3.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse des Versuchs mit $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 389 °C gleichen denen des vorherigen Versuches, wobei eine Zündung sowohl bei Erhöhung als auch bei Reduzierung der Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ zu beobachten ist. Das Zündphänomen bei Erhöhung der Lufteintrittstemperatur und bei Verringerung der Lufteintrittstemperatur konnte bei höherer Manteleintrittstemperaturen $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ nicht beobachtet werden.

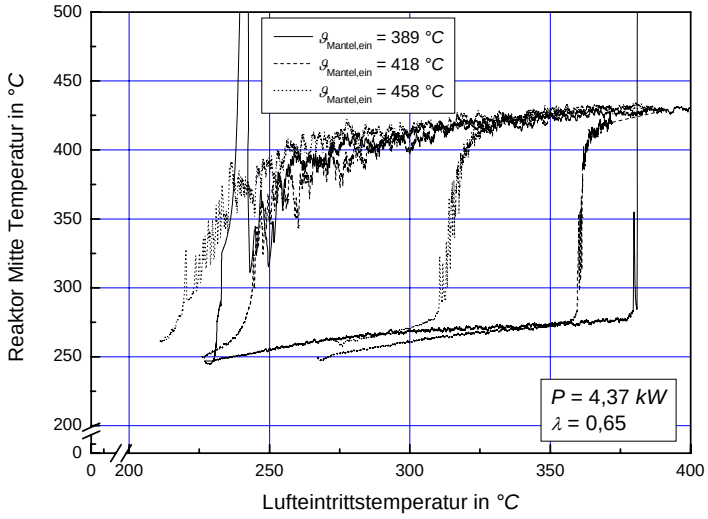


Abbildung 4.13: Temperaturverlauf Reaktor Mitte in Abhängigkeit der Reaktorlufteintrittstemperatur bei verschiedenen Manteleintrittstemperaturen, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 0,65

Mit einer Manteleintrittstemperatur von $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 418 °C wurde die Kalte Flamme Reaktion durch Reduzierung der Lufteintrittstemperatur erst bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ = 245 °C zum erlöschen gebracht. Bei einer Manteleintrittstemperatur von $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 458 °C erlosch sie bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ = 220 °C. Die Kalte Flamme Reaktion wurde ebenfalls beobachtet im Reaktor bei niedrigeren Reaktortemperaturen mit höherer Manteleintrittstemperatur. Diese können wir deutlich in Abbildung 4.13 sehen. Hier wurde angenommen, dass bei höheren

$\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ der Wärmeverlust des Reaktors geringer wurde und ein umgekehrter Wärmestrom von der Isolationsschicht in den Reaktor stattfinden könnte, wenn die Temperaturunterschiede relativ groß sind.

Bei Erhöhung der Lufteintrittstemperatur auf eine Isolationslufteintrittstemperatur von $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 418$ °C, entstand die Kalte Flamme Reaktion erst bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 360$ °C. Bei höherer Isolationslufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 458$ °C stabilisierte sie sich erst ab $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 313$ °C. Die Reaktion entstand bei höherer Manteleintrittstemperatur. Eine Verschiebung der Kurve zu den niedrigeren Temperaturenbereichen ist deutlich zu sehen. Dies bedeutet, dass bei niedrigerer Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ schon eine Reaktion entstehen kann. Ein geringerer Wärmeverlust wird hier als Hauptgrund gesehen.

Unter einem Luftverhältnis von $\lambda = 0{,}8$ und einer Isolationslufteintrittstemperatur von $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 391$ °C erlosch die Kalte Flamme Reaktion bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 275$ °C. Ein Verlöschen der Kalten Flamme Reaktion bei einer niedrigeren Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ fand bei dem Versuch mit einer Isolationslufteintritt $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 427$ °C statt. Die Reaktion erlischt bei einer Lufteintrittstemperatur von $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 253$ °C. Bei einer Manteleintrittstemperatur von $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 467$ °C verlosch die Reaktion erst bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 235$ °C.

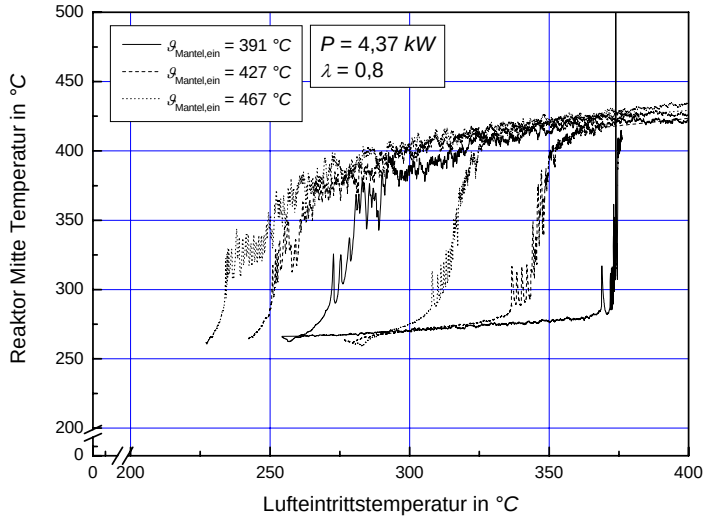


Abbildung 4.14: Temperaturverlauf im Reaktor Mitte in Abhängigkeit der Reaktorlufteintrittstemperatur bei unterschiedlichen Manteleintrittstemperaturen, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 0{,}80$

Beim Erhöhung der Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ mit einer Isolationslufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 391$ °C wurde eine Vorreaktion bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 372$ °C beobachtet. Eine Zündung trat bei höheren Temperaturen als der Lufteintrittstemperatur von $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 375$ °C auf. Die Kalte Flamme Reaktion fand schon bei höheren Isolationslufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 427$ °C und niedrigeren Lufteintrittstemperaturen als $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 335$ °C statt. Bei einer Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 344$ °C konnte Sie sich bereits stabilisieren. Bei Manteleintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 467$ °C wurde die Kalte Flamme bei einer Lufteintrittstemperatur ab

$\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 313$ °C gebildet. Wie in Abbildung 4.14 zu sehen, ist die Kurve mit zunehmender Manteleintrittstemperatur in den niedrigeren Temperaturbereich verschoben. Das bedeutet, dass sie schon bei niedrigerer Temperatur gebildet werden kann. Der Grund hierfür ist, dass die Verluste nach Außen bzw. an die Umgebung kleiner sind und daher weniger Wärmeenergie gebraucht wird, um die Reaktion zu starten.

4.4. Einfluss des Luftverhältnisses auf die Stabilisierung der Kalte Flamme Reaktion

Als weiterer Parameter wurde in dieser Arbeit das Luftverhältnis λ untersucht. Mit größerem Luftverhältnis verringert sich die Verweilzeit im Reaktor. Weiterhin bewirkt ein großer Luftverhältniswert, dass sich das Rektionsgebiet in Richtung Ausgang verschiebt. Es wurden verschiedene Luftverhältnisse von $\lambda = 0{,}8$ bis $\lambda = 1{,}52$ untersucht. Die Randbedingungen wurden entsprechend Tabelle 4.4 festgelegt. Die Leistung beträgt $P = 4{,}37$ kW bei einer Isolationslufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 390$ °C.

Versuch	$\dot{V}_{\text{Luft}}$	λ	$\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$	$\vartheta_{\text{Mantel, aus}}$
10	55 SLM	0,80	390 °C	250 °C
11	75 SLM	1,09	390 °C	245 °C
12	105 SLM	1,52	390 °C	252 °C
13	125 SLM	1,81	458 °C	275 °C

Tabelle 4.3: Parameterset für die Bestimmung des Einflusses des Luftverhältnis λ auf die Stabilisierung der Kalte Flamme Reaktion, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 390$ °C

Bei Verringerung der Lufteintrittstemperatur erlischt die Kalte Flamme Reaktion bei einem Lambda $\lambda = 0{,}80$ und $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 275$ °C. Bei einem Luftverhältnis von $\lambda = 1{,}09$ erlosch die Kalte Flamme Reaktion als die Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 280$ °C erreichte. Bei höheren Lambdawerten ging die Kalte Flamme Reaktion schon bei einer Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ aus. Bei einem Luftverhältnis von $\lambda = 1{,}52$ endete die Reaktion schon bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 290$ °C.

Die Steigung der Hysteresekurve nimmt mit abnehmendem Luftverhältnis zu. Bei Verringerung der Temperatur wurde das deutlich dargestellt werden. Der plötzliche Anstieg der Reaktortemperatur bei einem niedrigeren Luftverhältnis λ entstand durch die exotherme Energie, die die Kalte Flamme Reaktion abgegeben hat. Dieser Zustand stellte sich ein, weil mit größerem Luftverhältnis λ mehr vorgewärmte Luft bzw. Wärmeenergie in den Reaktor eingebracht wurde. Der Anteil der abgegebenen Energie der Kalte Flamme Reaktion ist im Verhältnis zur eingetragenen Wärmeenergie durch den Luftstrom relativ gering. Andererseits muss berücksichtigt werden, dass auch mehr inerter Stickstoff in der Reaktion erhitzt werden muss bei einem höheren Luftverhältnis.

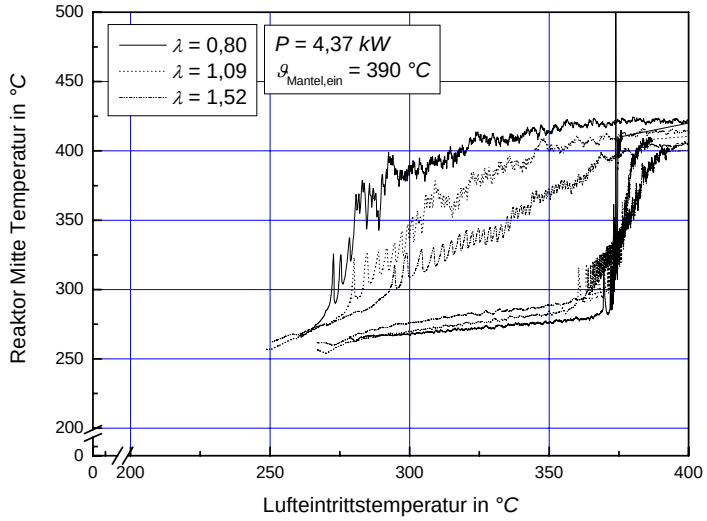


Abbildung 4.15: Temperaturverlauf im Reaktor Mitte in Abhängigkeit der Reaktorlufteintrittstemperatur bei Variation des Luftverhältnis, ermittelt bei P = 4,37 kW; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 390 °C

Bei einem Luftverhältnis von $\lambda = 1{,}52$ stabilisierten sich Kalte Flammen ab $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 375$ °C. Bei niedrigeren Temperaturen wurden Oszillationen vom Typ II beobachtet. Im Vergleich zu niedrigeren Luftverhältnissen wurde eine längere Reaktionszone beobachtet (siehe Abbildung 4.5).

