

**Universität Stuttgart**

**Abteilung  
Reinhaltung der Luft**

Endbericht

# Entwicklung von emissionsarmen häuslichen Feuerstätten für feste Brennstoffe



**Institut für Feuerungs- und  
Kraftwerkstechnik (IFK)**

Verbundprojekt  
Entwicklung von emissionsarmen häuslichen Feuerstätten  
für feste Brennstoffe

Teilprojekt IFK: FKZ-Nr. 03KB055B

**Dr. Ing. Michael Struschka**  
**Dipl.-Ing. (BA), M.Sc. Winfried Juschka**  
**Dipl.-Ing. Kathrin Diez**

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart  
Tel.: +49 711 685 6 3487 / Fax: +49 711 685 6 3491  
ifk@ifk.uni-stuttgart.de  
www.ifk.uni-stuttgart.de

Teilprojekt HKI: FKZ-Nr. 03KB055A

**Dipl.-Ing. Frank Kienle**

INDUSTRIEVERBAND HAUS-, HEIZ- UND KÜCHENTECHNIK E.V.  
Lyoner Str. 9, 60528 Frankfurt am Main  
Tel.: +49 69 25 62 68 0 / Fax: +49 69 25 62 68 100  
kienle@hki-online.de  
www.hki-online.de

April 2013

Gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aufgrund  
eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Gefördert durch:



Koordiniert vom:



Programmbegleitung:



1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Entwicklung von emissionsarmen häuslichen Feuerstätten für feste Brennstoffe		
4. Autoren Struschka, Michael; Juschka, Winfried; Diez, Kathrin, Kienle, Frank	5. Abschlussdatum	April 2013
	6. Veröffentlichungsdatum	
	7. Form der Publikation	
8. Durchführende Institutionen Universität Stuttgart Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) Pfaffenwaldring 23 70569 Stuttgart und Industrieverband Haus-, Heiz- und Küchentechnik e.V. Lyoner Str. 9 60528 Frankfurt am Main	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
	10 Förderkennzeichen	03KB055A und 03KB055B
	11. Seitenzahl	56
12. Fördernde Institution Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) 11055 Berlin	13. Literaturangaben	10
	14. Tabellen und Diagramme	15
	15. Abbildungen	48
16. Zusätzliche Angaben		
17. Kurzfassung Bei häuslichen Feuerstätten für feste Brennstoffe bestehen erhebliche Wissenslücken bezüglich der Entstehung von Produkten unvollständiger Verbrennung und mit welchen Änderungen in der Verbrennungstechnik bzw. der Strömungsführung die Emissionen positiv beeinflusst. Diese Wissenslücken sollen mit Hilfe von CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) geschlossen werden, um daraus die richtigen Schlussfolgerungen für eine effiziente und wirtschaftlich umsetzbare Entwicklung von häuslichen Feuerstätten für feste Brennstoffe mit stark reduzierten Emissionen zu ziehen. Die Anwendung von CFD-Simulationen für Kleinf Feuerungsanlagen steht noch am Anfang des Einsatzes und kann deshalb für Entwicklungsaufgaben nur entsprechend dem derzeitigen Erfahrungsstand genutzt werden. In diesem Projekt wurden für verschiedene Einzelfeuerstätten CFD-Modelle aufgebaut und zusätzlich Reaktionsmodelle implementiert, um nicht nur die Strömung, sondern auch die Temperatur-, Sauerstoff- und CO Verteilung in den Reaktionszonen bewerten zu können. Kohlenmonoxid wird als Leitkomponente zur Bewertung der Vollständigkeit der Verbrennung herangezogen. Die Qualität der Simulationsergebnisse hängt stark von den zugrundeliegenden Strömungs- und Reaktionsmodellen, dem mathematischen Rechengitter und den zu bestimmenden Randbedingungen ab. Für die Durchführung einer Simulationsrechnung bedarf es ein hohes Maß an Erfahrungen und Wissen, um plausible Rechenergebnisse zu generieren, denn die Simulationsrechnungen werden mit vereinfachten chemischen Modellen und globalen Reaktionsmechanismen durchgeführt. Als Reaktionsmodell wurde ein Zwei-Schritt-Reaktionsmodell aufgebaut und in das CFD Modell implementiert. Dabei reagiert Methan mit Sauerstoff zu Kohlenmonoxid und Wasser. Das Kohlenmonoxid reagiert dann im zweiten Schritt mit Sauerstoff zu Kohlendioxid. Die Simulationsergebnisse für einen Kamineinsatz, Kaminofen und Heizeinsatz zeigen, dass erhöhte CO-Konzentrationen aufgrund von zu geringen Brennraumtemperaturen, örtlichen Luftmangelsituationen oder zu geringer Verweilzeit der brennbaren Gase entstehen können. Für die untersuchten Einzelfeuerstätten wurden jeweils angepasste Vorschläge zur Verbrennungsverbesserung erarbeitet. Außerdem wurden Messungen auf dem Prüfstand zur Evaluierung der Rechenergebnisse durchgeführt.  Dieses Forschungsvorhaben wurde als Verbundvorhaben mit dem HKI Industrieverband Haus-, Heiz- und Küchentechnik e.V. und den beteiligten Industriepartnern Ulrich Brunner GmbH Ofen- und Heiztechnik in Eggenfelden, Hase Kaminofenbau GmbH in Trier und LEDA Werk GmbH & Co.KG Boekhoff & Co. in Leer durchgeführt.		
18. Schlagwörter nachwachsende Rohstoffe, Holzfeuerungen, Biomassefeuerungen, Kleinf Feuerungsanlagen, Stückholz, Emissionen, Modellierung, CFD-Simulation, Strömungsvisualisierung, Emissionsmessung		
20. Verlag	21. Preis	

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report	
3. title Development of low-emission domestic fireplaces for fuels		
4. author(s) (family name, first name(s)) Struschka, Michael; Juschka, Winfried; Diez, Kathrin, Kienle, Frank	5. end of project	April 2013
	6. publication date	
	7. form of publication	
8. performing organization(s) University of Stuttgart Institute of Combustion and Power Plant Technology (IFK) Pfaffenwaldring 23 70569 Stuttgart and Industrieverband Haus-, Heiz- und Küchentechnik e.V. Lyoner Str. 9 60528 Frankfurt am Main	9. originator's report no.	
	10 reference no.	03KB055A and 03KB055B
	11. no. of pages	56
12. sponsoring agency Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety 11055 Berlin	13. no. of references	10
	14. no. tables	15
	15. no. of figures	48
16. supplementary notes		
17. abstract <p>Considerable gaps in knowledge exist at domestic fireplaces for firm fuels, regarding the formation of products of incomplete combustion. These gaps in knowledge shall be closed with the help of CFD simulations (computational fluid dynamics), which will allow one to draw improved conclusions about an efficient, economically realizable development of domestic fireplaces. This will lead to a strong reduction in emissions from firm fuels. The application of CFD simulations for small heating plants still stands at the beginning of use and therefore can be used for development tasks only, according to the present state of experiences. In this project, CFD models were built up and reaction models implemented, in addition for different independent fire places to be able to judge not only the flow, but also to acquire the temperature, oxygen and CO distribution in the reaction zones. Carbon monoxide is consulted as a conducting component for the assessment of the completeness of the combustion.</p> <p>The quality of the results of simulation depends strongly on the underlying flow and reaction models, the mathematical rake bars, and the boundary conditions to be determined. For the execution of a simulation it requires one high degree of experiences and knowledge, to generate plausible calculation results due to the simulation invoices being carried out with simplified chemical models and global reaction mechanisms. As a reaction model, a two step reaction model was built up and implemented in the CFD model. Methane reacts with oxygen forming carbon monoxide and water. The carbon monoxide then reacts in the second step with oxygen forming carbon dioxide.</p> <p>The results of simulation for a fireplace insert, fireplace stove and firebox insert show that increased CO concentrations can arise due to too low combustion chamber temperatures, local lack of air situations, or too short of a residence time for the combustible gasses. Suggestions adapted were worked out in the examined independent fire places to improve the burning. In addition, measurements were carried out on the test bed for the evaluation of the calculation results.</p> <p>This research was carried out in a joint project with HKI Industrieverband Haus-, Heiz- und Küchentechnik e.V. and the industrial partners Ulrich Brunner GmbH Ofen- und Heiztechnik, Hase Kaminofenbau GmbH and LEDA Werk GmbH &amp; Co.KG Boekhoff &amp; Co.</p>		
18. keywords renewable raw materials, wood combustion, biomass heating, small heating furnaces, wood logs, emissions, modeling, CFD simulation, flow visualization, emission measuring		
20. publisher	21. price	

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Projektstruktur und Koordination .....</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Stand der Technik bei kleinen chargenweise beschickten Holzfeuerungen.....</b>	<b>3</b>
	3.1 Emissionsentstehung .....	3
	3.2 Funktionsweise .....	6
	3.3 Emissionsverlauf .....	9
	3.4 Grenzwerte .....	12
	3.5 Emissionen .....	13
<b>4</b>	<b>CFD als Grundlage zur Optimierung kleiner Holzfeuerungen .....</b>	<b>15</b>
	4.1 Ermittlung geeigneter Einstellungen für die Kaltsimulation .....	18
	4.2 Entwicklung eines Reaktionsmodells.....	22
	4.3 Einstellungen für Teilmodelle und Randbedingungen bei der CFD-Modellierung .....	23
<b>5</b>	<b>CFD als Entwicklungswerkzeug bei Kleinf Feuerungsanlagen .....</b>	<b>23</b>
	5.1 Kamineinsatz.....	24
	5.2 Kaminofen.....	32
	5.3 Kachelofeneinsatz.....	48
<b>6</b>	<b>Ergebnisbewertung und -verbreitung durch HKI.....</b>	<b>53</b>
	6.1 Hintergrund .....	53
	6.2 Ergebnisbewertung .....	54
	6.3 Wesentliche Erkenntnisse für die Hersteller .....	55
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>58</b>
<b>8</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>59</b>



## **1 Einleitung**

Häusliche Feuerstätten (z.B. Kaminöfen, Kachelofen-Heizeinsätze und Kamineinsätze) sind in Deutschland in hoher Stückzahl im Anlagenbestand vertreten, mit z.T. deutlichen Zuwächsen in den letzten Jahren. Trotz der relativ kleinen Nennwärmeleistungen wird aufgrund des hohen Bestandes ein bedeutender Anteil von Holzbrennstoffen in diesen Feuerungen zur Raumheizung verbrannt. Durch die einfache Anlagentechnik und durch die vielfältigen Eingriffsmöglichkeiten der Betreiber ist das Emissionsaufkommen an Feinstäuben und anderen Produkten unvollständiger Verbrennung derzeit, gegenüber z.B. Pelletfeuerungen, überproportional hoch.

Wesentliches Ziel dieses Vorhabens ist die Weiterentwicklung der Feuerungstechnik und die Umsetzung von praxistauglichen Minderungsmaßnahmen für Feinstaub und für Produkte unvollständiger Verbrennung durch Primärmaßnahmen. Eine Verbesserung der Verbrennungsbedingungen ermöglicht auch den Betrieb der Anlagen bei geringerem Luftüberschuss, wodurch sich eine Steigerung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades ergibt. Somit trägt das Projekt auch zur Effizienzsteigerung der Biomassenutzung bei. Dabei soll die praktische Anwendung der entwickelten Minderungsmaßnahmen in Demonstrationsfeuerungen in Zusammenarbeit mit Geräteherstellern zeigen, dass auch bei höheren Emissionsanforderungen in diesem Bereich wettbewerbs- und marktfähige Produkte realisiert werden können. Anhand der entwickelten und getesteten Demonstrationsfeuerungen wird allen Heizgeräteherstellern eine Basis zur Verfügung stehen, um häusliche Feuerstätten für feste Brennstoffe mit geringen Emissionen anzubieten.

Das Vorhaben soll wesentlich dazu beitragen, Impulse für weitere eigene Entwicklungen der Hersteller für kleine Biomassefeuerungen zu geben. Eigene Entwicklungen der meist kleinen Hersteller in diesem Bereich werden auf Grund deren begrenzten finanziellen und personellen Kapazitäten oft nicht oder nur ansatzweise vorgenommen.

Dieses Forschungsvorhaben wurde in einem Verbundvorhaben mit dem HKI Industrieverband Haus-, Heiz- und Küchentechnik e.V. und den beteiligten Industriepartnern Ulrich Brunner GmbH Ofen- und Heiztechnik in Eggenfelden, Hase Kaminofenbau GmbH in Trier und LEDA Werk GmbH & Co.KG Boekhoff & Co. in Leer bearbeitet.

## **2 Projektstruktur und Koordination**

Das Forschungsvorhaben wurde als Verbundvorhaben in Zusammenarbeit mit Industriepartnern durchgeführt. Der HKI Industrieverband übernahm die Leitung und Koordination des Projektes und war führend für die Verbreitung und Verwertung der Projektergebnisse verantwortlich. Er organisierte u.a. die Verbreitung von Informationen aus dem Forschungsprojekt im Kreise der Hersteller, im Forschungsnetzwerk und über Pressemitteilungen. Das Projekt wurde im Wesentlichen am Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik der Universität Stuttgart durchgeführt. Die Umsetzung des Konzeptes zur Verbrennungsoptimierung für die unterschiedlichen Bauarten erfolgte bei den beteiligten HKI Feuerstätten-Herstellern. Hierzu wurde auf den Hersteller-Prüfständen die Optimierung

von Demonstrationsfeuerungen mit optimierten Verbrennungsbedingungen (geringe Partikel- und VOC-Emissionen) vorgenommen.

Darüber hinaus etablierte der HKI zusammen mit den beteiligten Industriepartnern einen Projektbeirat, der Entscheidungen zum technischen Fortgang (Zeitplan, Inhalt) des Vorhabens traf und dieses bewertete. Die Organisation der Projekttreffen dieses Beirates sowie die Berichterstellung waren u.a. Aufgabe des HKI.

Im Folgenden sind die beteiligten Projektpartner mit den jeweiligen Arbeitsschwerpunkten aufgeführt:



**HKI Industrieverband Haus-, Heiz- und Küchentechnik e.V.**

Projektverantwortlicher: Frank Kienle

Arbeitsschwerpunkt im Projekt: Projektleitung, Projektkoordination, Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Zielgrößen und wirtschaftliche Beurteilung

Titel des Teilprojektes: Projektkoordination, Ergebnisbewertung und -verbreitung



**Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik - IFK**

Projektverantwortlicher: Dr.-Ing. Michael Struschka

Arbeitsschwerpunkt im Projekt: Aufarbeitung des wissenschaftlichen und technischen Standes der Technik, Entwicklung eines Musterfeuerraumes mit geringen Partikelemissionen und Ausarbeitung eines Entwicklungshandbuch als Bestandteil des Endberichts

Titel Teilprojektes: Auslegung und Entwicklung eines Musterfeuerraumes

***beteiligte Feuerstätten-Hersteller (als Unterauftragnehmer des HKI)***



**Firma Ulrich Brunner GmbH**

Projektverantwortlicher: Hermann Bichlmaier

Arbeitsschwerpunkt im Projekt Umsetzung einer Demonstrationsfeuerung als Kachelofen-Heizeinsatz

Titel Teilprojektes: Umsetzung Kachelofen-Heizeinsatz



**Firma Hase Kaminofenbau GmbH**

Projektverantwortlicher: Michael Gorges

Arbeitsschwerpunkt im Projekt Umsetzung einer Demonstrationsfeuerung als Kaminöfen.

Titel Teilprojektes: Umsetzung Kaminöfen



**LEDA Werke GmbH**

Projektverantwortlicher: Folkmar Ukena

Arbeitsschwerpunkt im Projekt Umsetzung einer Demonstrationsfeuerung als Kamin-Heizeinsatz

Titel Teilprojektes: Umsetzung Kamin-Heizeinsatz



### **3 Stand der Technik bei kleinen chargenweise beschickten Holzfeuerungen**

#### **3.1 Emissionsentstehung**

Die elementaren Hauptbestandteile von absolut trockenem Holz sind Kohlenstoff (ca. 50 Massen-%), Sauerstoff (ca. Massen-44 %) und Wasserstoff (ca. Massen-6 %). Bei der Holzverbrennung spielen sich folgende Vorgänge ab:

Zuerst erfolgt die Erwärmung und Trocknung des Holzes durch Rückstrahlung von Flamme, Glutbett und Feuerraumwänden. Wichtig für die emissionsarme Verbrennung ist dabei, ein nicht zu großer Wassergehalt des Brennstoffes. Gut getrocknetes Holz hat ein Wassergehalt von unter 20 Massen-%. Ist das Wasser verdampft, so werden ab ca. 150 °C die langkettigen organischen Verbindungen des Holzes thermisch zersetzt. Bei dieser Vergasung des Holzes im Glutbett entstehen u.a. Kohlenmonoxid (CO) und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (OGC). Hierbei verliert das Holz ca. 85 % seines Gewichts. Die nach der Entgasung verbleibenden nicht flüchtigen Holzbestandteile werden als Holzkohle bezeichnet.