Bei Erhöhung der Lufteintrittstemperatur wurde eine Vorreaktion bei einem Luftverhältnis von $\lambda = 0{,}80$ bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 372$ °C beobachtet, danach fand eine Zündung bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 375$ °C statt. Hier wurde ein umgekehrter Trend beobachtet, da die Kalte Flamme mit höherem Lambda bei niedrigerer Lufteintrittstemperatur entstand. Dies ist damit zu erklären, dass mehr Wärmeenergie vom Luftvolumenstrom in den Reaktor eingebracht wurde. Aber hier wurden keine Zündphänomene beobachtet. Ein Grund dafür ist die Anwesenheit von inertem Stickstoff in der Luft, die die Kalte Flamme Reaktion dämpfte. Bei der Erhöhung der Lufteintrittstemperatur wurden am Anfang Oszillationen vom Typ I beobachtet.

Abschließend wird ein Fall betrachtet, in dem die Hysteresekurve vollständig verschwand. Bei Versuchen mit einem Luftverhältnis von $\lambda = 1{,}81$ und einer Manteleintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 458$ °C wurde eine Leistung von $P = 4{,}37$ kW wie bei den anderen Versuchen eingestellt. Sowohl bei Reduzierung als auch bei Erhöhung der Lufteintrittstemperatur erlosch und entstand die Kalte Flamme Reaktion bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 325$ °C. Die Steigerung der Lufteintrittstemperatur war geringer als die Steigerung der Reaktortemperaturen. Die Reaktortemperatur erhöhte sich nahezu proportional zu der Erhöhung der Reaktorlufteintrittstemperatur. Das bedeutet, dass die abgegebene Wärme der Kalten Flamme Reaktion nur einen geringen Beitrag zur Erhöhung Reaktortemperatur beiträgt.

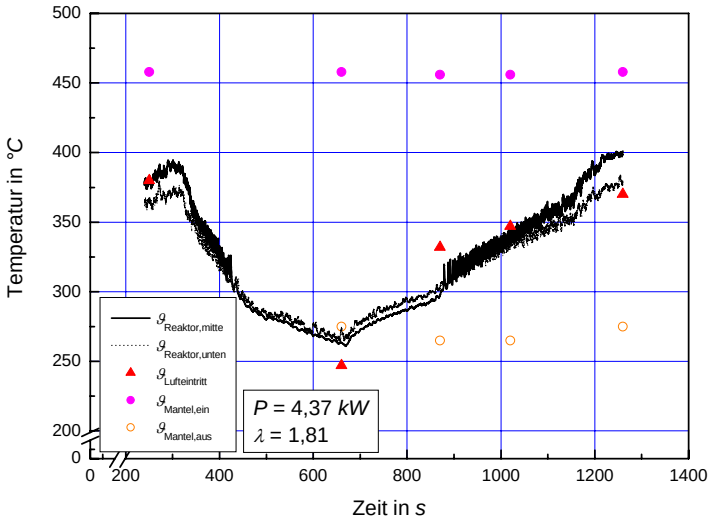


Abbildung 4.16: Temperaturverlauf im Reaktor in Abhängigkeit von der Zeit bei Variation der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 1{,}81$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 458$ °C

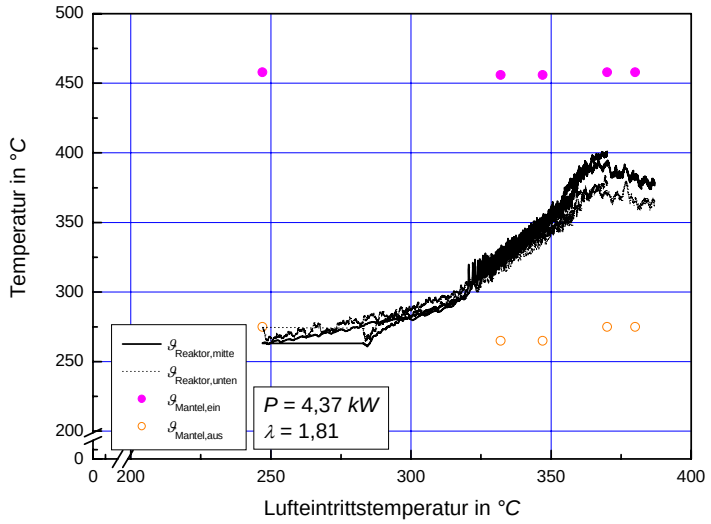


Abbildung 4.17: Temperaturverlauf im Reaktor in Abhängigkeit von der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 1{,}81$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 458$ °C

4.5. Initiierungsgrenze der Kalte Flamme Reaktion

Es wurde schon besprochen, dass die Kalte Flamme Reaktion von der Reaktorlufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ und dem Luftverhältnis λ abhängig ist. Hier wurde die Initiierungsgrenze der Kalten Flamme in dem zu untersuchenden Bereich dieser Arbeit bestimmt. Mit einer Leistung von $P = 4{,}37$ kW und einer stationären Manteleintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 358$ °C und Mantelaustrittstemperatur $\vartheta_{\text{Mantel, aus}} = 224$ °C wurden die Versuche gefahren. Erst wurde die vorgewärmte Luft in

den Reaktor geleitet bis ein stationärer Zustand der Reaktortemperatur erreicht wurde. Danach wurde der Brennstoff in dem vorgewärmten Reaktor eingeleitet. Hier wurde beobachtet ob eine Kalte Flamme Reaktion stattfindet oder nicht.

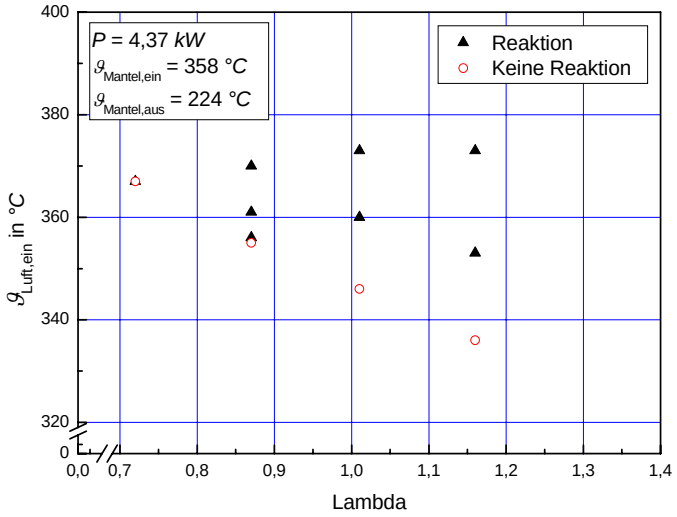


Abbildung 4.18: Initiierungsgrenze der Kalte Flamme Reaktion bei Variation des Luftverhältnis, ermittelt bei P = 4,37 kW; $\vartheta_{Mantel,\,ein}$ = 358 °C; $\vartheta_{Mantel,\,aus}$ = 224 °C

In Abbildung 4.18 wird deutlich, dass es eine Grenze für die Entstehung der Kalte Flamme Reaktion gibt. Oberhalb dieser Grenze findet die Kalte Flamme Reaktion statt, unterhalb wurde keine Reaktion beobachtet.

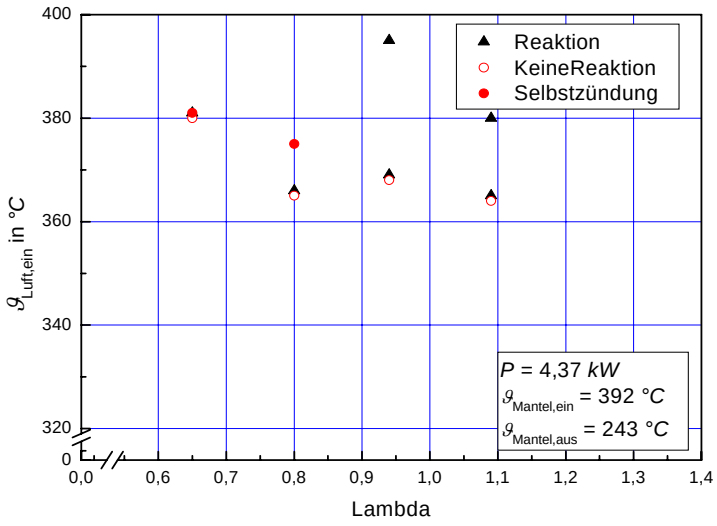


Abbildung 4.19: Initiierungsgrenze der Kalte Flamme Reaktion bei Variation des Luftverhältnis, ermittelt bei P = 4,37 kW; $\vartheta_{Mantel,\,ein}$ = 392 °C; $\vartheta_{Mantel,\,aus}$ = 243 °C

Die Ergebnisse der Versuche mit kontinuierlicher Öleindüsung sind in Abbildung 4.19 dargestellt. Es kann eine Verschiebung der Bildung der Kalten Flamme Reaktion hin zu niedrigen Temperaturen beobachtet werden, weil die zugeführte Wärme auch den flüssigen Brennstoff verdampft. Aus dem Diagramm wird deutlich, dass ab einem Luftverhältnis von $\lambda = 0{,}8$ fast ein lineares Verhalten vorliegt, d.h. eine Mindesteintrittstemperatur oder Initiierungsenergie wird benötigt, um eine Kalte Flamme Reaktion zu starten. Die schwarze Dreieck Zeichen direkt darüber zeigen die Initiierung der Kalte Flamme Reaktion.

4.6. Einfluss der Strömungsgeometrie auf die Stabilität der Kalte Flamme Reaktion

4.6.1. Versuchsdurchführung

Als weiterer Reaktorparameter wurde eine Veränderung der Strömungsgeometrie durch die Verwendung eines Rezirkulationsrohres durchgeführt (siehe Abbildung 4.20). Die Leistung wurde bei $P = 4{,}37$ kW gehalten, die Isolationslufteintrittstemperatur betrug $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 366$ °C. Eine Temperaturdifferenz von $\Delta T = 100$ K in der Isolationsschicht zwischen dem Eintritt und dem Austritt wurde gemessen. Diese war auch stabil während des Herunterfahrens. Unter diesen Bedingungen wurden zunächst Vorversuche durchgeführt. Es wurde keine Kalte Flamme Reaktion in dem Reaktor bei einem Luftverhältnis von $\lambda = 0{,}65$ bis $\lambda = 0{,}94$ beobachtet. Erst ab einem Luftverhältnis von $\lambda = 1{,}09$ wurde eine Kalte Flamme Reaktion beobachtet. Auf Basis dieser Erkenntnis wurden die weiteren Versuche mit einem Luftverhältnis ab $\lambda = 1{,}23$ untersucht.

Die Versuche wurden bei einem Luftverhältnis von $\lambda = 1{,}23$ und $\lambda = 1{,}52$ gefahren. Zunächst wurde ein stationärer Betriebspunkt eingestellt, dann wurde die Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ reduziert, analog zur Vorgehensweise der vorherigen Versuche. Direkt nach dem Erlöschen der Reaktion wurde die Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ erhöht.