Primärluft wird direkt im Glutbett zugeführt. Sekundärluft wird mit den brennbaren Gasen vermischt. Die Aufgabe der Primärluft ist die Trocknung und Vergasung des Holzes, somit bestimmt die Menge der Primärluft maßgeblich die Leistung der Feuerung. Die Aufgabe der Sekundärluft ist es die entstehenden Gase so vollständig wie möglich zu oxidieren, somit ist die Sekundärluft entscheidend für die Verbrennungsqualität.

Kohlenstoff wird nicht direkt zu CO<sub>2</sub> oxidiert, sondern die Verbrennungsreaktion des Kohlenstoffs läuft in zwei Stufen ab. Zuerst wird er bei der Entgasung zu CO teiloxydiert. In einem zweiten Schritt wird dieses brennbare Gas dann zu CO<sub>2</sub> weiteroxydiert, sofern die Verbrennung vollständig abläuft (Abbildung 1).

Kohlenwasserstoffe stellen ebenso wie Kohlenmonoxid eine Zwischenstufe der Verbrennung dar. Sie reagieren bei vollständiger Verbrennung zu Kohlendioxid und Wasser.

Für das vollständige Ablaufen dieser Reaktionen sind ausreichend hohe Temperaturen, eine gute Vermischung der brennbaren Gase mit genügend Sauerstoff und eine Mindestverweilzeit der brennbaren Gase in der Brennkammer notwendig. Bei höheren Temperaturen laufen die chemischen Reaktionen schneller ab, so dass weniger Verweilzeit nötig ist.

Die Produkte aus vollständiger Verbrennung sind Kohlendioxid, Stickstoffoxide, Wasser und Aschepartikel (nicht brennbarer Staub). Das entstehende Kohlendioxid wird als klimaneutral angesehen, da während des Holzwachstums dieses Kohlenstoffdioxid der Atmosphäre entzogen wurde und auch bei der Verrottung des Holzes im Wald wieder frei werden würde.

Neben Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen sind nicht anorganische Partikel, wie z.B. Ruß und Teere, Produkte einer unvollständigen Verbrennung.

Die Emissionen aus unvollständiger Verbrennung können durch eine geeignete Verbrennungsführung weitgehend vermieden werden. Geringe Emissionen aus unvollständiger Verbrennung sind somit ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung einer Feuerung. Ein zwei-

tes wichtiges Kriterium ist die Erzielung eines möglichst hohen feuerungstechnischen Wirkungsgrades. Der Wirkungsgradverlust entsteht hauptsächlich durch hohe Abgastemperaturen und durch einen zu großen Luftüberschuss. Denn diese Luft wird unnötigerweise auf Abgastemperatur erwärmt und ihre Energie geht als Abgasverlust verloren. Gleichzeitig reduziert ein zu hoher Luftüberschuss die Verbrennungstemperatur und verringert die Verweilzeiten in der Brennkammer. Dies trägt zur Unvollständigkeit der Verbrennung bei, was ebenfalls einen Wirkungsgradverlust durch unverbrannte Abgasbestandteile bedeutet. Somit wird die Maximierung des Wirkungsgrades durch einen minimalen Luftüberschuss erreicht. Je besser die Vermischungsqualität der brennbaren Gase mit der Verbrennungsluft, umso kleiner ist der notwendige Luftüberschuss. Da die Vermischung in realen Feuerungssystemen nicht ideal sein kann, ist immer ein Luftüberschuss notwendig, um Zonen mit örtlichem Luftmangel zu vermeiden.

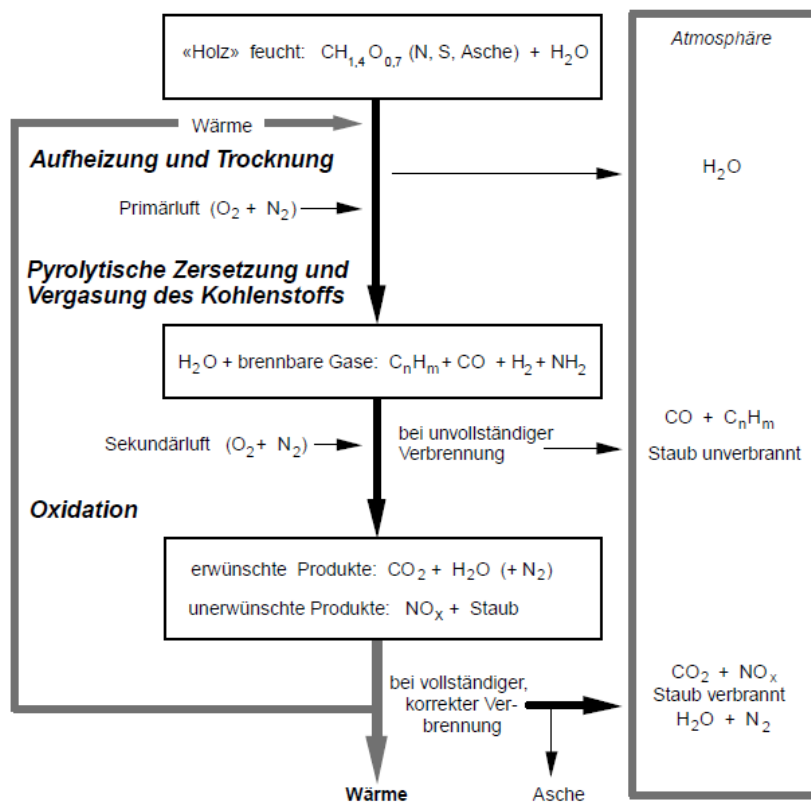


Abbildung 1 Abbrandverhalten von Holz (Kaltschmitt et al., 2009)

Aerosole sind eine Suspension von festen und flüssigen Partikeln in einem Gas. Durch die Partikel-Massenkonzentration, die Partikel-Größenverteilung und die Partikel-Anzahlkonzentration werden Aerosole charakterisiert. Für die Einhaltung der für Holzfeuerungen geltenden Grenzwerte wird die Partikel-Massenkonzentration herangezogen. Die Verbrennungsqualität (Vollständigkeit der Verbrennung) spielt eine entscheidende Rolle für die Menge aber auch die Art der entstehenden Partikel, wie die nachfolgende Tabelle 1 darstellt.

**Tabelle 1 Partikeltypen aus der Verbrennung von Holz (Oser et al , 2003)**

Partikel, die auch bei vollständiger Verbrennung entstehen	Partikel aus unvollständiger Verbrennung
Mineralische Bestandteile des Holzes	Elementarer Kohlenstoff (Holzkohle)
Fremdteile, die am Holz anhaften (Sand, Erde)	Organischer Kohlenstoff in Form von unverbrannten Holzbestandteilen
Salze (Sulfate, Chloride, Karbonate, Hydroxide, Oxide, Nitrate; ionische Verbindungen)	Organischer Kohlenstoff in Form von Teer (höherwertig, aus der Pyrolyse)
Metalloxide (z.B. $Al_2O_3$ )	Organischer Kohlenstoff in Form von Russ (in der Flamme gebildet)

Partikel aus unvollständiger Verbrennung können weiter untergliedert werden, da die Verbrennung aus unterschiedlichen Gründen unvollständig sein kann. Entsprechend dem Verbrennungszustand können drei Partikelarten unterschieden werden (z.B. nach Nussbaumer, 2010):





- (1) Salze aus guter Verbrennung bei hoher Temperatur und idealem Luftüberschuss
- (2) Ruß aus der Verbrennung bei hoher Temperatur mit lokalem Luftmangel
- (3) kondensierbare organische Verbindungen aus der Verbrennung bei vergleichsweise tiefer Temperatur.

Diese drei Partikelarten sind primäre Aerosole. Sekundäre organische Aerosole entstehen durch fotochemische Reaktionen von flüchtigen organischen Verbindungen in der Atmosphäre.

In der nachfolgenden Abbildung 2 werden die Arten und Eigenschaften von primären Aerosolen aus der Holzverbrennung dargestellt.

Aus dem Bildungsweg der Partikel lassen sich Prioritäten zur Verminderung der Umweltauswirkungen von Holzfeuerungen ableiten (z.B. nach Nussbaumer, 2010):

- Minderung bzw. Vermeidung von kondensierbaren organischen Verbindungen in den Partikeln wegen ihrer hohen Gesundheitsrelevanz,
- Minderung bzw. Vermeidung von organischen Verbindungen als z.T. Vorläufersubstanzen für sekundäre organische Aerosole sowie - sofern im heißen Abgas gemessen - als Vorläufer für kondensierbare organische Verbindungen,
- Minderung bzw. Vermeidung von Ruß wegen gesundheitlicher und klimatischer Effekte.

Partikelarten und -eigenschaften	Flammen-Verbrennung			Pyrolyse
	T hoch (> 800°C) O <sub>2</sub> = 0	– Mix –	T hoch (> 800°C) O <sub>2</sub> ideal	T tief viel oder wenig O <sub>2</sub>
				
Art	<b>Russ</b>	↔	<b>Salz</b>	Condensable Organic Compounds <b>COC</b>
Aufbau	EC / BC chemisch / optisch C/H > 6...8	↔	C als Karbonat (CC) u.a. Salze	OC = TC-EC-CC C/H < 2
Farbe	schwarz	↔	weiss	braun   keine
Gesundheit	<b>toxisch</b> <b>karzinogen</b> entzündlich	↔	kaum toxisch kaum karzinogen entzündlich (kaum Si)	<b>stark toxisch</b> <b>stark karzinogen</b> entzündlich
Klima: Direkt	↑ absorbiert Licht und wärmt Atm.*	↔	↓ streut Licht und kühlt Atm.	↘ streut und absorbiert
Klima: Indirekt	↑ Schnee-Albedo ↓	↓	↓	↓
Alle Partikel wirken als Keime für Wolken und kühlen durch Cloud albedo und Cloud lifetime effect				

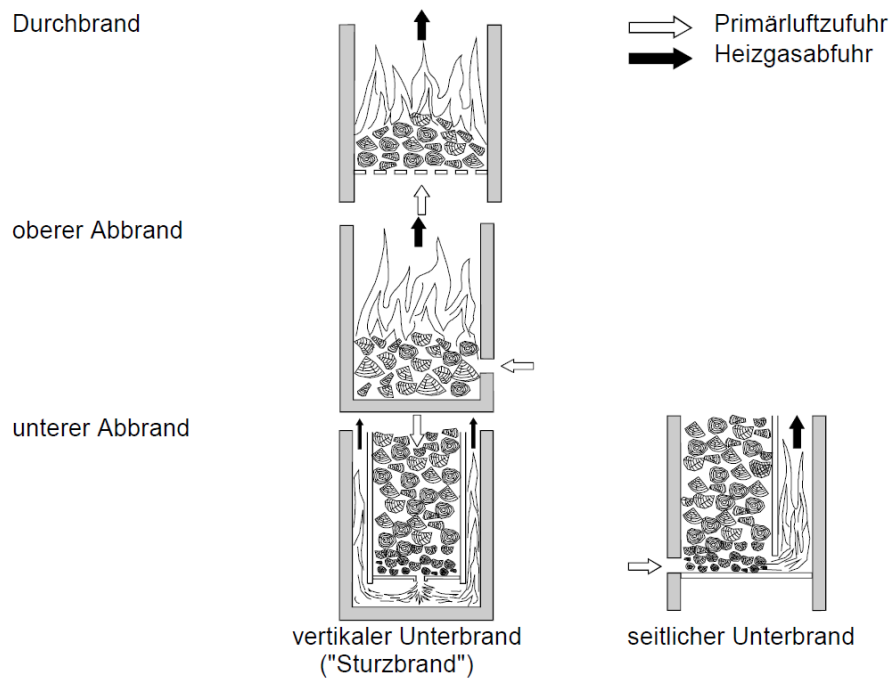
**Abbildung 2 Arten und Eigenschaften von primären Aerosolen aus der Holzverbrennung (Nussbaumer, 2010)**

### 3.2 Funktionsweise

Bei Kaminöfen, Kamineinsätzen und Heizeinsätzen wird üblicherweise für das Feuer-raumkonzept das Durchbrandprinzip bzw. der obere Abbrand verwendet. Vereinzelt werden auch Heizgeräte mit unterem Abbrand angeboten (Juschka et.al. 2012).

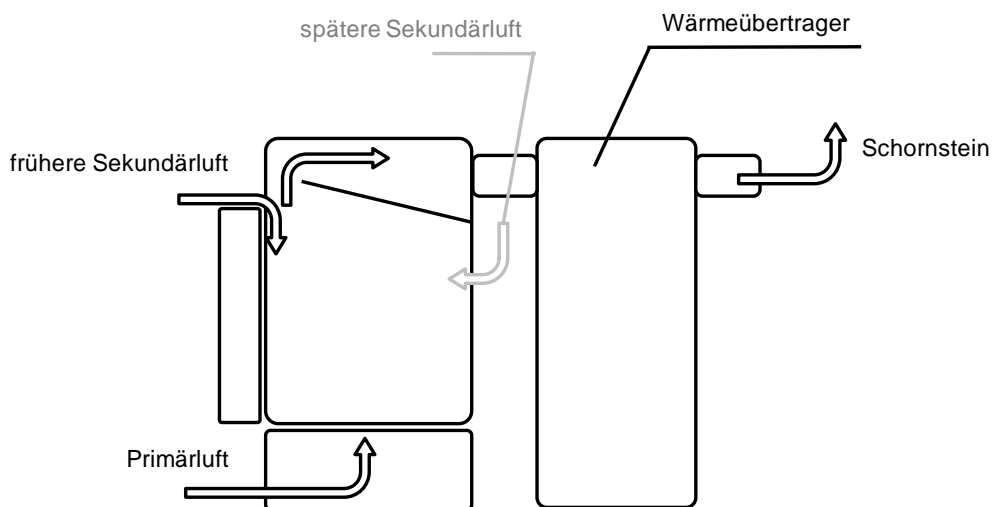
In diesem Projekt wurde von allen beteiligten Herstellern das Durchbrandprinzip bzw. der obere Abbrand gewählt, da sich hierdurch klassische Flammenbilder ergeben, wie es von den Kunden gewünscht wird. Deshalb sollen hier auch keine Konstruktionen erörtert werden, die auf dem unteren Abbrand basieren. Die unterschiedlichen Abbrandprinzipien werden in der nachfolgenden Abbildung 3 dargestellt.

Abbildung 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Einzelraumfeuerstätte mit Durchbrandprinzip für den Wohnraum. Dabei wird in einem Brennraum Brennstoff durch Zugabe der Primärluft von unten umgesetzt. Die Befüllung findet überwiegend über eine Tür mit Sichtscheibe statt. Um die Sichtscheibe vor Verunreinigungen zu schützen, wird meist die Sekundärluft – in Abbildung 4 als frühere Sekundärluft bezeichnet - über die Sichtscheibe geleitet. Einige Feuerungen weisen auch eine „spätere Sekundärluft“ an der Rück- oder Seitenwand des Brennraumes auf. Teilweise wird diese von den Herstellern als Tertiärluft bezeichnet.



**Abbildung 3** Abbrandprinzipien bei handbeschickten Holzfeuerungen (Kaltschmitt et al., 2009)

Die Abgase gelangen schließlich über eine Umlenkplatte (Zugplatte) in die Nachverbrennungszone. Bei Kaminöfen ist dieser Bereich oft nicht wärmegeklämt und dient gleichzeitig als Wärmeübertrager. In Heizeinsätzen für Kamine oder Kachelöfen ist der Nachverbrennungsbereich meist mit Schamotte wärmegeklämt. Zur weiteren Wärmeabgabe werden die heißen Abgase oft in eine Nachheizfläche geführt, um dann über das Abgasrohr (Verbindungsstück) in den Schornstein zu gelangen. Teilweise werden bei Kaminöfen und Heizeinsätzen im Bereich des Wärmeübertragers wasserführende Bauteile für die Bereitstellung von Heiz- oder Warmwasser eingebracht.



**Abbildung 4** Prinzipbild für einen Kamin- bzw. Heizeinsatz mit Durchbrandprinzip und möglichem Wärmeübertrager

Zusammenfassend lassen sich, bezüglich der Feuerraumkonstruktion, die am Markt vorhandenen Heizeinsätze für Kamine und Kachelöfen, sowie Kaminöfen nach folgenden wichtigen Variablen unterscheiden:

- Volumen Brennraum/ Nachverbrennungszone
- Grundfläche Feuerraum (Größe und Form - z.B. rund, oval, rechteckig)
- Fensterfläche
- Primärluft:  
mit Rost: Anordnung/ Gesamtfläche der Schlitze / Löcher  
rostlose Zuführung:  
vorne / hinten / seitlich / kombiniert  
Höhe über Feuerraumboden  
schlitzförmig (Breite, Höhe) / rund (Durchmesser, Anzahl)
- Sekundärluft:  
Scheibenspülung (oben / unten)  
hinten / seitlich (Höhe / Form / Fläche)  
Art der Zufuhr (Vorwärmung)
- Lufteinstellung der Primärluft / Sekundärluft
- Zugplatte:  
eine Zugplatte:  
einseitig / zweiseitig umströmt  
Höhe über Feuerraumboden  
Durchlassfläche  
mehrere Zugplatten:  
trichterförmig / 2. Platte senkrecht / versetzt bzgl. Vorder- und Rückwand  
zusätzliche Leitbleche.

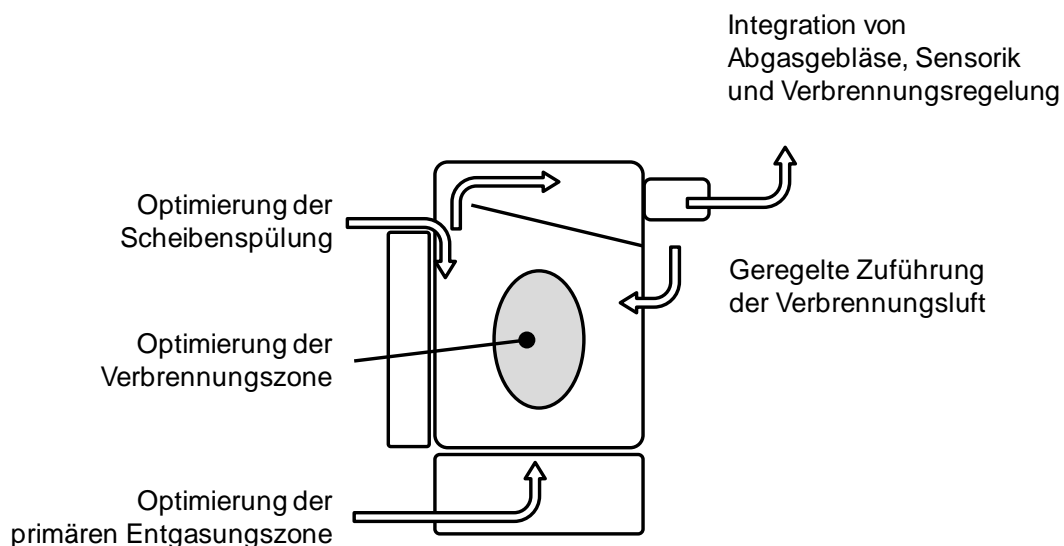
Der Weg zu emissionsarmen Feuerungen kann durch primäre und sekundäre Maßnahmen beschritten werden (Abbildung 5). Dabei sind die Primärmaßnahmen zu favorisieren. Die Optimierung der primären Entgasungszone hat hauptsächlich Einfluss auf das Anbrandverhalten und sollte durch eine homogene Einströmung der Primärluft durch eine optimale Rostgeometrie geschehen. Um den Luftüberschuss der Feuerung gering zu halten, muss eine Optimierung der Scheibenluft vorgenommen werden. Diese muss, bei Verringerung der Luftmengen, die Wirkung der Scheibenspülung zumindest beibehalten und die Scheibe im üblichen Rahmen zuverlässig frei halten.

Gerade bei sehr großen Scheiben bestimmt die Scheibenluft maßgeblich den Luftüberschuss, da diese als Ballastluft durchgeschleust wird. Ist die Voraussetzung gegeben, dass die Scheibenluft ihre Funktion für eine freie Scheibe bewirkt, kann eine Optimierung der Verbrennungszone vorgenommen werden. Dabei muss die Strömung der Scheibenluft dahingehend optimiert werden, dass die richtige Menge an Sekundärluft in der Verbrennungszone geleitet wird und sich optimal mit den oxidierbaren Gasen vermischt. Dies sollte bei möglichst hohen Temperaturen erfolgen. Die Verweilzeit in der Verbren-

nungszone ist aufgrund von Marktvorgaben (z.B. Erwartung der Käufer, klassisches Flammenbild, Designströmungen) nur bedingt beeinflussbar und hängt maßgeblich von der Geometrie des Brennraums ab.

Um konstante Verbrennungsbedingungen über den gesamten Abbrand in jeder Verbrennungsphase zu gewährleisten, ist eine geregelte Zuführung der Verbrennungsluft nötig. Im einfachsten Fall wird dies durch Drosseln der Primär- und Sekundärluft durch den Betreiber erreicht. Um den Betreibereinfluss zu minimieren, sollte die Verbrennungslufteinstellung automatisch geschehen. Dies kann durch thermo- oder elektromechanische Stellklappen geschehen.

Bei thermomechanischen Stellklappen wird eine Referenztemperatur als Stellgröße herangezogen. Dies kann die Abgastemperatur oder eine Gehäusetemperatur sein. Die Dosierung der Verbrennungsluft mit elektromechanischen Stellklappen erfolgt durch eine Verbrennungssteuerung (zeitabhängig) oder in Kombination mit Sensoren (z.B. Temperatur oder Gasbestandteile) durch eine Verbrennungsregelung.



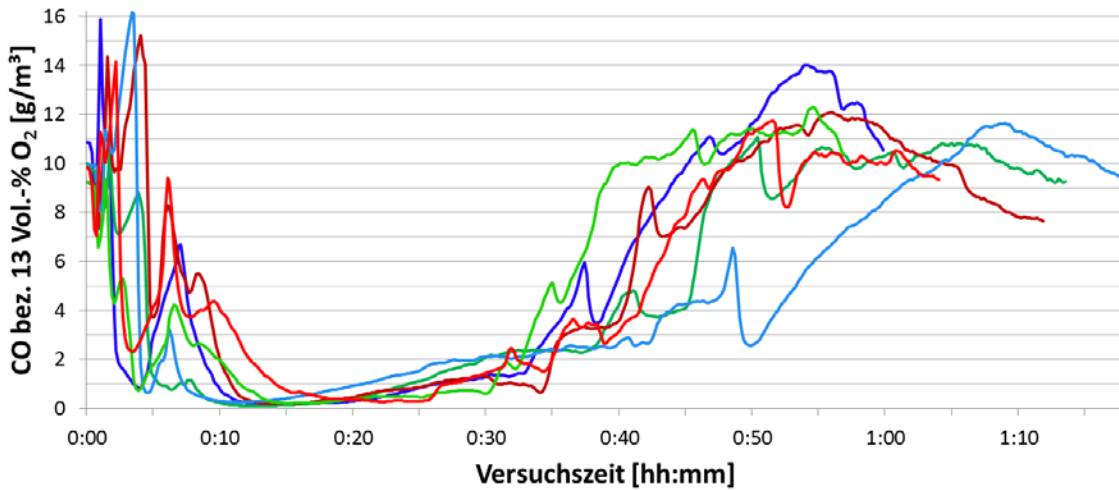
**Abbildung 5** Mögliche Optimierungsmöglichkeiten an einer kleinen chargenweise betriebene Feuerstätten

### 3.3 Emissionsverlauf

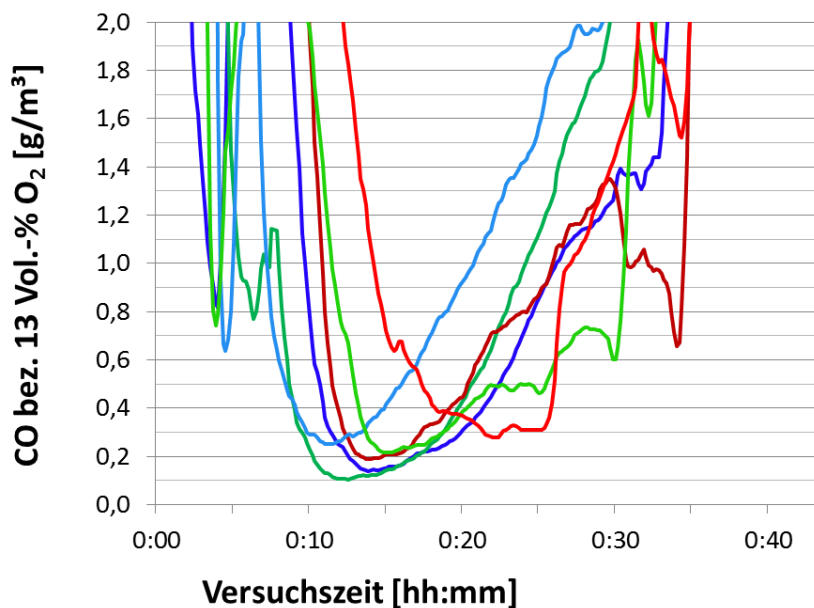
Anhand von aktuell durchgeführten Messungen an einem Kaminofen sollen typische Verläufe für CO und OGC (organisch gebundener Kohlenstoff) für den Betrieb im Durchbrand dargestellt werden. Um zu zeigen, dass jeder Abbrand quasi ein Unikat darstellt, werden in den Abbildungen Verläufe von zwei Messreihen mit jeweils 3 Abbränden (nach dem Aufheizen zur Erzeugung einer ersten Grundglut) gezeigt. Die Abbrände wurden jeweils mit zwei Buchenholzscheiten durchgeführt.

Bei der nachstehenden Abbildung 6 ist ersichtlich, dass in der Anbrand- und Ausbrandphase hohe CO-Konzentrationen zu verzeichnen sind und das Minimum der CO-Konzentration nur in der Hauptverbrennungsphase vorliegt und auch nicht immer gleich

niedrig ist. Dies zeigt nochmals Abbildung 7 als höher aufgelöster Ausschnitt aus Abbildung 6.



**Abbildung 6** Beispielhafte zeitliche Verläufe der CO-Konzentrationen an einem Kaminofen unter Prüfstandsbedingungen



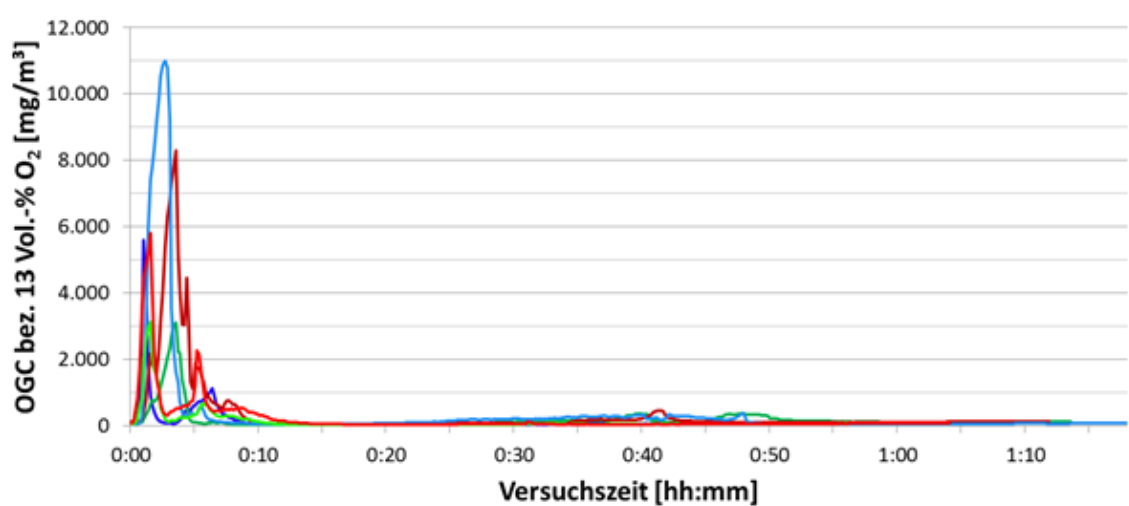
**Abbildung 7** Ausschnitt aus vorhergehender Abbildung 6

Dies soll darauf hinweisen, dass selbst unter gleichen und kontrollierten Randbedingungen auf dem Prüfstand (wie z.B. Holzart, Wassergehalt und Menge des Holzes, sowie Förderdruck) keine gleichen Messwerte gewonnen werden können. Würden nicht Prüfstandsbedingungen sondern Praxisbedingungen vorliegen (bei denen z.B. auch zu viel oder zu nasses Holz verwendet könnte oder sonstige Bedienfehler erfolgen könnten), so ist klar, dass ein anderes Emissionsverhalten der Feuerung erreicht werden würde.



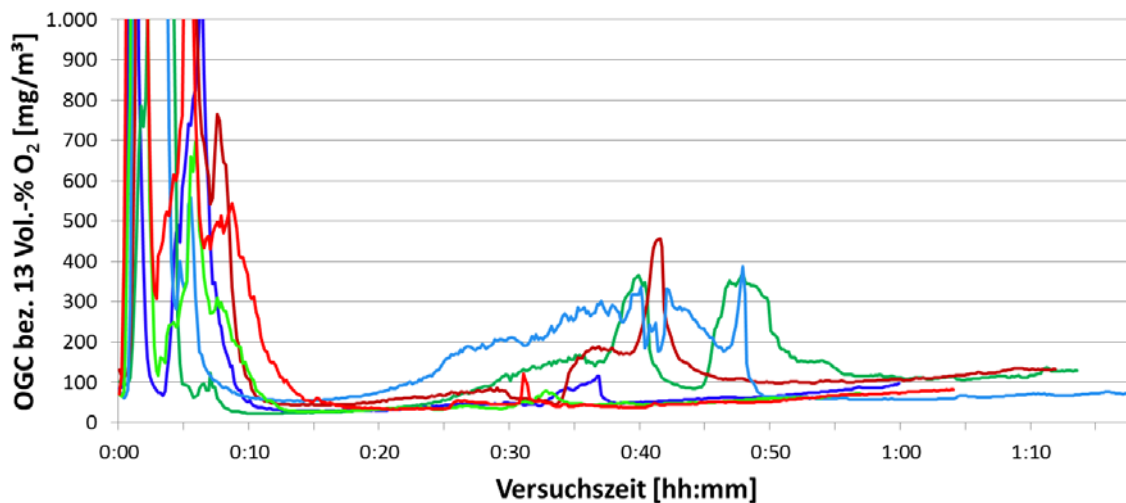
Dieses könnte sich, je nach Bauform der Feuerung und Abweichung von den definierten Normbedingungen der Typprüfung für die Einzelraumfeuerstätten, sich mehr oder weniger stark von den Prüfstandswerten unterscheiden.

Bei den in der nachstehenden Abbildung 8 gezeigten Verläufen der OGC-Konzentrationen ist ersichtlich, dass die OGC-Spitzenwerte in der Anbrandphase zu verzeichnen sind, wobei die Höhe dieser Konzentration von Abbrand zu Abbrand stark variieren kann.



**Abbildung 8** Beispielhafte zeitliche Verläufe der OGC-Konzentrationen an einem Kaminofen unter Prüfstandsbedingungen

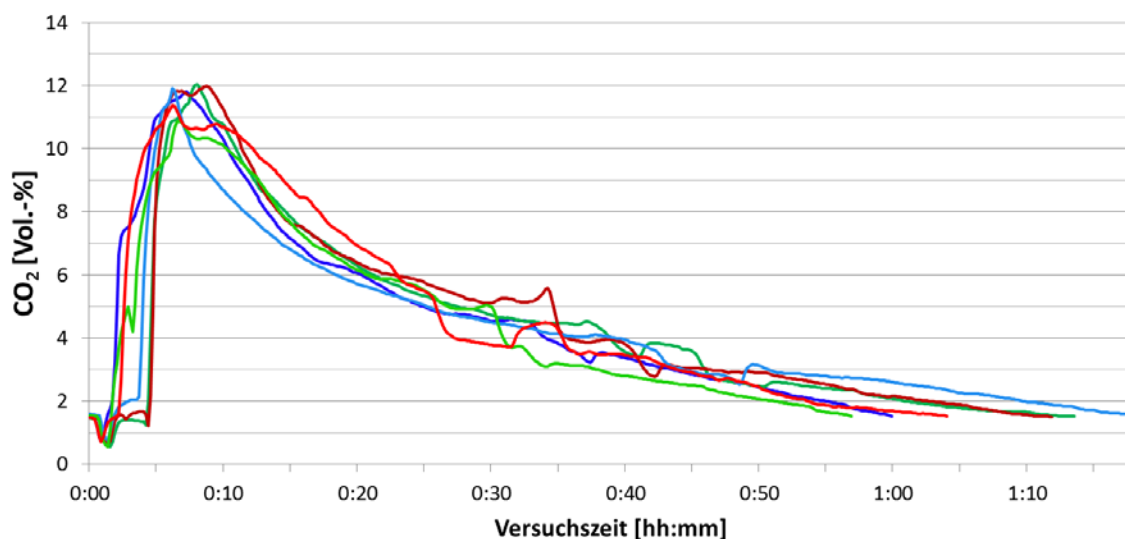
Um den weiteren Verlauf der OGC-Konzentrationen nach dem Anbrand mit deutlich niedrigeren Konzentrationen besser aufzulösen, werden in der nachfolgenden Abbildung 9 nur OGC-Konzentrationen bis 1.000 mgC/m<sup>3</sup> dargestellt.