4.6.2. Ergebnis

Bei dem Versuch mit dem Luftverhältnis von $\lambda = 1{,}23$ wurde ein stationärer Betriebspunkt bei einer Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 389$ °C und eine Isolationseintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 370$ °C als Anfang gewählt. Hier wurden drei Reaktionszonen, entsprechend Reaktionszone 1, Reaktionszone 2 und Reaktionszone 3 beobachtet (siehe Abbildung 4.20). Die dritte Reaktionszone wurde nicht betrachtet, weil sie keine parametrischen Abhängigkeiten aufweist. Im Verlauf der Lufteintrittstemperaturabsenkung erlosch die Reaktion in Bereich 1 bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 235$ °C, Bei niedriger $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ erlosch auch die zweite.

Beim Erhöhung der Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ wurde ab $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 378$ °C eine Kalte Flamme Reaktion in dem zweiten Gebiet beobachtet. Bei höherer Lufteintrittstemperatur

$\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ konnte die Reaktion auch im Gebiet 1 beobachtet werden. Bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ = 385 °C wurde eine Oszillation des zweiten Typs beobachtet. Bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ = 386 °C wurde keine Oszillation mehr im Reaktor beobachtet.

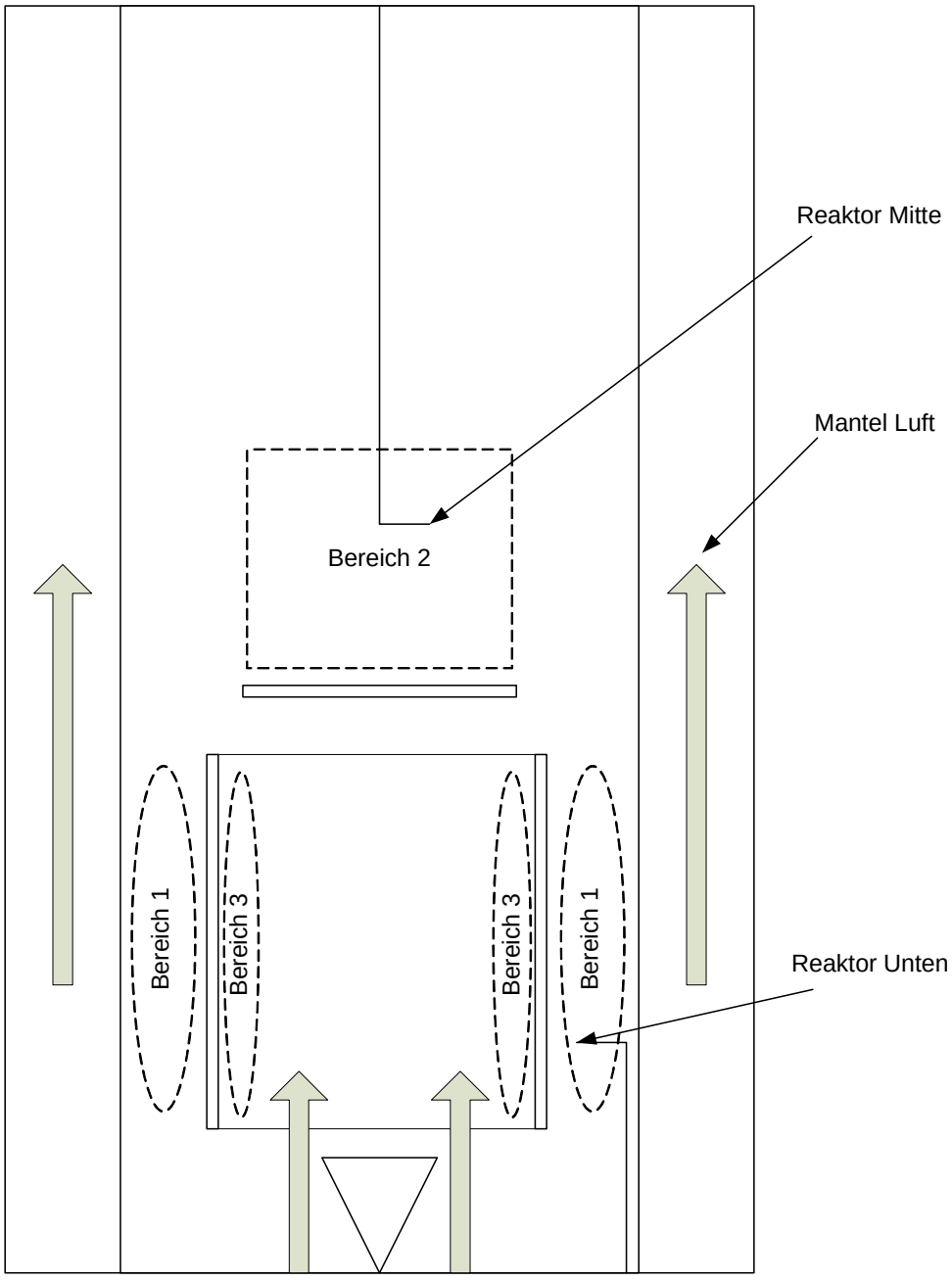


Abbildung 4.20: Verteilung der Kalte Flamme Reaktion Bereiche in dem Reaktor mit Rezirkulationsrohr

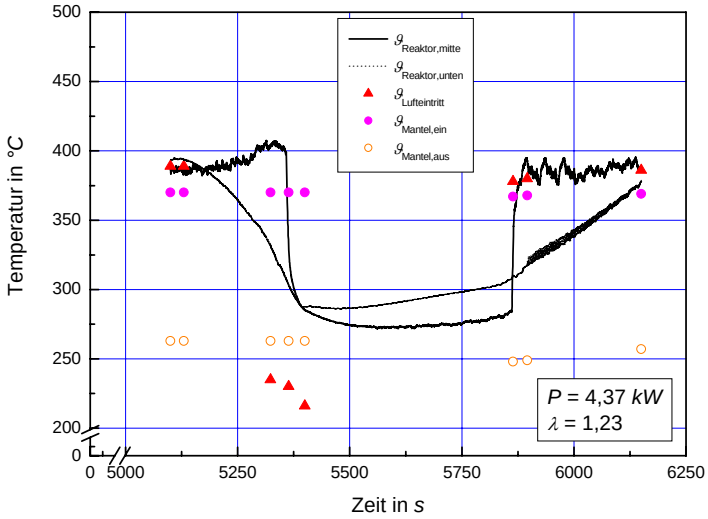


Abbildung 4.21: Temperaturverlauf im Reaktor mit Rezirkulationsrohr in Abhängigkeit von der Zeit bei Variation der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,23; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 370 °C

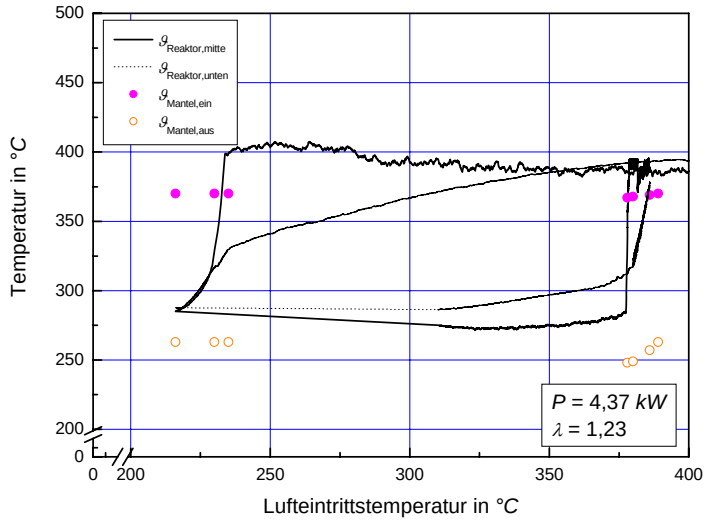


Abbildung 4.22: Temperaturverlauf im Reaktor mit Rezirkulationsrohr in Abhängigkeit von der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,23; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 370 °C

Bei Reduzierung der Lufteintrittstemperatur bei dem Versuch mit einem Luftverhältnis von λ = 1,52 erlosch der erste Reaktionsbereich bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ = 245 °C. Bereich 2 erlosch bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ = 236 °C. Die Manteleintrittstemperatur ist konstant bei $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 370 °C gehalten worden.

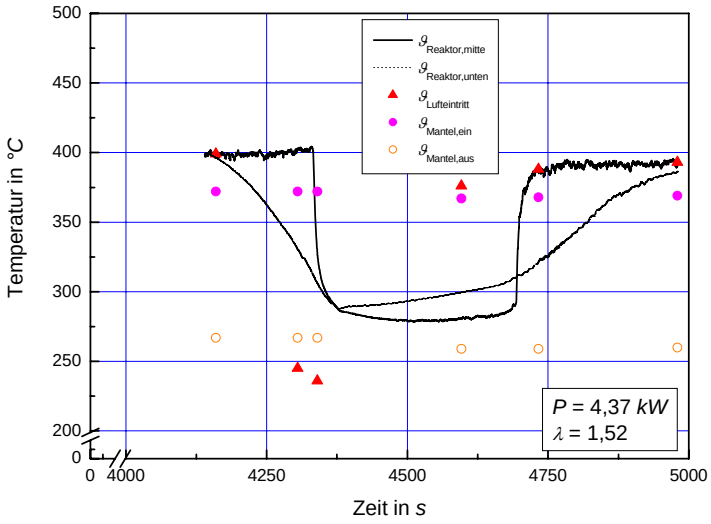


Abbildung 4.23: Temperaturverlauf im Reaktor mit Rezirkulationsrohr in Abhängigkeit von der Zeit bei Variation der Reaktorlufteintrittstemperatur Variation, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 1{,}52$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 370$ °C

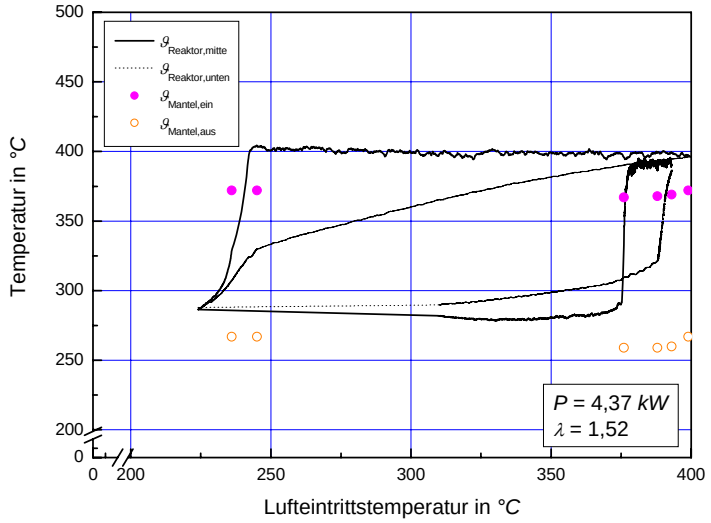


Abbildung 4.24: Temperaturverlauf im Reaktor mit Rezirkulationsrohr in Abhängigkeit der Reaktorluft-eintrittstemperatur, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 1{,}52$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 370$ °C

Bei Erhöhung der Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$, wurde die Kalte Flamme Reaktion erst bei $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 376$ °C in dem zweiten Gebiet beobachtet. Ähnlich wie bei dem vorherigen Versuch mit einem Luftverhältnis von $\lambda = 1{,}23$, wurde hier die Kalte Flamme ab $\vartheta_{\text{Luft, ein}} = 388$ °C in dem ersten Bereich gebildet. Bei diesem Versuch entstanden keine Oszillationen.