**Abbildung 9** Zeitliche Verläufe der OGC-Konzentrationen aus Abbildung 4.3 begrenzt auf 1.000 mgC/m<sup>3</sup> an einem Kaminofen unter Prüfstandsbedingungen

Auch hier zeigt sich, dass die Konzentrationen von Abbrand zu Abbrand stark variieren können. Befindet sich neben Holzkohle auch noch nicht vollständig entgaster Brennstoff im Feuerraum, dies kann z.B. bei einer zu geringen Feuerraumbelastung in der Hauptverbrennungsphase oder bei der Verwendung von zu großen Holzstücken der Fall sein, treten im Ausbrand auch noch hohe Kohlenwasserstoffemissionen auf.

Um die bisher gezeigten Diagramme besser einordnen zu können, werden nachfolgend noch die CO<sub>2</sub>-Verläufe der durchgeführten Abbrände in Abbildung 10 gezeigt.



**Abbildung 10** Beispielhafte zeitliche Verläufe der CO<sub>2</sub>- Konzentrationen an einem Kaminofen unter Prüfstandsbedingungen

### 3.4 Grenzwerte

Ziel dieses Projektes ist es, für den zu entwickelnden Musterfeuerraum bzw. den daraus abgeleiteten Demonstrationsfeuerungen der beteiligten Hersteller, mindestens die Emissionsgrenzwerte der 2. Stufe der 1. BImSchV (siehe nachfolgende Tabelle 2) einzuhalten, welche ab 2015 gelten.

Diese betragen sowohl bei Kaminöfen (Raumheizer) als auch bei Kamineinsätzen und Kachelofeneinsätzen für Kohlenmonoxid 1,25 g/m<sup>3</sup> und für Staub 0,04 g/m<sup>3</sup> (jeweils bezogen auf 13 Vol.% Sauerstoff) und sind im Rahmen Typprüfung der Einzelraumfeuerungsanlagen nachzuweisen. Der Mindestwirkungsgrad wird im Vergleich zur 1. Stufe nicht mehr verschärft.

**Tabelle 2 Emissionsgrenzwerte und Mindestwirkungsgrade der 1. BImSchV für Einzelraumfeuerungsanlagen für feste Brennstoffe (Anforderungen bei der Typprüfung)**

Feuerstättenart	Technische Regeln	Stufe 1: Errichtung ab dem 22. März 2010		Stufe 2: Errichtung nach dem 31. Dezember 2014		Mindest- wirkungsgrad [%]
		CO [g/m <sup>3</sup> ]	Staub [g/m <sup>3</sup> ]	CO [g/m <sup>3</sup> ]	Staub [g/m <sup>3</sup> ]	
Raumheizer mit Flachfeuerung	DIN EN 13240 (Ausgabe Oktober 2005) Zeitbrand	2,0	0,075	1,25	0,04	73
Raumheizer mit Füllfeuerung	DIN EN 13240 (Ausgabe Oktober 2005) Dauerbrand	2,5	0,075	1,25	0,04	70
Speichereinzel- feuerstätten	DIN EN 15250/A1 (Ausgabe Juni 2007)	2,0	0,075	1,25	0,04	75
Kamineinsätze (geschlossene Betriebsweise)	DIN EN 13229 (Ausgabe Oktober 2005)	2,0	0,075	1,25	0,04	75
Kachelofeneinsätze mit Flachfeuerung	DIN EN 13229/A1 (Ausgabe Oktober 2005)	2,0	0,075	1,25	0,04	80
Kachelofeneinsätze mit Füllfeuerung	DIN EN 13229/A1 (Ausgabe Oktober 2005)	2,5	0,075	1,25	0,04	80

### 3.5 Emissionen

Für Österreich wurde anhand von Typprüfungen der Stand der Technik und Bestwerte bezüglich der Emissionen von chargenweise betriebenen Kaminöfen abgeschätzt, wie in Tabelle 3 dargestellt.

Dies bedeutet, dass die hier betrachteten Öfen unter den Bedingungen der Normprüfung im Mittel schon den CO-Grenzwert der 2. Stufe unterschreiten und im Mittel knapp über dem Staub-Grenzwert der 2. Stufe liegen. Die Bestwerte der Prüfberichte können beide Emissionsgrenzwerte der 2. Stufe einhalten.

Um die Unterschreitung von aktuellen Grenzwerten schon heute als Wettbewerbsvorteil nutzen zu können, lassen sich viele Hersteller freiwillig zertifizieren. Ein freiwilliges Qualitätszeichen ist z.B. „DIN Plus schadstoffarme Verbrennung“ (siehe Tabelle 4).

**Tabelle 3 Stand der Technik und Bestwerte für Kaminöfen in Österreich auf Basis von Typprüfungen (nach Aigenbauer, 2011)**

Quellen	§ 15a B-VG	Umweltzeichen	Stand der Technik: Mittelwert aus 33 positiv geprüften Öfen	Bestwerte aus Stand der Technik: Minimumwerte aus 33 Prüfberichte
<b>CO</b>				
[mg/MJ]	1.100	700	703	276
[mg/m <sup>3</sup> ] *	1.667	1.061	1.065	418
<b>OGC</b>				
[mg/MJ]	80	50	46	16
[mg/m <sup>3</sup> ] *	121	76	70	24
<b>Staub</b>				
[mg/MJ]	60	30	28	10
[mg/m <sup>3</sup> ] *	91	45	42	15

\* bezogen auf 13 Vol.% O<sub>2</sub>

§ 15a B-VG Vereinbarung für Österreich betreffend Kleinf Feuerungen vom 10. 6.1997

**Tabelle 4 Anforderungen an Emissionen und Wirkungsgrad des Qualitätszeichens DIN Plus für Feuerungen, die unter die DIN EN 13240 fallen (DIN CERTO, 2011)**

Emission	Anforderung DINplus	
CO	≥ 1,25 g/m <sup>3</sup>	
NO <sub>x</sub>	≥ 0,2 g/m <sup>3</sup>	
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	≥ 0.12 g/m <sup>3</sup>	
Staub	≥ 0,04 g/m <sup>3</sup>	
η	Zeitbrand	
	- Holz	≥ 78 %
	- fester mineralischer Brennstoff	≥ 76 %
	Dauerbrand	≥ 73 %



Die Emissionsgrenzwerte sind bezogen auf 13 Vol.% O<sub>2</sub> und stellen den Mittelwert aus den jeweiligen Einzelmesswerten der aufeinander folgenden Abbrandperioden nach DIN EN 13240 Tabelle A.2 dar.

Für Kachelofeneinsätze und Kamineinsätze gelten bei der DIN Plus- Zertifizierung nur teilweise strengere Grenzwerte als in der 1. Stufe der 1. BImSchV, die Grenzwerte für Kohlenmonoxid und Staub der 2. Stufe werden hierbei nicht erwartet, wie die nachfolgende Tabelle 5 zeigt.

**Tabelle 5 Anforderungen an Emissionen und Wirkungsgrad des Qualitätszeichens DIN Plus für Feuerungen, die unter die DIN EN 13229 fallen (DIN CERTO, 2011)**

Emission	Anforderung DINplus
CO	$\geq 1,5 \text{ g/m}^3$
NO <sub>x</sub>	$\geq 0,2 \text{ g/m}^3$
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	$\geq 0,12 \text{ g/m}^3$
Staub	$\geq 0,075 \text{ g/m}^3$
$\eta$	$\geq 78 \%$ bei Feuerstätten mit Nachheizflächen $\geq 72 \%$ bei Feuerstätten ohne Nachheizflächen



Die Emissionsgrenzwerte sind bezogen auf 13 Vol.% O<sub>2</sub> und stellen den Mittelwert aus den jeweiligen Einzelmesswerten der aufeinander folgenden Abbrandperioden nach DIN EN 13240 Tabelle A.2 dar.

## 4 CFD als Grundlage zur Optimierung kleiner Holzfeuerungen

CFD (Computational Fluid Dynamics = numerische Strömungsmechanik) ist die räumlich und, je nach Anwendung, auch zeitlich aufgelöste Simulation von Strömungsprozessen. Hierbei können die Strömungsprozesse laminar oder turbulent sein, von chemischen Reaktionen begleitet sein und es können auch mehrphasige Systeme untersucht werden.

Die Anwendung von CFD zur Berechnung von Strömungen ohne chemische Reaktionen ist schon lange in vielen Bereichen, wie etwa dem Flugzeug- und Automobilbau, etabliert. Das Anwendungsgebiet von CFD-Berechnungen hat sich in den letzten Jahren auch auf den Bereich der Biomasseverbrennung ausgedehnt. Mit der Simulation der Biomasseverbrennung mittels CFD beschäftigen sich z.B. das Institut für Verfahrenstechnik der TU Wien, die Hochschule Luzern und BIOS Bioenergiesysteme GmbH.

Die CFD-Modellierung der Holzverbrennung ist aufgrund des mehrstufigen und komplexen Verbrennungsverhaltens fester Biomasse sowie der turbulenten, reaktiven Strömung besonders schwierig.

Eine Strömungssimulation (zuerst ohne das Einbeziehen der vorhandenen chemischen Reaktionen) in der Konstruktionsphase hilft, ungünstige Strömungsverläufe zu erkennen und zu verbessern. Durch eine solche Strömungssimulation kann die Mischung von primärer und sekundärer Verbrennungsluft beurteilt werden - eine wichtige Größe für die Bewertung der Verbrennungsqualität.

Die strömungstechnisch optimierten Konstruktionen können durch eine Verbrennungssimulation noch genauer analysiert werden, indem zusätzliche Modelle für chemische Reaktionen integriert werden. Dadurch wird die Simulation jedoch deutlich aufwändiger. Hierzu wird Brennstoff eingebracht und im Modell mit der Verbrennungsluft oxidiert. Durch die Berücksichtigung von chemischen Reaktionen kommt das berechnete Temperaturprofil auch in der Verbrennungszone dem realen Temperaturprofil näher. Ausschlaggebend für die Güte des berechneten Profils sind dabei das eingesetzte Modell für die Verbrennungsrechnung und die Form der Brennstoffeinbringung. Allumfassende Ver-

brennungssimulationen führen jedoch zu Rechenzeiten von mehreren Wochen an Großrechnern. Deshalb wird oft von einfacher Gasverbrennung ausgegangen. Aber es ist auch schon möglich, aufwändigere Pyrolysemodelle mit berücksichtigter Feststoffverbrennung einzusetzen (Scharler, 2009).

Die Herausforderung hierbei ist für vereinfachende Verbrennungsmodelle experimentell oder empirisch ermittelte Parameter zu finden, welche die Ergebnisse nahe an die Realität heranbringen können. Aufwändigere CFD-Simulationen mit Einbeziehung chemischer Reaktionen erlauben so, neben der Visualisierung von Verbrennungstemperaturen, auch eine Darstellung der Verteilung von Schadstoffen und Regionen mit Sauerstoffmangel.

Nachfolgend sollen die Ziele bei der Optimierung mit Hilfe von CFD aufgelistet werden.

- möglichst turbulente und optimale Durchmischung von brennbarem Gas mit Sekundärluft ⇒ guter CO-Ausbrand
- Homogenisierung der Strömung über den Querschnitt, d.h. Wirbel sollen den gesamten Querschnitt erfassen / Vermeidung von Strähnen
- Verweilzeitberechnungen (das Verweilzeitspektrum sollte möglichst eng und die Verweilzeit ausreichend sein)
- Reduktion des Feuerungsvolumens, d.h. bestmögliche Ausnutzung der Feuerungsgeometrie
- Reduktion von lokalen Geschwindigkeits- und Temperaturspitzen
- Druckverlustoptimierung (die Einbauten dürfen nicht zu viel Druckverlust erzeugen, um so den Einsatz von Gebläsen zu vermeiden)
- Beurteilung von Sensitivitäten durch Parametervariationen, z.B. Lasteinfluss (Wirbel sollen bei Lastreduktion und somit reduzierter Strömungsgeschwindigkeit aufrechterhalten bleiben), Wassergehaltseinfluss im Brennstoff, Änderung der Luftstufung.

Aus der CFD-gestützten Entwicklung können sich folgende Vorteile ergeben:

- verminderte Emissionen durch verbesserte Durchmischung
- Reduktion des Luftüberschusses, da chargenweise beschickte Holzfeuerungen oft bei zu hohem Luftüberschuss betrieben werden
- erhöhter Anlagenwirkungsgrad
- kleinere Anlagenbauweise
- Reduktion von Entwicklungszeiten und Testaufwand
- erhöhte Sicherheit bei der Anlagenentwicklung
- besseres grundlegendes Verständnis bezüglich der Strömung in der Feuerung

- Verbesserung des Teillastverhaltens, d.h. Erweiterung des Lastbereichs in dem ein Betrieb ohne übermäßigen Emissionsanstieg möglich ist, denn dieser ist bisher oft noch relativ eng begrenzt.

Allerdings ist darauf zu achten, dass wichtige Strömungsphänomene, wie die Bildung von Wirbeln bzw. die Turbulenz (siehe Abbildung 11), korrekt erfasst werden, da diese Effekte die Strömung und damit die Verbrennungsqualität maßgeblich beeinflussen. Deshalb ist es empfehlenswert, CFD-Berechnungen durch Experimente zu validieren. Die in der eingesetzten Software Ansys Fluent verfügbaren Turbulenzmodelle zeigt Abbildung 12.

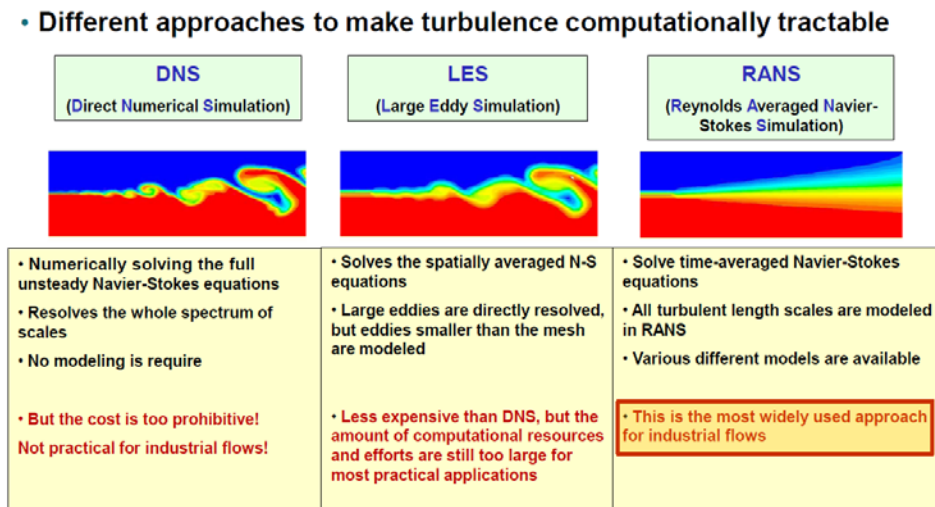
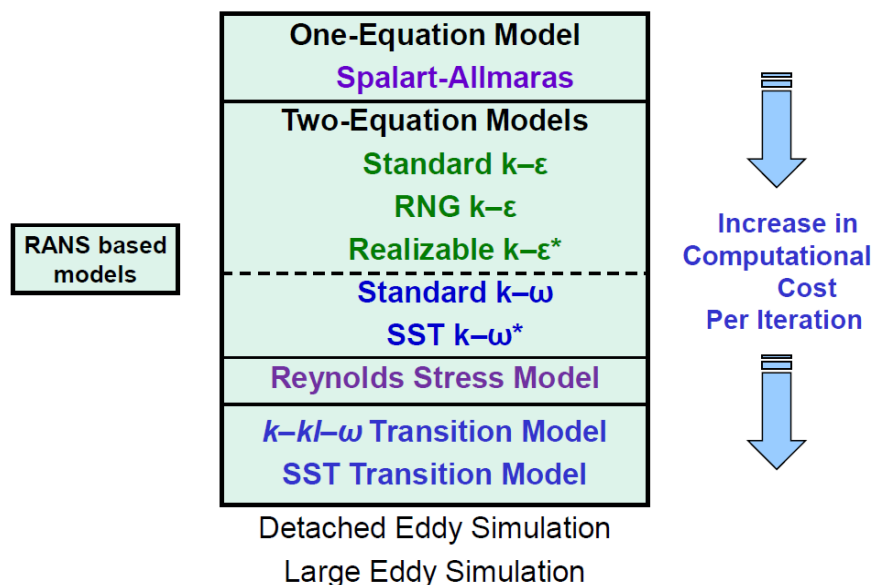


Abbildung 11 Überblick zur Turbulenzmodellierung (Ansys, 2011)



\* Recommended choice for standard cases

Abbildung 12 Turbulenzmodelle in Software Ansys Fluent (Ansys, 2011)

Experimente können an realen Anlagen oder an Modellen durchgeführt werden, wobei Modellexperimente wesentlich flexibler und kostengünstiger sind. Allerdings muss die Einhaltung der Ähnlichkeitsbedingungen (wie der geometrischen, kinematischen und dynamischen Ähnlichkeit) sichergestellt werden, so dass die Ergebnisse mit der Realität vergleichbar sind. Experimente erlauben zum Beispiel eine Visualisierung und optische Erfassung der Strömung durch Zugabe von Aerosolen.