Prinzipiell konnten in dem Versuch mit dem Rezirkulationsrohr stabilere Kalte Flamme

Reaktionen erreicht werden als mit konventionellen (Versuche ohne Rezirkulationsrohr). Bei dieser Variation waren geringere Oszillationen zu beobachten. Die zweite Reaktionszone war stabil. Das wurde anhand der Reaktortemperatur in Abbildung 4.22 und Abbildung 4.24 gezeigt. Die plötzliche Temperaturveränderung als Zeichen der Bildung oder des Erliegens der Reaktion wurde hier gemessen. Hinter der Platte in dem Rezirkulationsrohr stabilisierte sich die Flamme. Der Grund dafür ist, dass die Verweilzeit hinter die Platte groß genug ist. Die höhere Verweilzeit kann auf die Bildung einer anderen Strömungsart bzw. einer turbulenten Wirbelströmung zurückgeführt werden.

Andererseits wurde deutlich, dass die Kalte Flamme Reaktion immer erst im Bereich 2 gebildet wurde. Mit zunehmender Lufteintrittstemperatur wurde eine andere Reaktionszone im ersten Bereich beobachtet. Bei höherer Temperatur stabilisierten sich die beiden Zonen.

5. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Stabilisierung der Kalten Flamme Reaktion untersucht. Verschiedene Eingangsparameter wurden variiert und untersucht, um deren Einfluss auf die Stabilisierung der Reaktion zu ermitteln.

Insbesondere wurden folgende Parameter variiert:

Parameter	Mindestwert	Höchstwert
$\vartheta_{\text{Luft, ein}}$	200 °C	400 °C
$\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$	389 °C	467 °C
$\dot{V}_{\text{Luft}}$	45 SLM / 0,82 L/s	125 SLM / 2,27 L/s

Tabelle 5.1: Parameterset dieser Arbeit zur Untersuchung der Stabilisierung der Kalte Flamme Reaktion, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW

Alle Versuche wurden bei einer Leistung von 4,37 kW gefahren. Mit dieser Einstellung wurde eine entsprechende Lambda Variation von $\lambda = 0{,}65$ bis $\lambda = 1{,}81$ durchgeführt.

Zunächst wurde ein stationärer Zustand mit einer stabilen Reaktionszone im Reaktor gesucht. Danach wurde von diesem Betriebspunkt die Lufteintrittstemperatur bis zum Erlöschen der Reaktion reduziert. Anschließend wurde die Lufteintrittstemperatur bis zum erneuten Einsetzen der Reaktion erhöht. Hierbei wurde die Temperatur kontinuierlich verändert, so dass das Gesamtsystem zu keinem Zeitpunkt als stationäres System betrachtet werden konnte. Wesentlich sind die Änderungen der Randbedingungen zu jedem Zeitpunkt geringer als die Änderungen, welche durch das nichtlineare Verhalten der Reaktion hervorgerufen werden. Von den gespeicherten Temperaturmessdateien wurde ein Reaktortemperaturprofil erstellt.

Die Kalte Flamme Reaktion ist eine exotherme Reaktion, die Wärmeenergie abgibt. Zur Beschreibung der Veränderung der Verhältnisse wurde die Darstellung in Form einer Hysteresekurve des Temperaturprofils gewählt. Mit höherer Manteleintrittstemperatur wurde die Hysteresekurve in den niedrigeren Temperaturbereich verschoben, weil es weniger Wärmeverluste bzw. Wärmestrom von dem Reaktor in die Mantelschicht gab. Bei höherem Luftverhältnis flachte die Steigung der Hysteresekurve ab. Dieser Zustand trat ein, weil mit größerem Luftverhältnis mehr vorgewärmte Luft bzw. Wärmeenergie in den Reaktor eingebracht wurde. Dadurch verringerte sich der Einfluss, der abgegebenen Energie durch die Kalte Flamme Reaktion im Verhältnis zum Energieeintrag durch die Luft. Andererseits musste auch mehr inerter Stickstoff durch das höhere Luftverhältnis in der Reaktion erhitzt werden.

Bei den Versuchen wurden auch Oszillationen beobachtet. Es gab zwei verschiedene Arten von Oszillation, die im Kapitel 4.1 unter Abbildung 4.4 und 4.5 beschrieben sind. Vor Erlöschen der Kalten Flamme Reaktion wurde immer der zweite Typ der Oszillation beobachtet. Vor der Bildung der Kalten Flamme Reaktion wurde der erste Typ der Oszillation beobachtet. Der erste Typ ist charakterisiert durch seine hohe Frequenz und

der geringen Amplitude am Anfang. Mit verringerter Temperatur nehmen die Frequenz ab und die Amplitude zu. Der zweite Typ weist einen umgekehrten Verlauf auf, da am Anfang eine langsame Frequenz und eine hohe Amplitude herrschen, aber mit zunehmender Temperatur die Frequenz und die Amplitude abnehmen.

Ein weiteres Phänomen, welches hier beobachtet wurde, ist der Zündungsvorgang. Bei niedrigerem Luftverhältnis wurde eine Zündung beobachtet. Eine Zündung kann sowohl bei in Abhängigkeit von der Lufteintrittstemperatur als von der Erhöhung der Lufteintrittstemperatur entstehen. Grund für die Selbstzündung bei Verringerung der Lufteintrittstemperatur und somit der Herabsetzung der Reaktortemperatur sind die höheren Verweilzeiten im Reaktor. Aufgrund des negativen Temperaturkoeffizienten stieg die Wärmefreisetzung an, was ebenfalls zu einer Selbstzündung führen kann. Bei Erhöhung der Lufteintrittstemperatur entstand die Zündung aufgrund des plötzlichen Anstiegs der verfügbaren Wärmeenergie, so dass das Energieniveau direkt an das Zündungsniveau gekommen ist. Hier summiert sich die Enthalpie aus der Kalten Flamme Reaktion und des Luftstroms. Bei höherem Luftverhältnis wurde kein Zündphänomen beobachtet. Hier hat die abgesetzte Wärme der Kalten Flamme Reaktion keine große Einfluss mehr für die Reaktortemperatur, weil es eine Verschiebung bzw. eine Größenänderung der Wärmeanteile gibt.

Bei den Versuchen zur Variation der Stömungsgeometrie wurden weitere Phänomene beobachtet. Mit dem Rezirkulationsrohr bildete sich der zweite Bereich (siehe Abbildung 4.18) stabiler aus als bei konventionellen (anderen Versuch ohne Rezirkulationsrohr). Der Grund dafür ist, dass sich die Reaktion hinter der Platte von dem Rezirkulationsrohr (Bereich 2 in Abbildung 4.20) stabilisiert. Dieser Zustand erhöht lokal die Verweilzeit zur Bildung der Reaktion. Andererseits wurde auch deutlich, dass die Kalte Flamme Reaktion sich immer erst im zweiten Gebiet hinter der Platte bildete. Mit zunehmender Temperatur erfolgte die Reaktion im ersten Bereich in der Nähe des Rezirkulationsrohrs (sieheAbbildung 4.18).

Literaturverzeichnis

[Agnew 65] Agnew, W. G.; Agnew, T.J. „Composition Profiles of the Diethyl Ether-Air Two-Stage Reaction Stabilized in a Flat-Flame Burner", Tenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, S. 123-138, 1965.

[Brockha. 06] Brockhaus Online Enzyklopädie, www.brockhaus.de

[Coffee 79] Coffee, R.D. „Cool Flames and Auto ignition: Two Oxidation Processes. In: Loss Prevention", American Institut of Chemical Engineers, Band 13, S. 74-82, 1979

[Davy 17] Davy, Sir Humphry. „Some Researches on Flame", Cobham-hall, Kent, S. 45-76, 1817

[DIN 51603] DIN 51603-1, „Flüssige Brennstoffe – Heizöle – Teil 1: Heizöl EL; Mindestanforderungen", Deutsche Norm, April 2003

[DIN 590] DIN EN 590, „Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Dieselkraftstoffe – Mindestanforderungen und Prüfverfahren", Deutsche Norm, Februar 2000

[Edenho. 05] Edenhofer, R.; Diarra, D.; Grote, M.; Lucka, K.; Köhne, H. „Selbstzündverhalten von Diesel-Luft-Gemischen unter atmosphärischem Druck", 22. Deutscher Flammentag Verbrennung und Feuerungen, Braunschweig, 21-22. September 2005

[Fish 68] Fish, A. „Kalte Flammen von Kohlenwasserstoffen", Angewandte Chemie, 80. Jahrgang, Nr. 2, S. 53-88, 1968

[Gray 81] Gray, P.; Griffiths, J. F.; Hasko, S.M.; Lignola, P.G. „Oscillatory ignitions and cool flames accompanying the non-isothermal oxidation in a well stirred flow reactor", Proc. R. Soc. Lond., A 374, S. 313-339, 1981

[Klein 02] Klein, R., „Auswahlkriterien für Zerstäuberkonzepte in „Kalte Flammen" Verdampfern", Diplomarbeit, Öl-Wärme-Institut gGmbH, 2002

[Lignola 88] Lignola, P. G.; Di Maio, F. P.; Marzocchella, A.; Mercogliano, R.; „JSFR Combustion Processes of n-Heptane and Isooctane", 21st Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, S. 1625-1633, 1988

[Lucka 99] Lucka, K.; Köhne, H.: *Usage of cold flames for the evaporation of liquid fuels,* Fifth International Conference of Technologies and Combustion for a clean Environment, Lissabon, Portugal, 1999

[Lucka 00] Lucka, K. und Köhne, H. „Moderne Gemischaufbereitung für flüssige Brennstoffe", 3. AC-Kolloquium, 2000, Seiten 35–42, ISBN: 3-8265-7904-6

[Pilling 97] Pilling, M.J. „Low-Temperature Combustion and Autoignition“, Elsevier Science, Vol. 35, Amsterdam 1997, ISBN: 0-444-82485-5

[Warnatz 96] Warnatz, J.; Maas, U.; Dibble, R.W. „Verbrennung“, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1997, ISBN: 3-540-61546-6

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Idealisiertes *p*,*T* - Explosionsdiagramm von Kohlenstoff – Oxidator - Gemischen [Warnatz 96]

Abbildung 2.2: Differentielle volumenbezogene Wärmefreisetzung für $0{,}7 \leq \lambda \leq 1{,}2$; kleines Bild: Maximal-Wert der Wärmefreisetzung in Abhängigkeit des Luftverhältnisses [Edenho. 05]

Abbildung 2.3: Übersicht über das Temperatur-Zeit-Verhalten der verschiedenen Oxidations-Phänomenen stöchiometrischer n-Heptan & iso-Oktan – Luft – Gemische bei der Niedertemperatur-Oxidation in einem JSFR; τ_V = 0,4 s [Lignola 88]

Abbildung 2.4: Varianten der Vormischtechnik flüssiger Brennstoffe [Lucka 00]

Abbildung 3.1: Kalte Flammen Verdampfer

Abbildung 3.2: Verfahrensfließbild des Kalte Flamme Verdampfers

Abbildung 3.3: Temperaturmessstellen in dem Reaktor

Abbildung 3.4: Position des Rezirkulationsrohres in dem Reaktor

Abbildung 4.1: Theoretische Verweilzeit in dem Reaktor in Abhängigkeit des Luftverhältnisses

Abbildung 4.2: Theoretische Verweilzeit in dem Reaktor in Abhängigkeit der Lufteintrittstemperatur

Abbildung 4.3: Verteilung der Kalte Flamme Reaktion Gebiet in dem konventionellen Reaktor

Abbildung 4.4: Erster Typ der oszillierenden Kalten Flamme Reaktionszonen in dem Reaktor

Abbildung 4.5: Zweiter Typ der oszillierenden Kalten Flamme Reaktionszonen in dem Reaktor

Abbildung 4.6: Reaktortemperatur von beweglicher stabiler kalte Flamme Zonen in Abhängigkeit der Zeit

Abbildung 4.7: Temperaturverlauf im Reaktor in Abhängigkeit von der Zeit bei Variation der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 0,65; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 389 °C

Abbildung 4.8: Temperaturverlauf im Reaktor in Abhängigkeit der Reaktorluft-eintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 0,65; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 389 °C

Abbildung 4.9: Temperaturverlauf im Reaktor in Abhängigkeit von der Zeit bei Variation der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 0,80; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 391 °C

Abbildung 4.10: Temperaturverlauf im Reaktor in Abhängigkeit der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 0,80; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 391 °C

Abbildung 4.11: Temperaturverlauf im Reaktor in Abhängigkeit von der Zeit bei Variation der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 0,94; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 390 °C

Abbildung 4.12: Temperaturverlauf im Reaktor in Abhängigkeit von der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 0,94; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 390 °C

Abbildung 4.14: Temperaturverlauf im Reaktor Mitte in Abhängigkeit der Reaktorluft-eintrittstemperatur bei unterschiedlichen Manteleintrittstemperaturen, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 0,80

Abbildung 4.15: Temperaturverlauf im Reaktor Mitte in Abhängigkeit der Reaktorluft-eintrittstemperatur bei Variation des Luftverhältnis, ermittelt bei P = 4,37 kW; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 390 °C

Abbildung 4.16: Temperaturverlauf im Reaktor in Abhängigkeit von der Zeit bei Variation der Reaktorluft-eintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,81; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 458 °C

Abbildung 4.17: Temperaturverlauf im Reaktor in Abhängigkeit von der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,81; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 458 °C

Abbildung 4.18: Initiierungsgrenze der Kalte Flamme Reaktion bei Variation des Luftverhältnis, ermittelt bei P = 4,37 kW; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 358 °C; $\vartheta_{\text{Mantel, aus}}$ = 224 °C

Abbildung 4.19: Initiierungsgrenze der Kalte Flamme Reaktion bei Variation des Luftverhältnis, ermittelt bei P = 4,37 kW; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 392 °C; $\vartheta_{\text{Mantel, aus}}$ = 243 °C

Abbildung 4.20: Verteilung der Kalte Flamme Reaktion Bereiche in dem Reaktor mit Rezirkulationsrohr

Abbildung 4.21: Temperaturverlauf im Reaktor mit Rezirkulationsrohr in Abhängigkeit von der Zeit bei Variation der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,23; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 370 °C

Abbildung 4.22: Temperaturverlauf im Reaktor mit Rezirkulationsrohr in Abhängigkeit von der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,23; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 370 °C

Abbildung 4.23: Temperaturverlauf im Reaktor mit Rezirkulationsrohr in Abhängigkeit von der Zeit bei Variation der Reaktorlufteintrittstemperatur Variation, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,52; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 370 °C

Abbildung 4.24: Temperaturverlauf im Reaktor mit Rezirkulationsrohr in Abhängigkeit der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,52; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 370 °C

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Parameterset für Bestimmung der Einfluss der Lufteintrittstemperaturen $\vartheta_{\text{Luft, ein}}$ auf die Stabilisierung der Kalte Flamme Reaktion, ermittelt bei P = 4,37 kW

Tabelle 4.2: Parameterset für Bestimmung der Einfluss der Manteleintrittstemperaturen $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ auf die Stabilisierung der Kalte Flamme Reaktion, ermittelt bei P = 4,37 kW;λ = 0,65 und λ = 0,80

Tabelle 4.3: Parameterset für Bestimmung des Einflusses der Luftverhältnis λ auf die Stabilisierung der Kalte Flamme Reaktion, ermittelt bei P = 4,37 kW; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 390 °C

Tabelle 5.1: Parameterset dieser Arbeit zur Untersuchung der Stabilisierung der Kalte Flamme Reaktion, ermittelt bei P = 4,37 kW

Abkürzungen

EL	Extra Leicht
HEL	Heizöl Extra Leicht
JSFR	Rührreaktor (Jet-stirred Flow Reactor)
KF	Kalte Flamme
NTC	Negatives Temperaturgradient (Negative Temperature Coefficient)
max.	maximal
MFC	Mass Flow Controller
min.	minimal
SLM	Standard Liter pro Minute

Physikalische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
d	m	Durchmesser
f	1/s	Frequenz
$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
p	Pa	Druck
P	kW	Leistung
$\dot{R}$	kW/m^3	Freigesetzter volumenbezogener Wärmestrom
T	K	Temperatur
ΔT	K	Temperaturdifferenz
$\dot{V}$	m^3/s	Volumenstrom
ϑ	°C	Temperatur
$\Delta\vartheta$	K	Temperaturdifferenz
λ	--	Luftverhältnis
τ	--	charakteristische Zeit

Graphischer Anhang

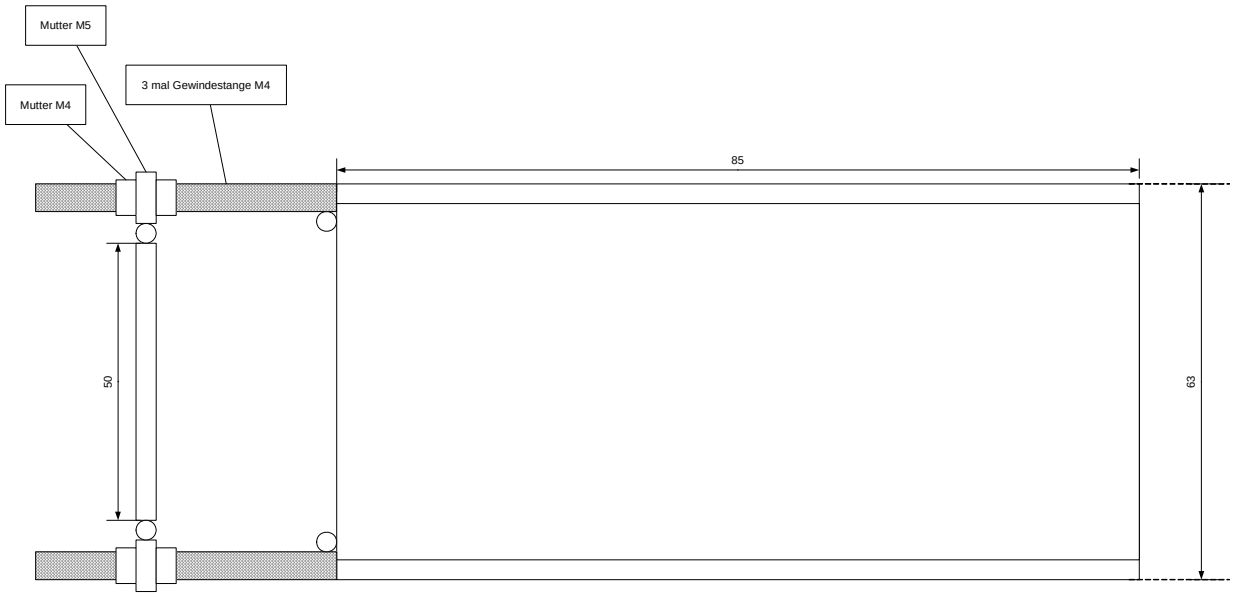


Abbildung A.1: Rezirkulationsrohr

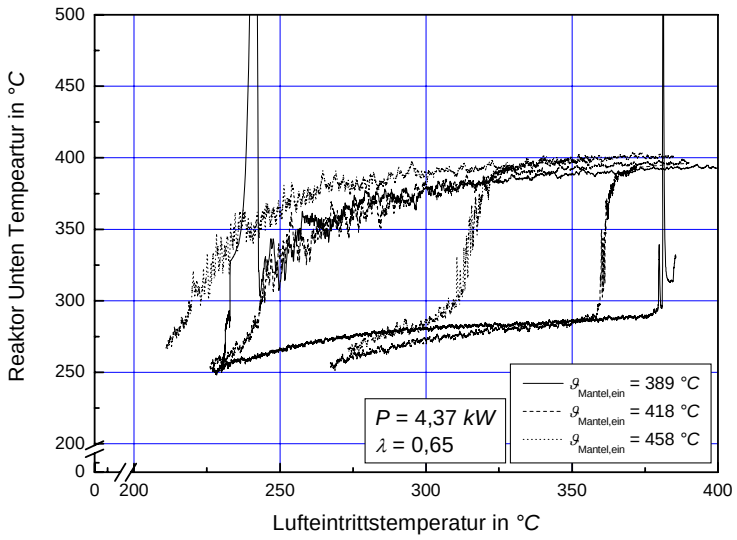


Abbildung A.2: Reaktor Unten Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Reaktorlufteintrittstemperatur bei verschiedenen Manteleintrittstemperaturen, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 0{,}65$

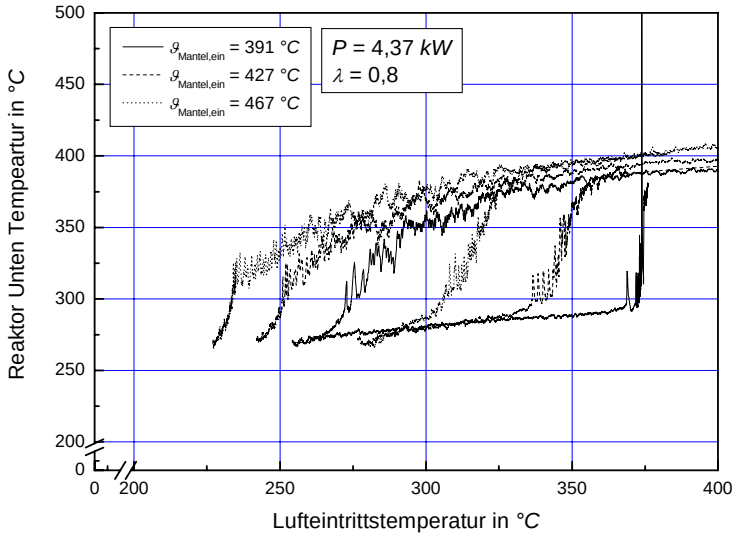


Abbildung A.3: Reaktor Unten Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Reaktorluft-eintrittstemperatur bei verschiedenen Manteleintrittstemperaturen, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 0,80