#### **4.1 Ermittlung geeigneter Einstellungen für die Kaltsimulation**

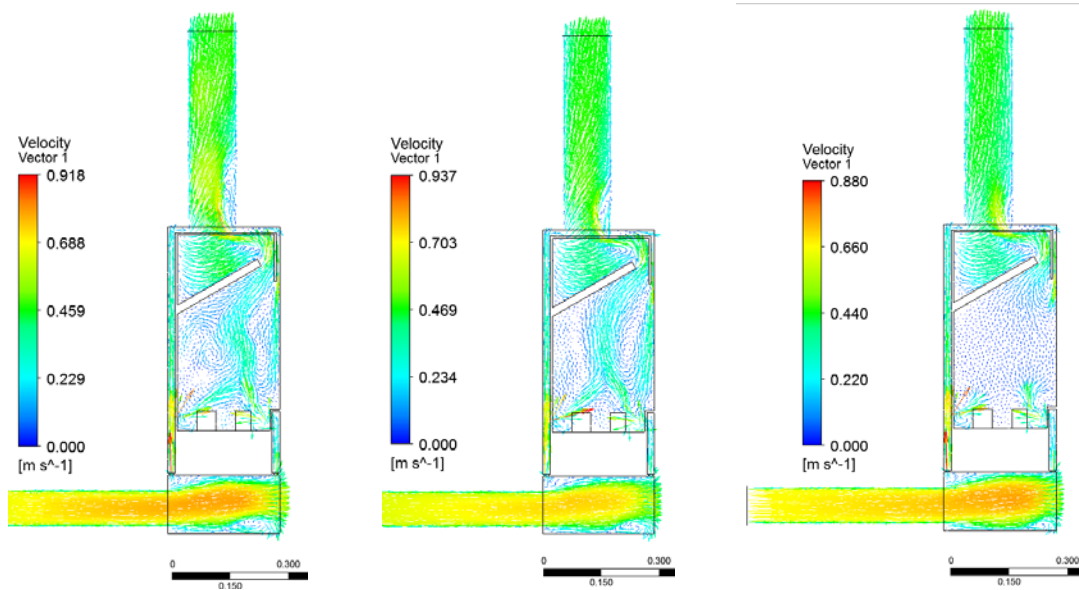
Die Simulation erfordert bezüglich der verwendeten Geometrie, des verwendeten Netzes und der verwendeten Einstellungen ein iteratives Vorgehen. Es geht darum, bei der Simulation alle Vereinfachungen die möglich sind zu nutzen, solange trotzdem sinnvolle Ergebnisse generiert werden.

Bei der Vernetzung soll ein möglichst grobes Gitter gewählt werden. Hierzu wird zunächst mit einer Kaltsimulation begonnen. Dies bedeutet, dass keine Energiegleichung gelöst werden muss, so dass die Ergebnisse aufgrund kurzer Rechenzeiten schnell erhalten werden können. Je mehr Zellen vorhanden sind, umso aufwändiger wird die Simulation. Ein zu grobes Gitter liefert jedoch falsche Ergebnisse. Deshalb ist ein iteratives Vorgehen notwendig um mit einem Gitter zu rechnen, das zwar ausreichend genaue Ergebnisse liefert, aber auch nicht unnötig fein ist.

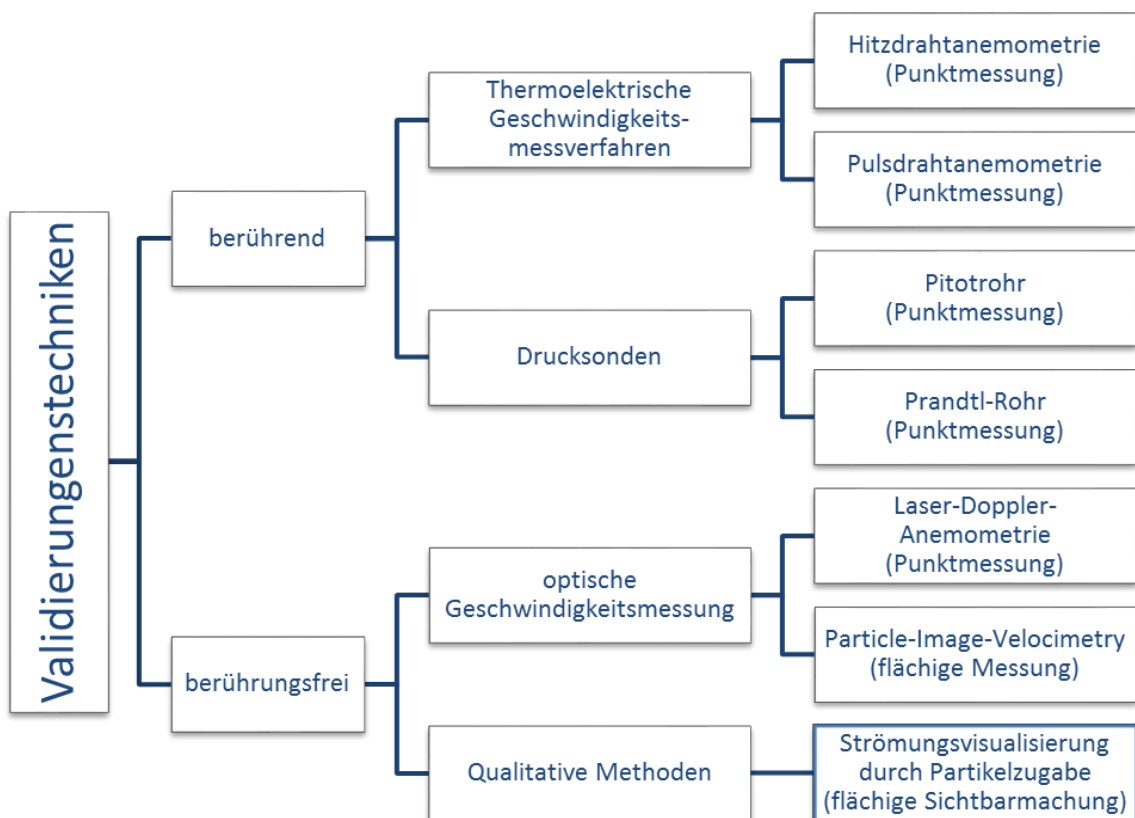
Ein weiterer wichtiger Einflussparameter ist die Wahl des Turbulenzmodells. Auch dieses beeinflusst unter Umständen sehr deutlich das Simulationsergebnis, wie die nachfolgende Abbildung 13 illustriert. Dieser Effekt, dass die Scheibenspülung unter Umständen je nach Turbulenzmodell nicht mehr funktioniert, zeigt sich besonders bei niedrigem Schornsteinzug (Unterdruck im Schornstein), welcher bei Naturzug üblicherweise bei geringen Abgastemperaturen, z.B. in der Anbrandphase oder beim Anheizen des Ofens, auftritt.

Welches Turbulenzmodell für die Simulation geeignet ist, lässt sich leider nicht ohne weiteres beantworten. Dies kann nur durch eine geeignete Validierung der Simulation durch reale Versuche entschieden werden. Deshalb wurden eigene Untersuchungen durchgeführt, in der die Validierung von Kaltsimulationen am Plexiglasmodell eines Kaminofens untersucht wurden (Dietl, 2012). Aus den infrage kommenden Validierungstechniken (siehe Abbildung 14) wurde die Strömungsvisualisierung durch Partikelzugabe ausgewählt. Zum einen, weil flächige Verfahren einer Punktmessungen deutlich überlegen sind, zum anderen weil dieses Verfahren doch deutlich weniger aufwändig ist, wie das ebenfalls flächige Verfahren der PIV (Particle-Image-Velocimetry). Der Nachteil der Strömungsvisualisierung gegenüber der PIV ist aber, dass keine quantitativen Messdaten, sondern nur qualitative Informationen gewonnen werden können. Diese sind jedoch ausreichend um die grundsätzliche Richtigkeit der Strömungsphänomene zu beurteilen.



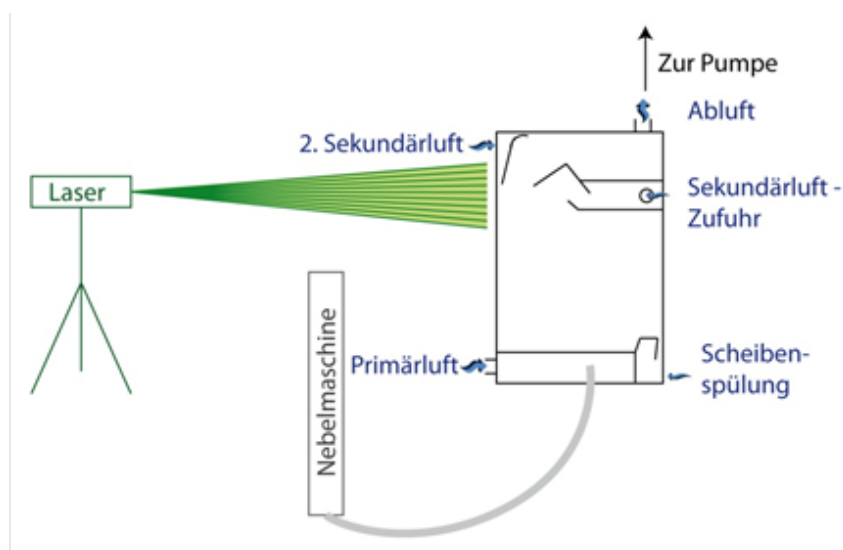


**Abbildung 13** Vergleich von Simulationsergebnissen (Geschwindigkeitsvektoren) mit drei unterschiedlichen Turbulenzmodellen bei 3 Pa Unterdruck im Schornstein, laminar (links), k-omega SST (mittig) und k-epsilon Realizable (rechts)

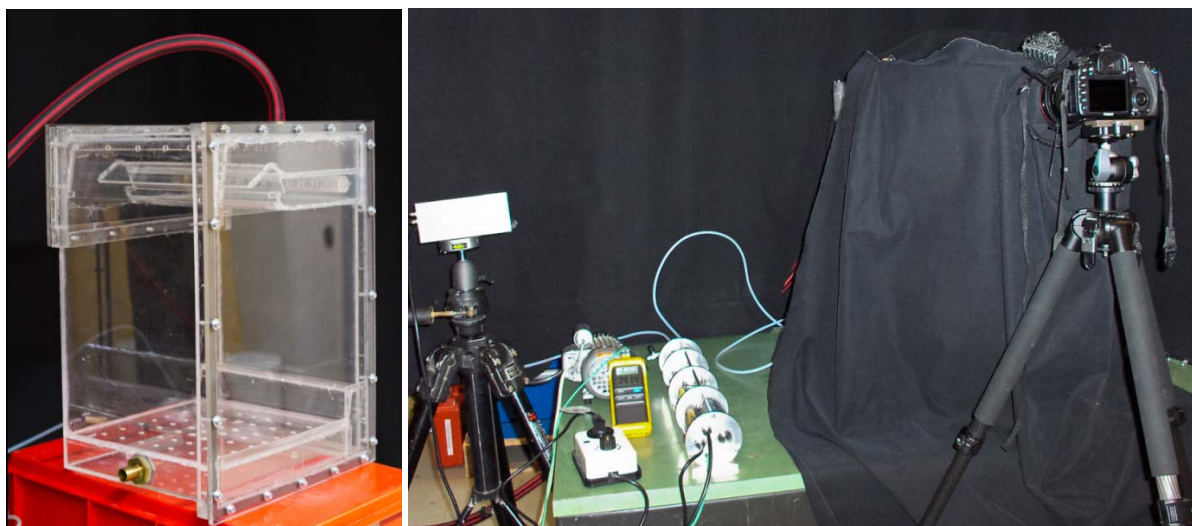


**Abbildung 14** Techniken zur Validierung einer Kaltsimulation an einem Kaltmodell (Dietl, 2012)

Für die Untersuchungen mit Strömungsvisualisierung wurde ein Plexiglasmodell eines Feuerraumes mit Rost und verschiedenen Positionen der Luftzugabe aufgebaut. Durch die Partikelzugabe mit einer Nebelmaschine wird im Plexiglasmodell ein Nebel unter dem Rost (Funktion von Primärluft) erzeugt. Der Nebel reflektiert das grüne Licht des aufgefächerten Lasers. Saubere Luft, die von außen in der Funktion als Scheibenluft oder weitere Sekundärluft zuströmt, erscheint durch die Abdunkelung des Plexiglasmodells mit einem Überwurf schwarz. In Abbildung 15 und Abbildung 16 wird der Versuchsaufbau zur Validierung der Kaltsimulation dargestellt.

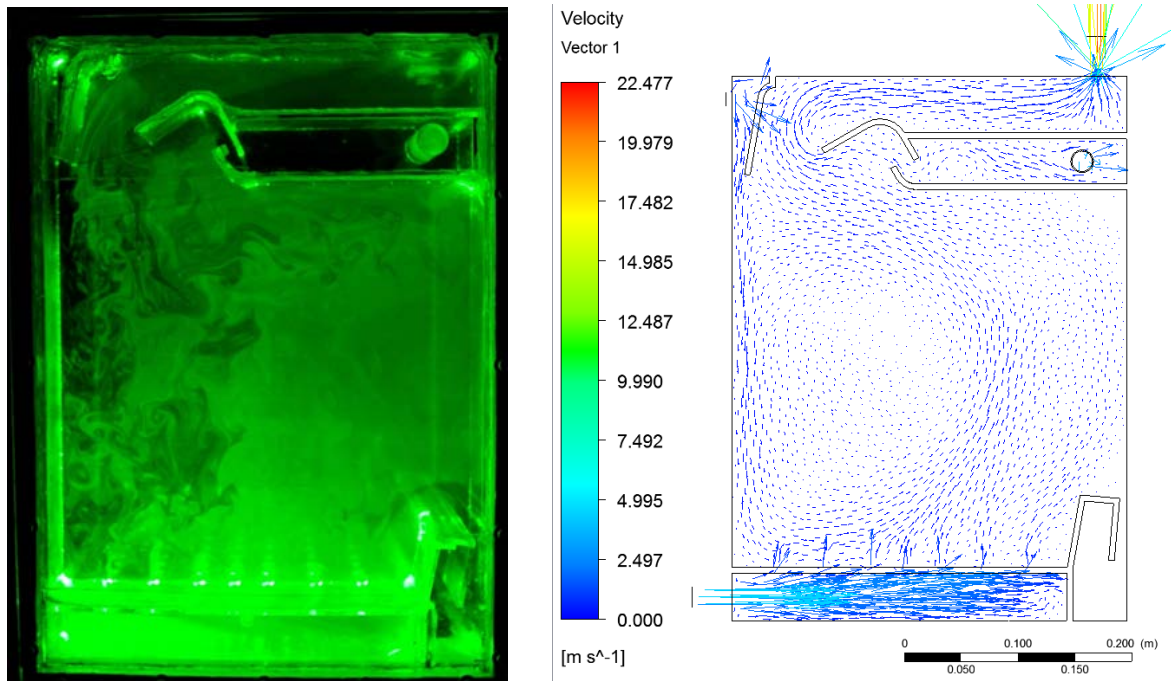


**Abbildung 15 Schematischer Versuchsaufbau zur Validierung von Kaltsimulationen am Plexiglasmodell**



**Abbildung 16 Plexiglasmodell (links) und Versuchsaufbau mit Laser (linkes Stativ) und Kamera (rechtes Stativ) sowie Nebelmaschine (mittig) zur Validierung von Kaltsimulationen am Plexiglasmodell**

In der nachfolgenden Abbildung 17 wird ein Bildausschnitt aus einem aufgenommenen Video gezeigt, welches nun mit Simulationsergebnissen verglichen werden kann. Hauptsächlich wurden das Turbulenzmodell k-omega SST und das Turbulenzmodell k-epsilon Realizable verwendet, welche für Anwender von Ansys besonders empfohlen werden. Die Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Turbulenzmodellen wurden mit den Versuchsergebnissen am Plexiglasmodell verglichen.



**Abbildung 17 Videoausschnitt aus Validierungsvideo (links) und zugehöriges Simulationsergebnis (rechts)**

Hierbei wurden unterschiedliche Kombinationen der vier verschiedenen Lufteinlässe (Primärluft, Scheibenspülung, Sekundärluft und zweite Sekundärluft) bei zwei unterschiedlichen abgesaugten Volumenströmen (8 und 15 m<sup>3</sup>/h) untersucht. Es konnte belegt werden, dass die grobe Strömungsstruktur sowohl mit dem Turbulenzmodell k-epsilon Realizable als auch mit k-omega SST realistisch wiedergegeben wird.

Beide Turbulenzmodelle können keine feinen Wirbel abbilden, wie sie im realen Versuch vorhanden sind. Dies ist jedoch bei Verwendung der genannten Turbulenzmodelle aus dem Bereich RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation) auch nicht zu erwarten. Denn es ergibt sich bei den hier durchgeführten stationären Simulationen mit RANS-Turbulenzmodellen eine zeitliche und räumliche Mittelung der tatsächlichen Strömung, siehe hierzu Abbildung 11. Der Vorteil des RANS-Ansatzes ist ein handhabbarer Rechenaufwand bei noch ausreichend genauen Ergebnissen. Genauere Turbulenzmodelle bedeuten leider für praktische Anwendungen einen zu hohen Rechenaufwand.

## 4.2 Entwicklung eines Reaktionsmodells

Um nicht nur die Strömung, sondern auch die Temperatur-, Sauerstoff- und CO-Verteilung in den Reaktionszonen bewerten zu können ist es erforderlich, ein Reaktionsmodell und ein Strahlungsmodell zu implementieren. Dabei wird Kohlenmonoxid als Leitkomponente zur Bewertung der Vollständigkeit der Verbrennung herangezogen.

Die Qualität der Simulationsergebnisse hängt stark von den zugrunde liegenden Strömungs- und Reaktionsmodellen, dem mathematischen Rechengitter und den festzulegenden Randbedingungen ab. Für die Durchführung einer Simulationsrechnung bedarf es ein hohes Maß an Erfahrung und Wissen, um plausible Rechenergebnisse zu generieren, denn die Simulationsrechnungen werden mit vereinfachten chemischen Modellen und globalen Reaktionsmechanismen durchgeführt. Dabei kommt es teilweise zu einer Überschätzung der Temperaturen und der CO-Konzentrationen. Damit ist die Aussagekraft der Simulationsergebnisse bezüglich der absoluten Höhe der CO-Werte begrenzt. Allerdings können konstruktive Änderungen mit relativ geringem Aufwand umgesetzt werden. Die Simulationsergebnisse können dann mit einem definierten Anfangszugstand verglichen werden, wodurch eine Bewertung der Konstruktionsänderungen möglich ist.

Um Erfahrungen in der Simulation zu erlangen, wurden verschiedene Voruntersuchungen an einem Ofenmodell durchgeführt. So wurden die Einflüsse der Wandtemperatur bzw. der Wandmaterialien, der Strahlung, des Schornsteinzuges (Unterdruck im Schornstein) und unterschiedliche Turbulenzmodelle untersucht. Diese Voruntersuchungen wurden mit den in der Software voreingestellten Werten durchgeführt. Als Brenngas wurde ausschließlich Methan freigesetzt. Hierbei hat sich gezeigt, dass die CO-Emissionen deutlich zu gering sind und die Emissionen von unverbranntem Methan relativ hoch sind. Jedoch können trotzdem Tendenzen zu mehr bzw. weniger Emissionen aufgrund von Parametervariationen erkannt werden. Um plausible Werte zu erhalten, musste das Reaktionsmodell und die Brenngaszusammensetzung den Gegebenheiten besser angepasst werden.

Als Reaktionsmodell wurde daher eine 2-Schritt Reaktion von Methan gewählt. Dabei reagiert Methan mit Sauerstoff zu Kohlenmonoxid und Wasser. Das Kohlenmonoxid reagiert dann im 2. Schritt mit Sauerstoff zu Kohlendioxid. An Hand einer typischen Elementarzusammensetzung von Buchenstückholz kann, unter Annahme einer vollständigen Verbrennung, eine Massenbilanzgleichung aufgestellt und die Brenngaszusammensetzung bestimmt werden. Allerdings ist dann das Verhältnis von Methan zu Kohlenmonoxid noch zu bestimmen. Dieses Verhältnis wird dadurch eindeutig gelöst, in dem der  $\text{CO}_{2\text{max}}$  des Brenngases, d.h. die maximal erreichbare Kohlendioxidkonzentration im Abgas bei einer vollständigen Verbrennung, den gleichen Wert wie bei Holzbrennstoffen annimmt.

### **4.3 Einstellungen für Teilmodelle und Randbedingungen bei der CFD-Modellierung**

Im Rahmen der Verbrennungssimulation gilt es verschiedene Annahmen zu treffen und Einstellungen für die Teilmodelle der CFD-Modellierung auszuwählen. Für die hier vorgestellten Simulationen wurde als Species Model die Einstellung Finite-Rate/Eddy Dissipation ausgewählt.

Beim einfachsten in Fluent vorhandenen Species Model (Eddy Dissipation) wird die Vereinfachung getroffen, dass „gemischt gleich verbrannt“ gilt. Jedoch ist für die hier betrachtete Anwendung diese Vereinfachung nicht geeignet, da die Verbrennung in einem Kaminofen nicht nur durch die Mischung (Turbulenz) limitiert wird, sondern eben auch durch Temperatur und Zeit.

Somit ist es notwendig, ein genaueres Verbrennungsmodell zu verwenden. Das Modell mit dem nächsthöheren Rechenaufwand ist die gewählte Einstellung Finite Rate/Eddy Dissipation, bei welchem auch die Reaktionskinetik berücksichtigt wird.

Bei den nachfolgenden Simulationen wird vereinfachend eine Methanverbrennung wie oben beschrieben angenommen.

Als Turbulenzmodell wurde, soweit nicht anders angegeben, das k-omega SST verwendet, welches seine prinzipielle Eignung in den Versuchen am Kaltmodell bewiesen hat (siehe auch Dietl, 2012).

Als Randbedingungen wurden, sofern nicht anders angegeben, am Lufteinlass des Simulationsgebietes 0 Pa angenommen und am Abgasauslass ein Unterdruck von 12 Pa. Die Verbrennungsluft wurde stets mit 293 Kelvin (20°C) zugeführt.

Zur Modellierung von Strahlung wurde das Modell Discrete Ordinates verwendet.

## **5 CFD als Entwicklungswerkzeug bei Kleinf Feuerungsanlagen**

Aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen soll ein Konzept einer verbrennungstechnisch optimierten Feuerung (Musterfeuerraum) entwickelt werden. Dieser Musterfeuerraum dient den im Projekt beteiligten Herstellern als Grundlage zur Umsetzung der Erkenntnisse in drei marktfähige Bauarten von Feuerstätten (Kaminofen, Kamin-Heizeinsatz, Kachelofen-Heizeinsatz).

Allerdings hat sich im Laufe des Projektes gezeigt, dass ein gemeinsamer Musterfeuerraum für alle drei Feuerungsarten nicht in Einklang zu bringen ist. Die Anforderungen bezüglich Scheibengröße und Feuerraumgeometrie sind je nach Feuerungstyp unterschiedlich. Daher wurden von drei Feuerstättenherstellern je ein 3-D-Modell einer bestehenden Feuerstätte zur Verfügung gestellt. Diese wurden dann in eine lauffähige CFD-Strömungssimulation überführt. Dieser Istzustand der jeweiligen Feuerung sollte dann mit Modifikationen der ursprünglichen Konstruktionen verglichen werden. Durch diese Strategie können Auswirkungen einer Konstruktionsänderung in Bezug auf die Reduzierung der Emissionen erarbeitet werden. Nachfolgend sollen die Feuerungen beschrieben werden.

## 5.1 Kamineinsatz

Als Vertreter der Kamineinsätze wurde von der Firma LEDA Werk GmbH & Co. KG Boekhoff & Co. die Feuerung Sera 100 zur Verfügung gestellt. Die Feuerung weist einen breiten, niedrigen Feuerraum, mit einer Sichtscheibe auf (siehe Abbildung 18). Die Feuerung besitzt keinen Rost, das Holz wird auf einen muldenförmigen Schamotteboden gelegt. Die Verbrennungsluft gelangt von einem zentralen Anschluss über Luftvorwärmkammern an die Scheibe und über weitere Luftkanäle an die Rückseite. Die Abgase gelangen durch eine Umlenkung in der Haube in das Abgasrohr.

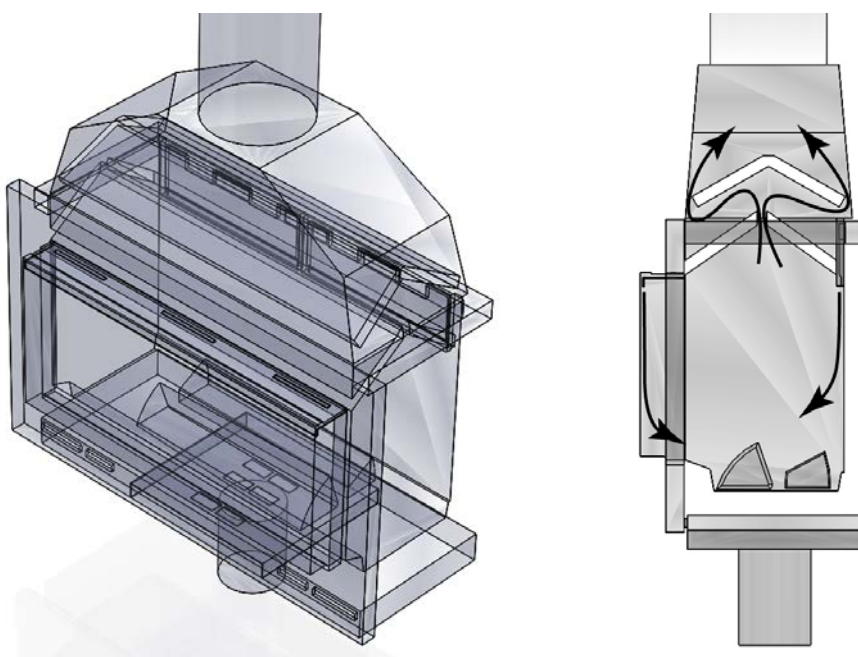


Abbildung 18 Kamineinsatz Sera 100 von Leda als 3D-Modell

Der Kamineinsatz ist für Stückholz mit einer maximalen Länge von 50 cm geeignet. Die feuerungstechnischen Daten sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6 Technische Daten für Kamineinsatz Sera 100 von Leda

Nennwärmeleistung (NWL)	12 kW
Abgasstutztemperatur	260 °C
Mindestförderdruck bei NWL	12 Pa
CO-Gehalt bei 13 Vol.% O <sub>2</sub>	<1.250 mg/m <sup>3</sup>
Wirkungsgrad	>78 %
Gesamtstaub	<40 mg/m <sup>3</sup>

Dieser Kamineinsatz musste von einer vereinfachten CAD-Konstruktion in ein CFD-konformes Modell überführt werden. Dabei wurde der Fluidraum mit allen relevanten Geometrien als ein zusammenhängendes Bauteil neu erstellt. Anschließend konnte dieser Volumenkörper mit Hilfe einer Vernetzer-Software in ein mathematisches Rechengitter

überführt werden. Die Größe und damit die Anzahl der Zellen wurden mit Hilfe von Qualitätskriterien für das Gitter bestimmt. So sollte die Schiefe der Zellen kleiner 0,85 und die orthogonale Qualität größer 0,20 betragen. Der Feuerraum besteht damit aus knapp 910.000 Zellen.

Für die richtige Berechnung der Wandtemperatur und damit verbunden des Wärmetransports an die Umgebung müssen Randbedingungen für jede Fläche definiert werden. Ebenso muss die Vorwärmung der Verbrennungsluft in den Luftkanälen durch geeignete Randbedingungen abgeschätzt werden. In Tabelle 7 sind beispielhaft einige Randbedingungen des Kamineinsatzes Sera 100 des Herstellers Leda aufgeführt.

**Tabelle 7 Beispiel von Randbedingungen der Wände am Modell Sera 100 von Leda**

Position	Material	Randbedingung	Wert
Feuerraumwand	Vermiculite	Wärmedurchgangskoeff. Umgebungstemp. Emissionsgrad $\varepsilon$	7,7 W/(m <sup>2</sup> K) 300 K 0,84
Feuerraumboden	Schamotte	konst. Temperatur	773 K
Umlenkplatte	Vermiculite	konst. Wärmedurchgang Emissionsgrad $\varepsilon$	0,0 W/m <sup>2</sup> 0,84
Scheibe	Borosilikatglas	Wärmedurchgangskoeff. Umgebungstemp. Emissionsgrad $\varepsilon$	6,3 W/(m <sup>2</sup> K) 300 K 0,93
Haube	unleg. Stahl	Wärmedurchgangskoeff. Umgebungstemp. Emissionsgrad $\varepsilon$	8,4 W/(m <sup>2</sup> K) 300 K 0,657
Sekundärluftkanal	unleg. Stahl	konst. Temperatur	423 K

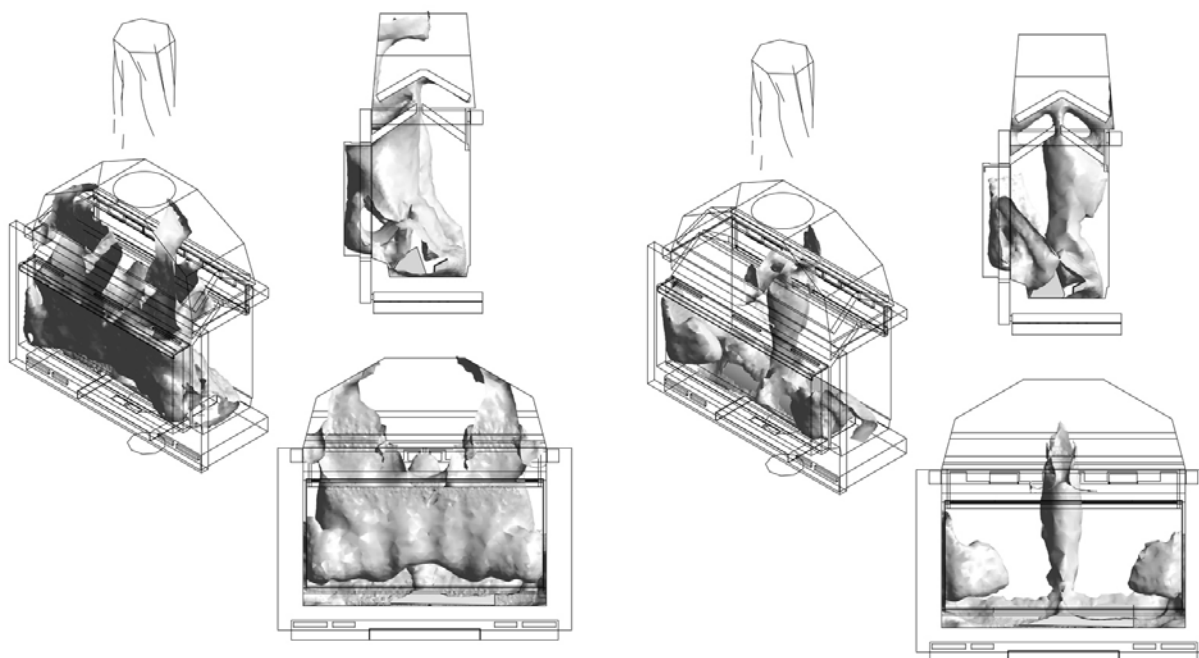
Die Randbedingungen für die Massenströme der Verbrennungsluft und des Brenngases sind in Tabelle 8 aufgeführt. Der Energieinhalt des Brennstoffgemisches entspricht einer Feuerungswärmeleistung von 14 kW.