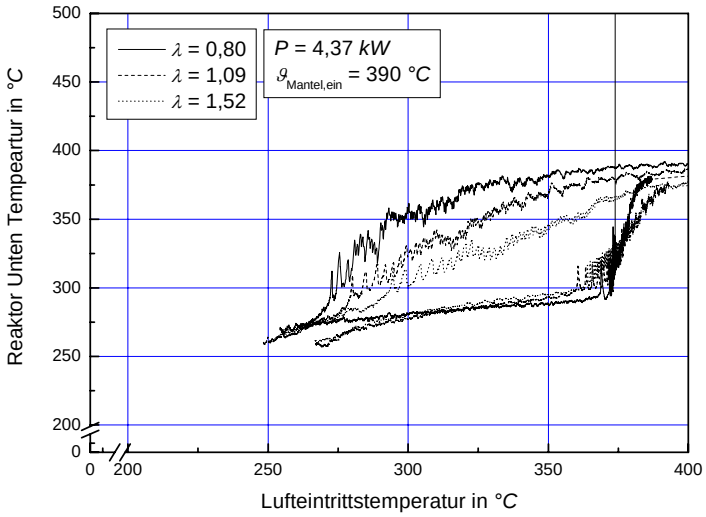


Abbildung A.4: Reaktor Unten Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Reaktorluft-eintrittstemperatur bei Luftverhältnis Variation, ermittelt bei P = 4,37 kW; $\vartheta_{Mantel,\ ein}$ = 390 °C

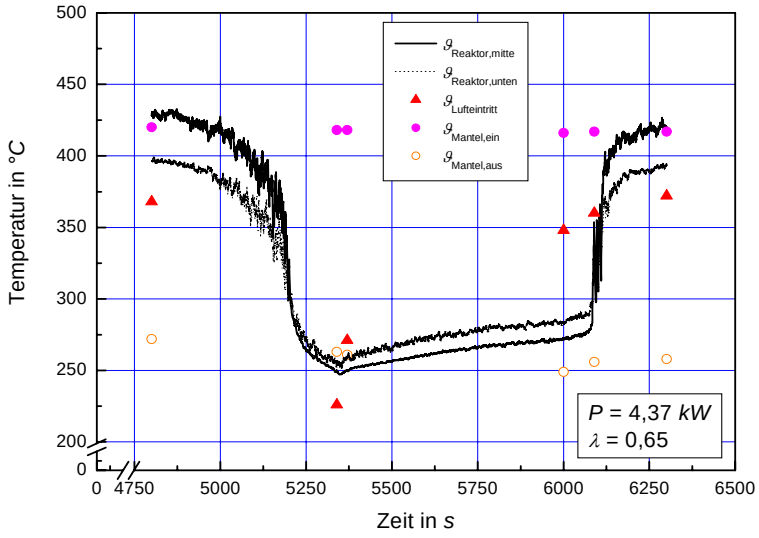


Abbildung A.5: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Zeit bei Reaktorluft-eintrittstemperatur Variation, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 0{,}65$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 418$ °C

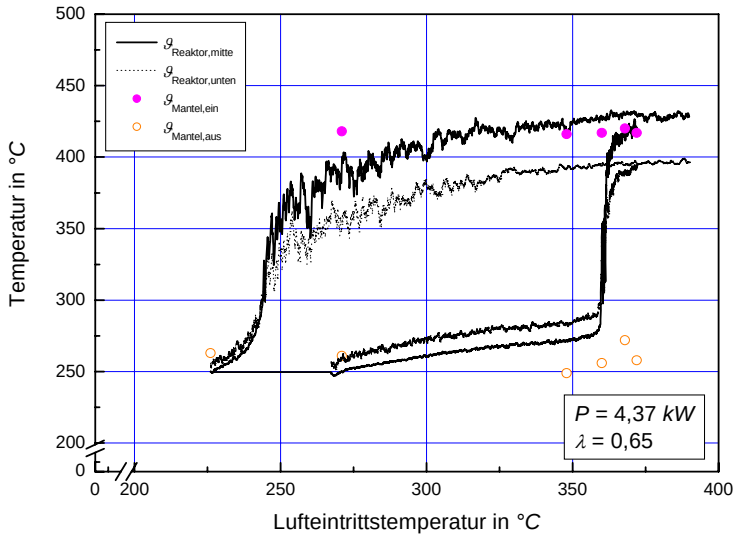


Abbildung A.6: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 0{,}65$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 418$ °C

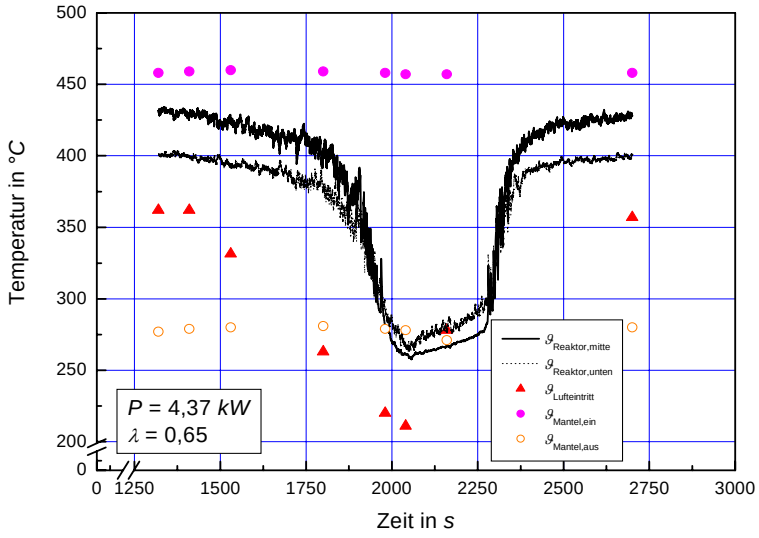


Abbildung A.7: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Zeit bei Reaktorluft-eintrittstemperatur Variation, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 0{,}65$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 458$ °C

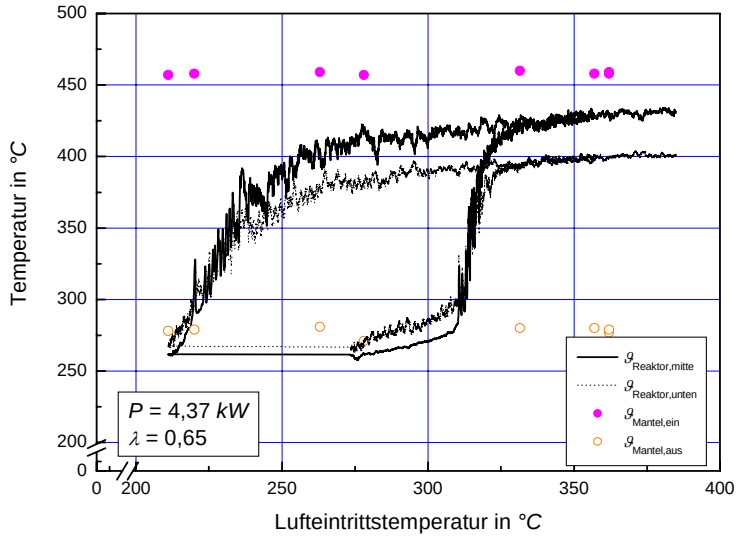


Abbildung A.8: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 0{,}65$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 458$ °C

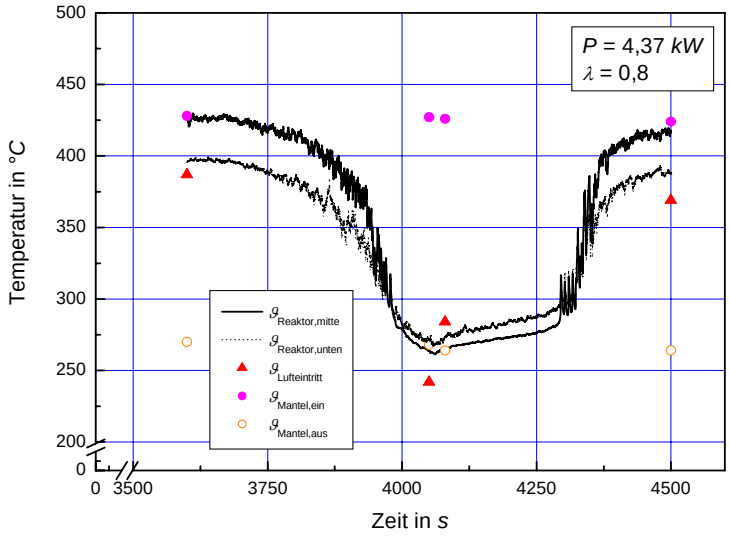


Abbildung A.9: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Zeit bei Reaktorluft-eintrittstemperatur Variation, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 0{,}80$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 426$ °C

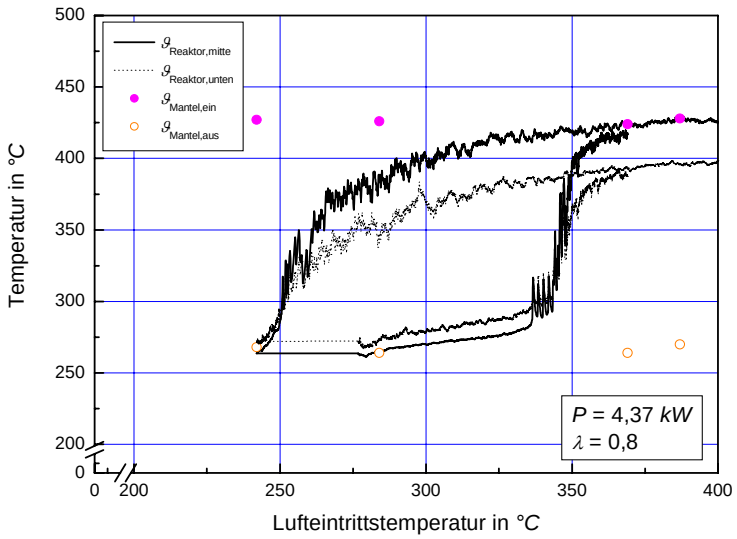


Abbildung A.10: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 0{,}80$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 426$ °C

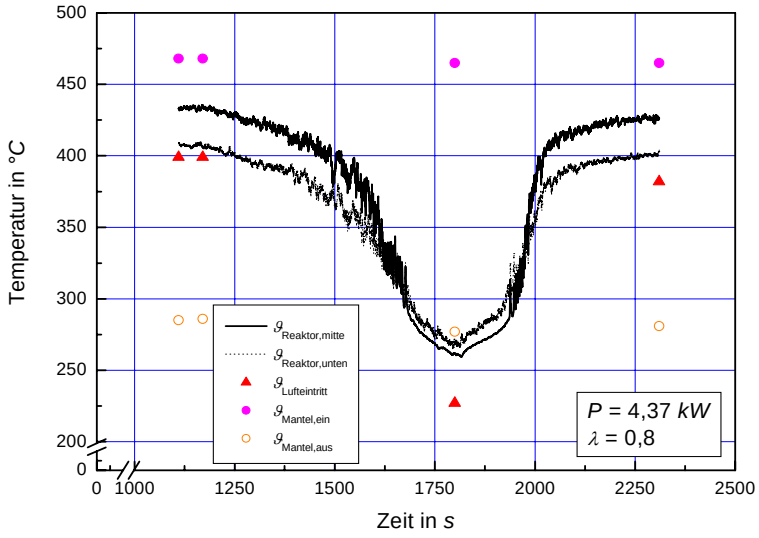


Abbildung A.11: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Zeit bei Reaktorluft-eintrittstemperatur Variation, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 0{,}80$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 467$ °C