**Tabelle 8 Randbedingungen für Massenströme am Modell Sera 100 von Leda**

Eingangsgröße	Massenstrom	Temperatur
Verbrennungsluft bei 12 Vol.% O <sub>2</sub> im Abgas	Luft 9,6 g/s	293 K
Brennstoffgemisch (als Ersatz für Holz- brennstoffe)	CO 0,46 g/s CH <sub>4</sub> 0,19 g/s CO <sub>2</sub> 0,23 g/s H <sub>2</sub> O 0,19 g/s	973 K

Mit aufgeführten Randbedingungen wurden für die Originalkonstruktion Simulationsrechnungen durchgeführt. Abbildung 19 (links) zeigt die Isoflächen der Kohlenmonoxidkonzentration im Kamineinsatz, d.h. Flächen mit gleicher Kohlenmonoxidkonzentration. Die Originalkonstruktion weist einen ausgeprägten Bereich mit hohen Konzentrationen von Kohlenmonoxid auf.

Durch die Ergebnisse der Simulationsrechnungen lässt sich die Ursache für die hohen Kohlenmonoxidkonzentrationen ermitteln, was bei einem Prototyp auf dem Prüfstand nur durch hohen messtechnischen Aufwand möglich ist. Abbildung 19 (rechts) zeigt die Isoflächen des Sauerstoffgehalts mit einer Konzentration von kleiner 6 Vol.%.



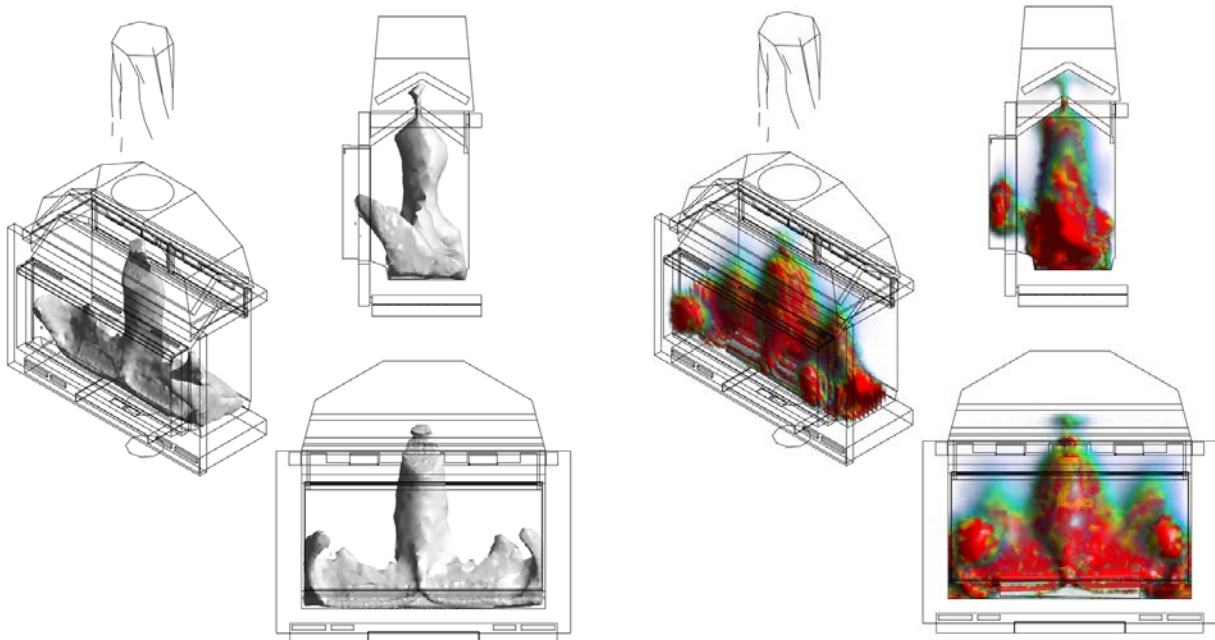
**Abbildung 19 Isoflächen der Konzentration von Kohlenmonoxid (links) und des Sauerstoffes kleiner 6 Vol.% (rechts) der Originalkonstruktion des Modells Sera 100 von Leda**

Im Fall des Kamineinsatzes sind die ausgeprägten Bereiche mit hohen Konzentrationen an Kohlenmonoxid nicht durch Luftmangelsituationen zu erklären, denn im Bereich hoher CO-Werte liegt die Sauerstoffkonzentrationen über 6 Vol.%. Entscheidend für eine vollständige Oxidation sind die Temperaturen im Brennraum (Abbildung 20, links). Diese sind im Bereich hoher Kohlenmonoxidkonzentrationen deutlich unter 650°C und damit zu gering für eine vollständige Oxidation von CO. Die Reaktionen finden überwiegend in den heißen Bereichen im Brennraum statt, siehe Abbildung 20 (rechts). Sobald die Gase durch die Umlenkplatte in die Haube gelangen, findet keine nennenswerte Reduktion von Kohlenmonoxid mehr statt. Im Umkehrschluss heißt dies, dass die Oxidation von Kohlenmonoxid im Brennraum im Bereich hoher Temperaturen und damit knapp oberhalb des Holzes stattfinden muss.

Zur Verbesserung des Emissionsverhaltens muss die Strömung im Brennraum dahingehend verändert werden, dass die noch nicht vollständig oxidierten Gase in den heißen Bereich geführt werden. In der Originalkonstruktion entstehen drei Hauptströmungen im Brennraum, in der Mitte und spiegelbildlich aus der Stirnseite des Holzes (vgl. Bilderfolge in Abbildung 21). Die mittlere Hauptströmung gelangt über die Gesamtlänge des Holzes nahezu vollständig nach oben in die Umlenkungsplatten (Schritt 1) und von dort aus in das Abgasrohr (Schritt 2). In der Mitte entsteht ein kleiner Bereich mit einer Rückströmung, was sehr vorteilhaft ist, da sich hier die Aufenthaltszeit in Bereichen mit hohen



Temperaturen erhöht (Schritt 2 / 3). Die Strömung aus dem Stirnholz gelangt an die Seitenwand (Schritt 1) und bildet dort im Scheibenbereich einen kleineren lokalen Wirbel (Schritt 2 / 3), der sich dann zur Mitte hin ausbreitet. (Schritt 4).



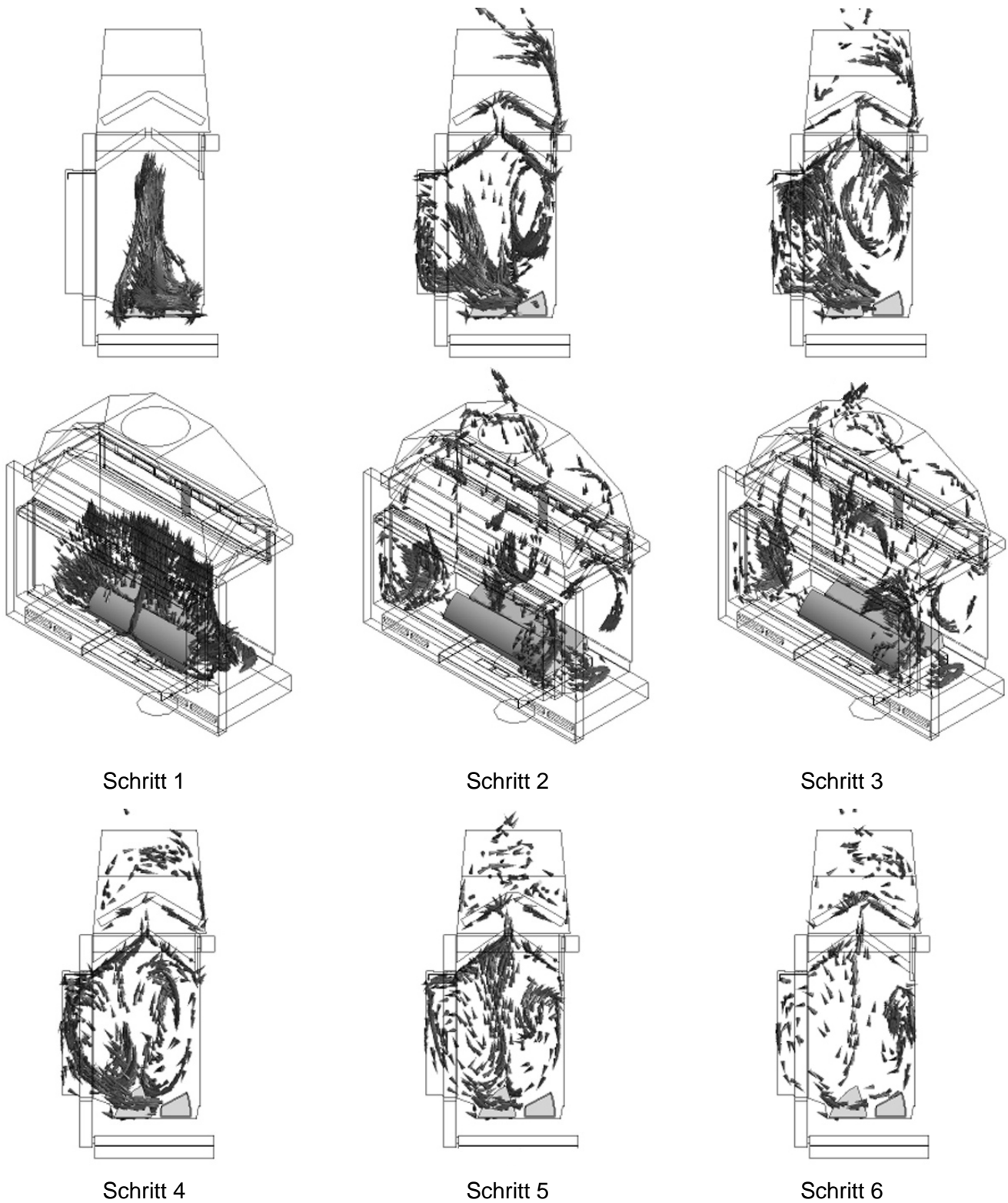
**Abbildung 20 Isoflächen der Temperatur größer 650°C (links) und freigesetzte Reaktionsenergie (rechts) der Originalkonstruktion vom Modell Sera 100 von Leda**

Bevor dieser allerdings in den heißen Bereich in der Mitte der Feuerung gelangt, strömt der überwiegende Teil über die Umlenplatte in die Haube (Schritt 5 / 6).

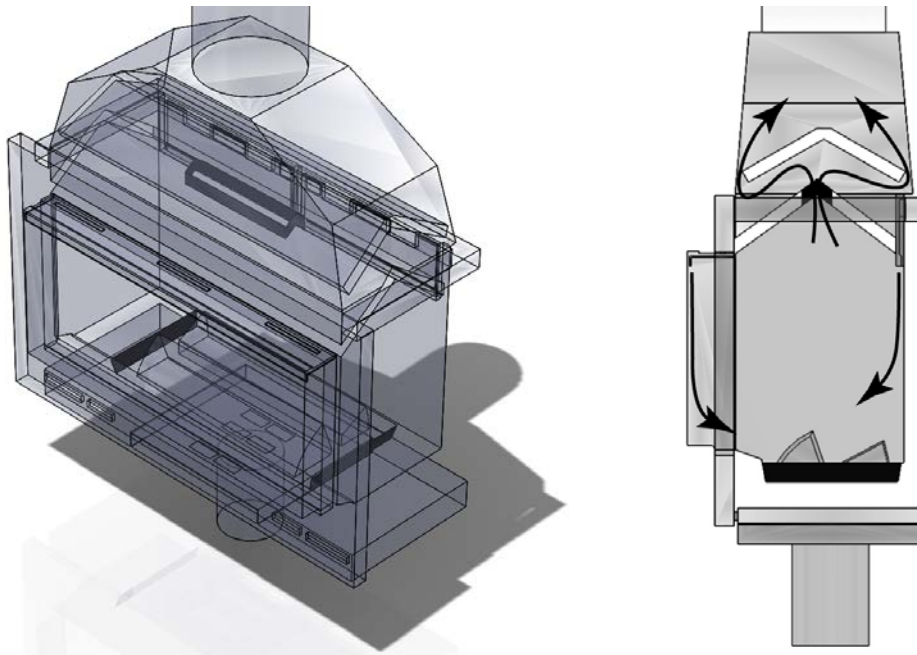
Bei der Modifikation wurde die grundlegende Strömungsführung der Scheibenluft und der hinteren Luft beibehalten (vgl. Abbildung 22). Um die seitliche Strömung in den heißen Bereich zu führen, wurde der Spalt der ersten Umlenkung nicht über die ganze Länge der Feuerung ausgeführt. Die modifizierte Öffnung weist eine Länge von 300 mm auf und die Breite wurde um 38 mm vergrößert, um den gleichen Querschnitt gegenüber der Originalkonstruktion zu haben. Zusätzlich wurde der Feuerraumboden als Mulde ausgeführt. Dadurch werden die Holzgase aus der Stirnseite nach oben abgelenkt und es wird eine zentrische Positionierung der Holzstücke vom Betreiber erzwungen.

Beim modifizierten Kamineinsatz zeigt sich bei gleichen gesetzten Randbedingungen ein anderes Bild der Isoflächen für Kohlenmonoxid (vgl. Abbildung 23 links). Der Bereich mit hohen Konzentrationen an Kohlenmonoxid ist deutlich kleiner und kompakter geworden. Die Bereiche mit geringen Sauerstoffkonzentrationen konnten gegenüber der Originalkonstruktion zusätzlich verkleinert werden (vgl. Abbildung 23 rechts). Die Bereiche mit hohen Temperaturen (vgl. Abbildung 24 links) sind deckungsgleich mit den Bereichen hoher Kohlenmonoxidkonzentrationen. Die Reaktionen finden somit ebenfalls hauptsäch-

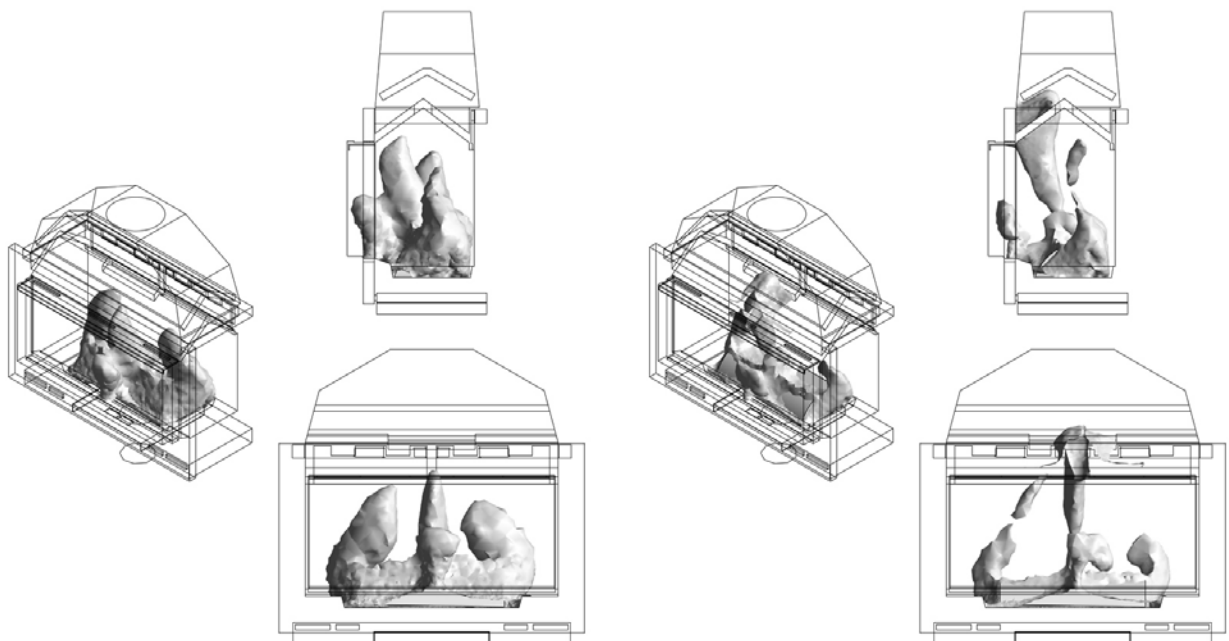
lich im Brennraum statt, allerdings konnte jetzt ein kompakter Reaktionsbereich in der Mitte der Feuerung geschaffen werden.