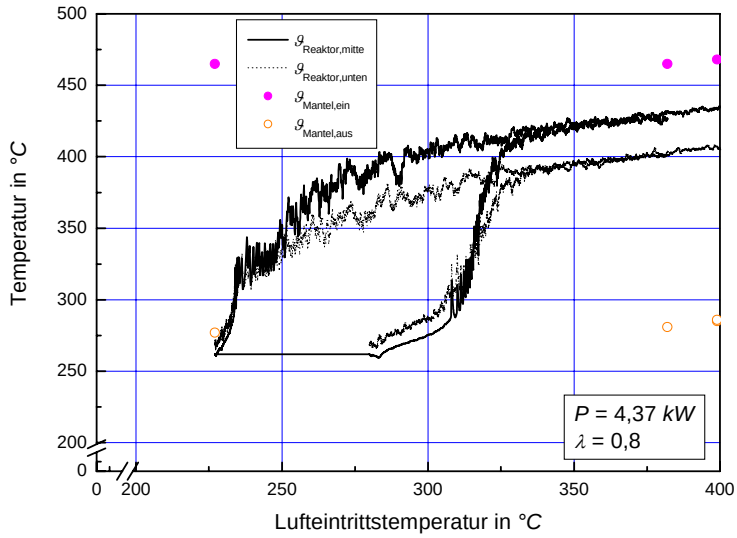


Abbildung A.12: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 0{,}80$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 467$ °C

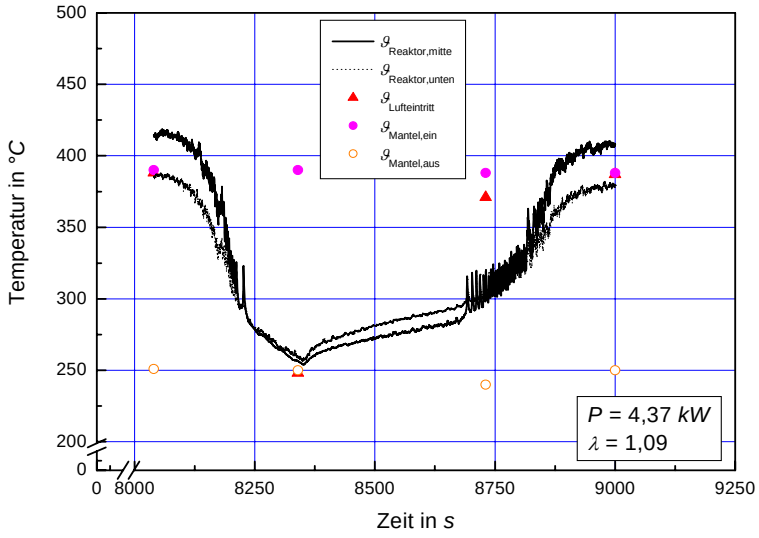


Abbildung A.13: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Zeit bei Reaktorluft-eintrittstemperatur Variation, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,09; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 389 °C

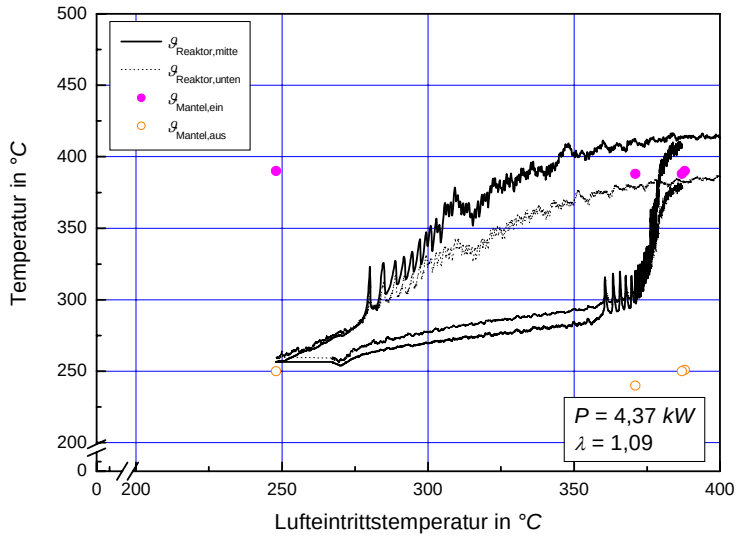


Abbildung A.14: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,09; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 389 °C

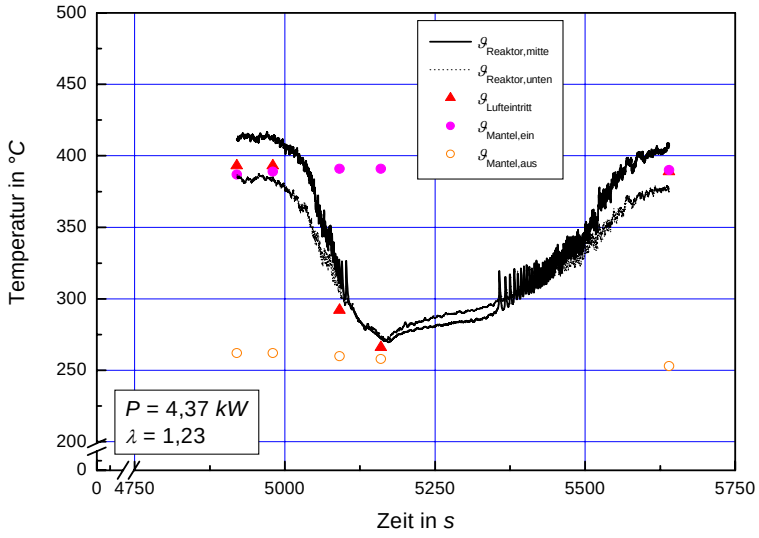


Abbildung A.15: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Zeit bei Reaktorluft-eintrittstemperatur Variation, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,23; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 389 °C

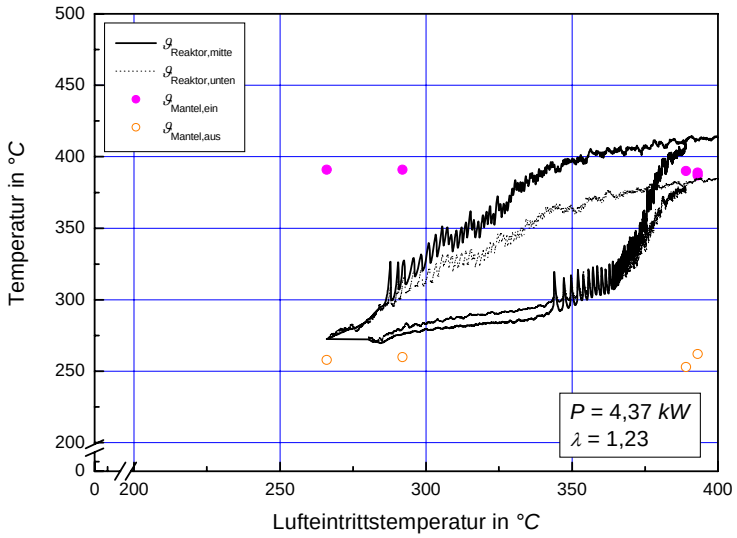


Abbildung A.16: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,23; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 389 °C

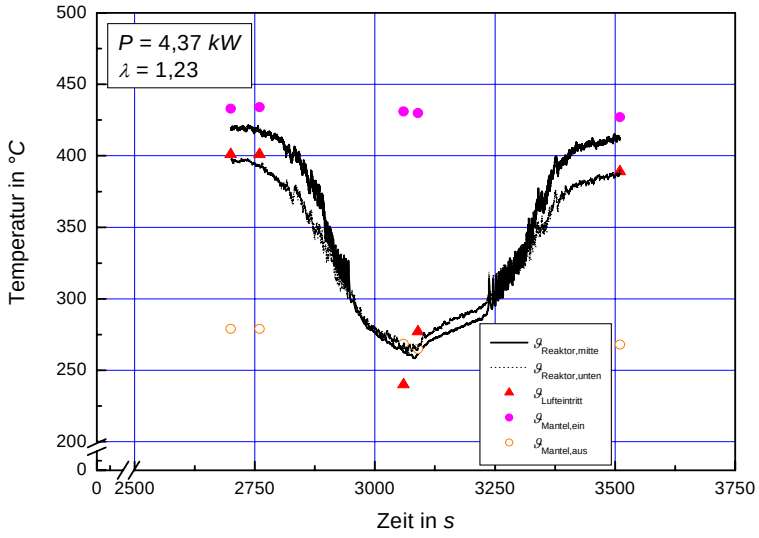


Abbildung A.17: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Zeit bei Reaktorluft-eintrittstemperatur Variation, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,23; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 432 °C

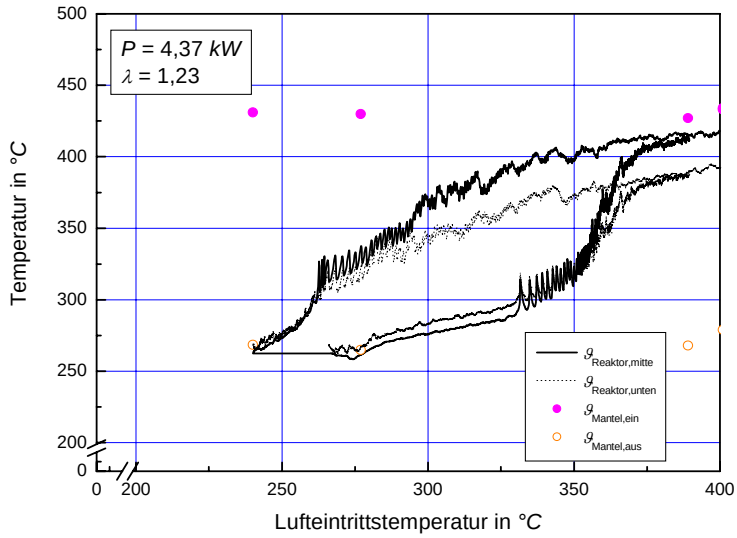


Abbildung A.18: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,23; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 432 °C

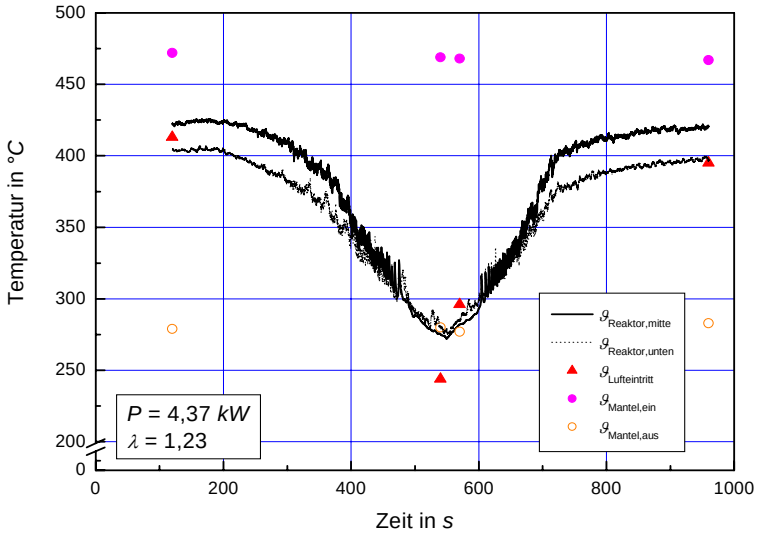


Abbildung A.19: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Zeit bei Reaktorluft-eintrittstemperatur Variation, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,23; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 470 °C

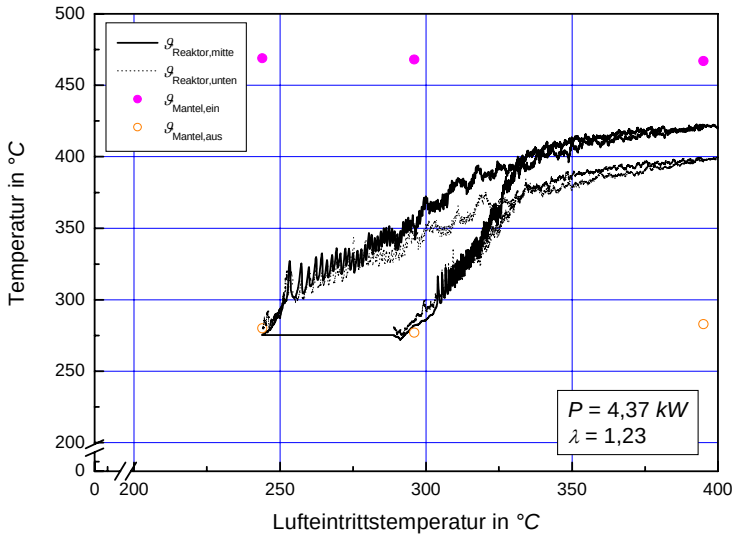


Abbildung A.20: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,23; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 470 °C

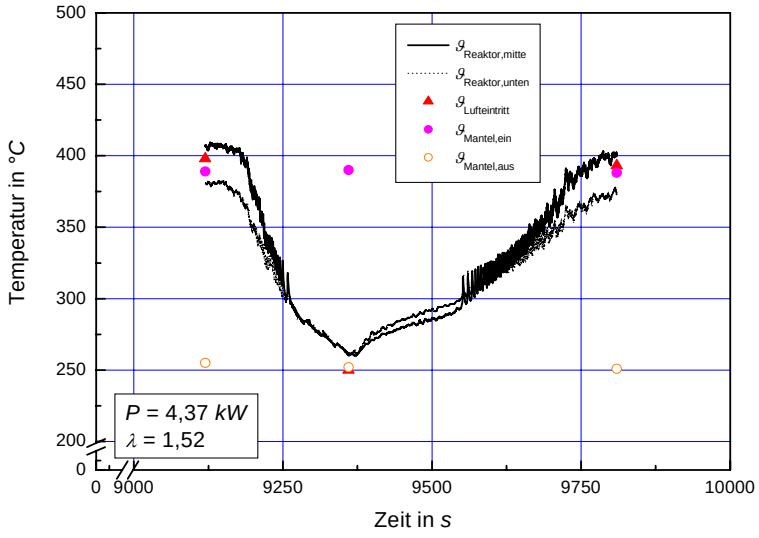


Abbildung A.21: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Zeit bei Reaktorluft-eintrittstemperatur Variation, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,52; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 389 °C

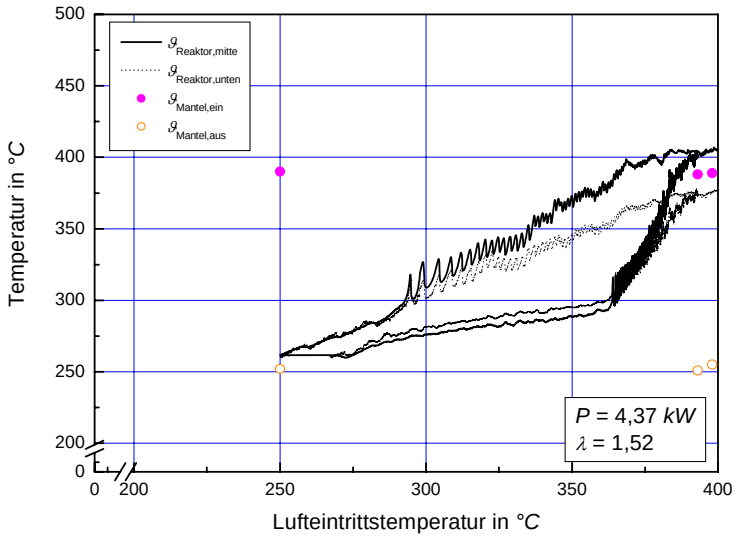


Abbildung A.22: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,52; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 389 °C

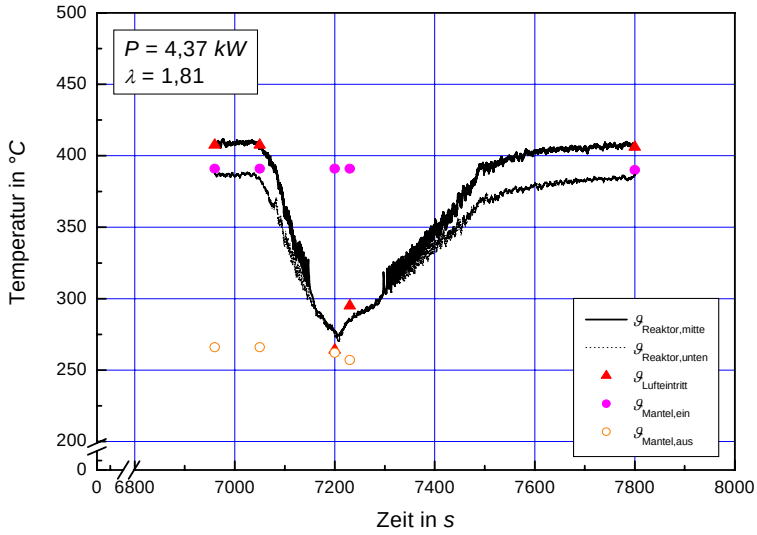


Abbildung A.23: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Zeit bei Reaktorluft-eintrittstemperatur Variation, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,81; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 391 °C

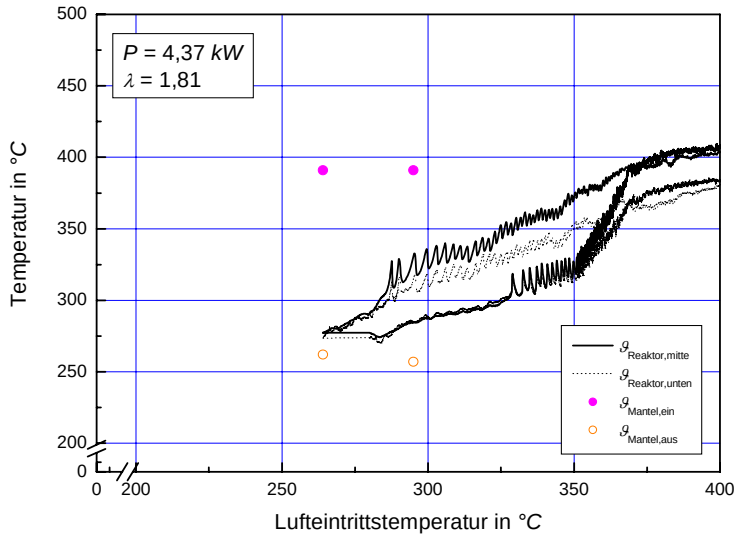


Abbildung A.24: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei P = 4,37 kW; λ = 1,81; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}}$ = 391 °C

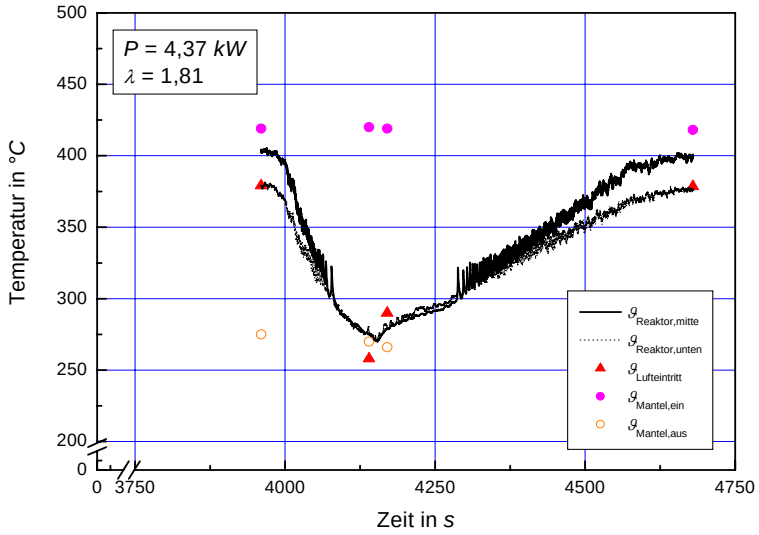


Abbildung A.25: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Zeit bei Reaktorluft-eintrittstemperatur Variation, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 1{,}81$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 419$ °C

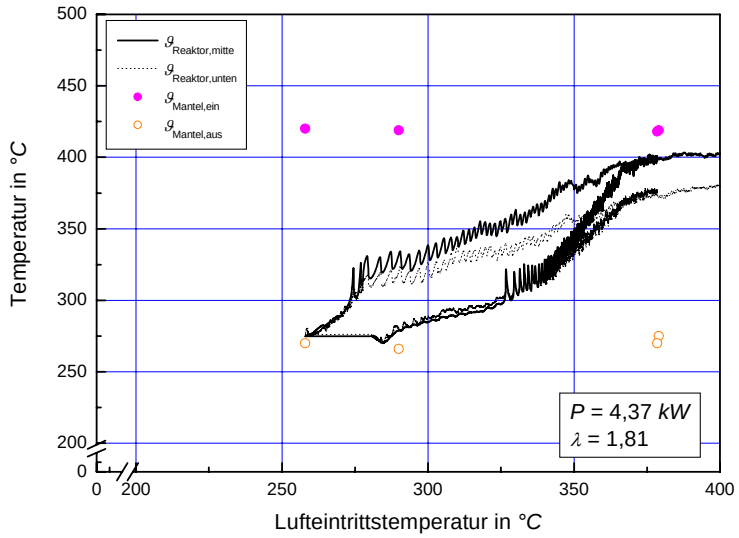


Abbildung A.26: Reaktor Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Reaktorlufteintrittstemperatur, ermittelt bei $P = 4{,}37$ kW; $\lambda = 1{,}81$; $\vartheta_{\text{Mantel, ein}} = 419$ °C