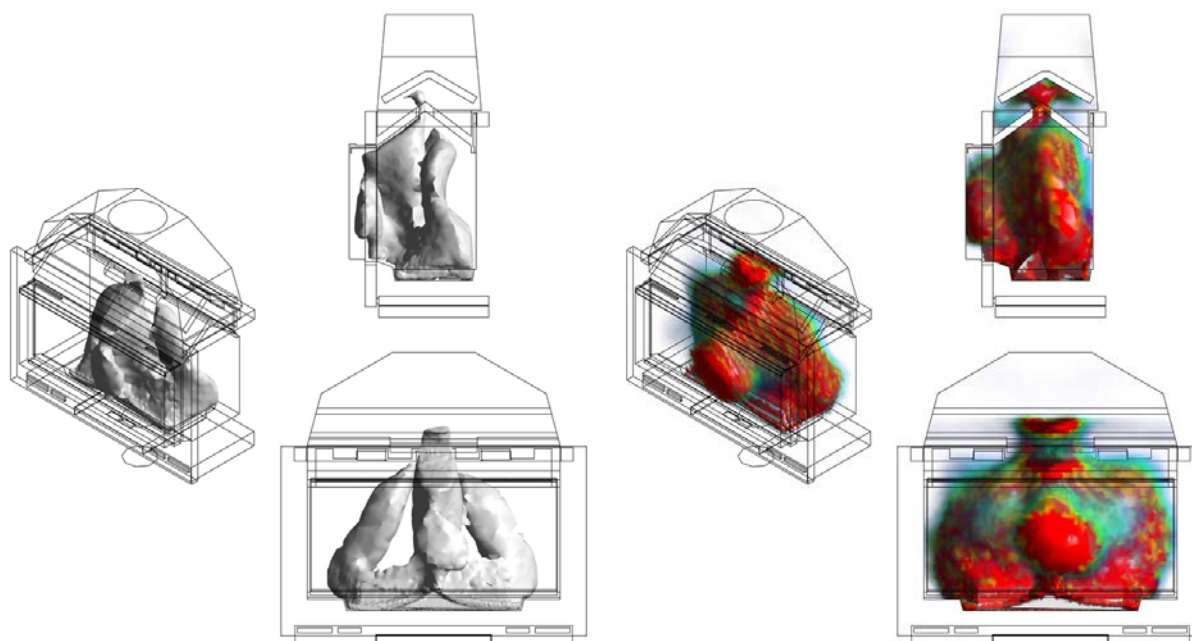
**Abbildung 21** Strömungsvorgänge beim Kamineinsatzes Sera 100 in der Originalkonstruktion



**Abbildung 22** Kamineinsatz Sera 100 mit Modifikation M1 als 3D-Modell



**Abbildung 23** Isoflächen der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (links) und des Sauerstoffs kleiner 6 Vol.% (rechts) beim Kamineinsatz Sera 100 mit Modifikation M1



**Abbildung 24 Isoflächen der Temperatur größer 650°C (links) und freigesetzte Reaktionsenergie (rechts) beim Kamineinsatz Sera 100 mit Modifikation M1**

Die Strömung hat sich dahingehend geändert, dass die Brenngase eher in den mittleren Bereich der Feuerung strömen. Somit bilden sich zwei Rückströmbereiche auf der Länge des Holzes aus (vgl. Bilderfolge in Abbildung 25). Inwiefern sich durch die Modifikation z.B. die Anbrennphase verändert, kann derzeit mit Hilfe der Simulationsrechnungen nicht bewertet werden.

Die Simulationsrechnungen beim Kamineinsatz wurden für verschiedene Luftüberschusszahlen  $\lambda$  erstellt. Die Ergebnisse der Berechnungen für CO wurden auf einen definierten Anfangszustand nach Gleichung (1), in diesem Fall auf  $\lambda = 2,2$ , normiert. Damit ergibt sich ein Kurvenverlauf, wie er in Abbildung 26 zu sehen ist. Die ursprüngliche Konstruktion des Kamineinsatzes weist für CO ein Minimum bei einer Luftüberschusszahl von  $\lambda = 1,65$  auf, was ca. 8 Vol.% Restsauerstoffgehalt im Abgas entspricht. Wird der Kamineinsatz im Luftmangelbereich (Luftüberschusszahl  $\lambda = 1,45$ ) oder im Luftüberschuss (Luftüberschusszahl  $\lambda = 2,2$ ) betrieben, so ist ein starker Anstieg der berechneten CO-Konzentration zu verzeichnen.

$$CO_{norm} = \frac{\dot{m}_{CO \text{ bei } \lambda_n}}{\dot{m}_{CO \text{ bei } \lambda_0}} \left[ \frac{\frac{kg}{s}}{\frac{kg}{s}} \right] \quad (1)$$

Durch die Modifikation M1 konnten die berechneten CO-Konzentrationen gegenüber dem Anfangszustand deutlich reduziert werden. Auch die modifizierte Feuerung weist ein CO-Minimum bei der Luftüberschusszahl von  $\lambda = 1,65$  auf.

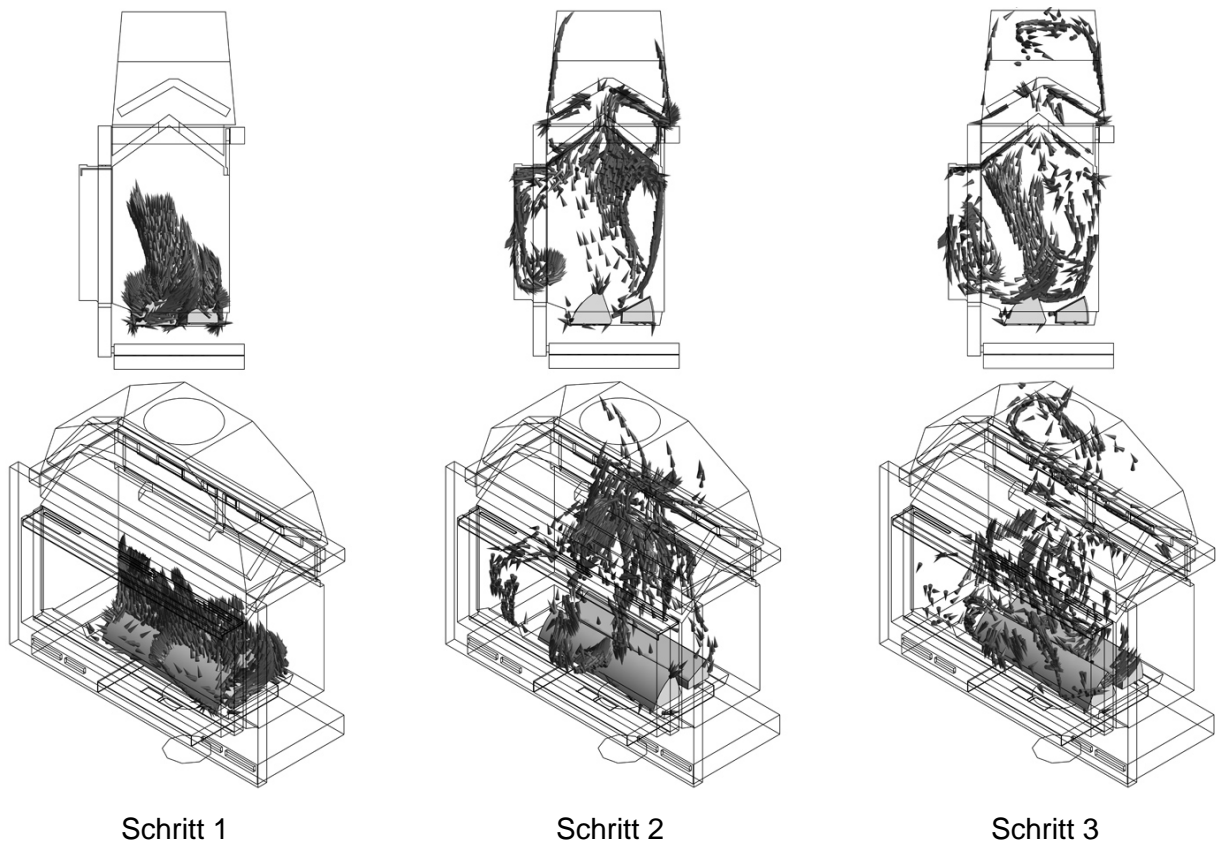


Abbildung 25 Strömungsvorgänge beim Kamineinsatz Sera 100 mit Modifikation M1

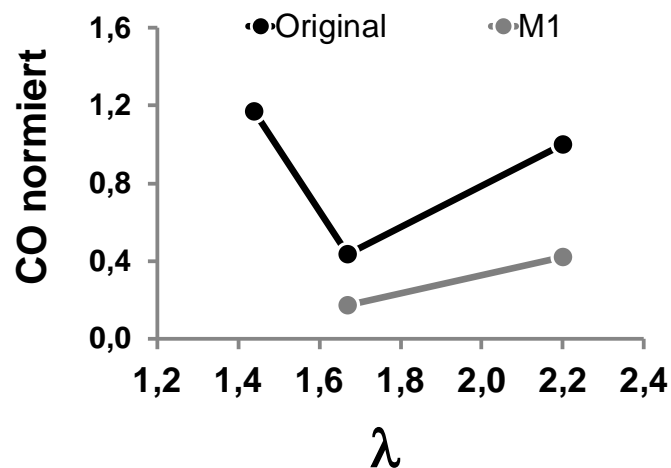


Abbildung 26 normierte CO-Konzentration in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl  $\lambda$  beim Kamineinsatz im Original und in der modifizierten Version M1

Allerdings ist die Minderung der CO-Konzentration im Vergleich zur Luftüberschusszahl  $\lambda = 2,2$  nicht so ausgeprägt, wie dies bei der Originalkonstruktion der Fall ist. Diese Charakteristik lässt die Vermutung zu, dass bei der Originalkonstruktion die Verbrennungsluft sehr genau eingestellt werden muss, um das CO-Minimum zu erreichen. Die Modifizierte Feuerung weist hingegen ein robusteres Emissionsverhalten auf.

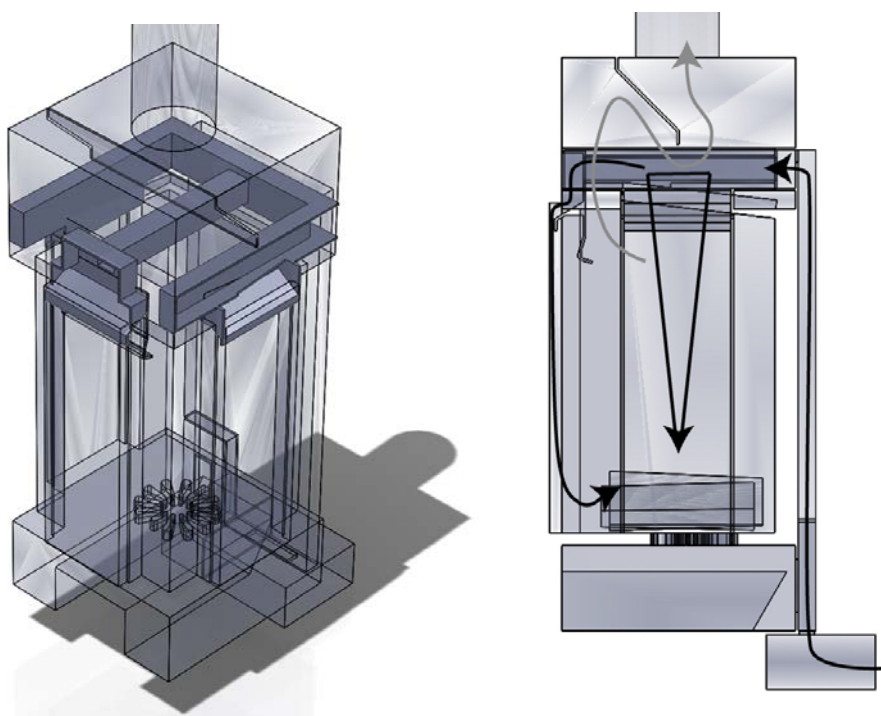
Für die Simulation der modifizierten Feuerung bei einer Luftüberschusszahl von  $\lambda = 1,45$  wurde kein plausibles Ergebnis erhalten, da die Simulationsergebnisse nicht konvergierten. Der Grund für die Divergenz ist in der Qualität des Netzes zu begründen. Obwohl die Qualität befriedigend ist, ist bei sehr geringen Gasmassenströmen eine höhere Qualitätsanforderung an das Netz zu stellen.

## 5.2 Kaminofen

Als Vertreter für Kaminöfen wurde von der Firma Hase Kaminofenbau GmbH das Modell Modena zur Verfügung gestellt. Die Feuerung weist einen schlanken, hohen Feuerraum mit drei Sichtscheiben auf (siehe

Abbildung 27). Die Feuerung besitzt einen Fächerrost, der über einen Schieber verschlossen werden kann. Die Primär- und Sekundärluft sind über Schieber unabhängig voneinander einzustellen. Die Sekundärluft wird über die Rückwand in den oberen Bereich geführt und dort w-förmig auf die drei Sichtscheiben geführt. Die Gase gelangen über eine Umlenkplatte in die Haube und von dort aus nach einer weiteren Umlenkung in das Abgasrohr (Strömungsführung siehe grauer Pfeil in

Abbildung 27 rechts). Durch die Umlenkung in der Haube wird der Luftkanal der vorderen Scheibenluft umströmt und dadurch vorgewärmt. Zusätzlich wird die Aufenthaltszeit in der Haube für eine bessere Wärmeabgabe erhöht.



**Abbildung 27 Kaminofen Modena von Hase als 3D-Modell**

Der Kaminofen ist für Stückholz mit einer maximalen Länge von 30 cm geeignet. Die feuerungstechnischen Daten sind in Tabelle 9 aufgelistet.

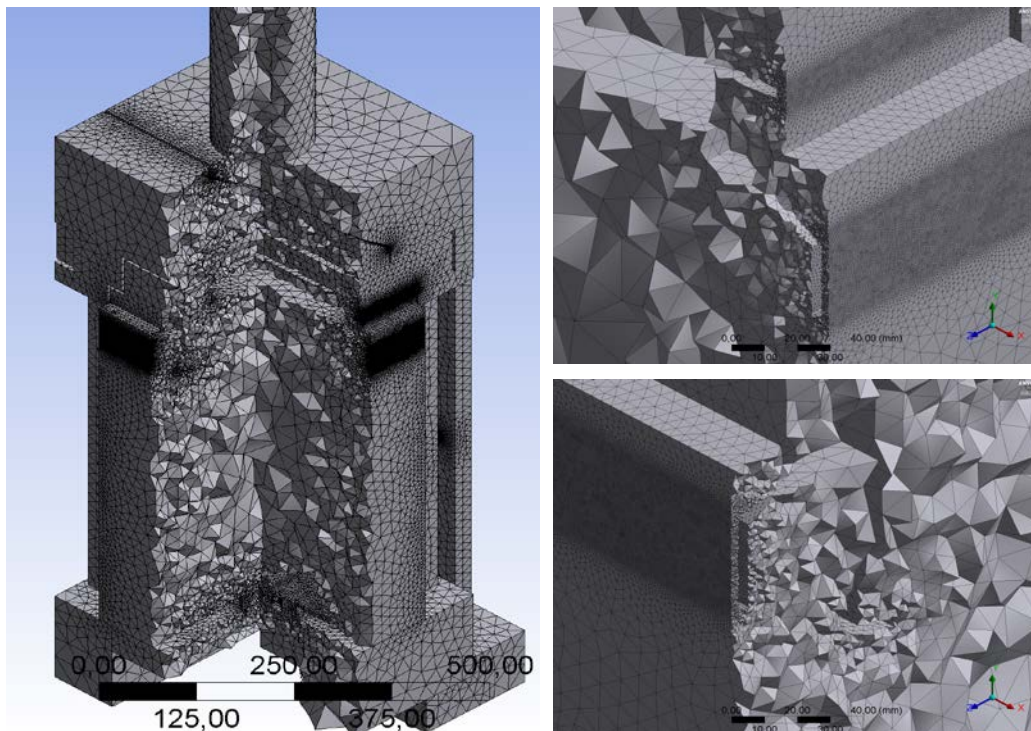
**Tabelle 9 Technische Daten für Kaminofen Modena von Hase**

Nennwärmeleistung (NWL)	8 kW
Abgasstutztemperatur	350 °C
Mindestförderdruck bei NWL	11 Pa
CO-Gehalt bei 13 Vol.% O <sub>2</sub>	1.125 mg/m <sup>3</sup>
Wirkungsgrad	79 %
Gesamtstaub	62 mg/m <sup>3</sup>

Auch der Kaminofen musste von einer CAD-Konstruktion für die Fertigung in ein CFD-konformes Modell überführt werden. Dabei wurde der Fluidraum mit allen relevanten Geometrien als ein zusammenhängendes Bauteil neu erstellt. Anschließend konnte dieser Volumenkörper mit Hilfe einer Vernetzer-Software in ein mathematisches Rechengitter überführt werden.

Die Größe und damit die Anzahl der Zellen wurden mit Hilfe von Qualitätskriterien für das Gitter bestimmt. So sollte gegenüber dem Kamineinsatz die Qualität des Netzes verbessert werden, um auch für kleine Massenströme eine konvergente Lösung zu erhalten. Daher sollte die Schiefe der Zellen kleiner 0,80 und die orthogonale Qualität größer 0,20 betragen. Der Feuerraum besteht damit aus knapp 1,6 Mio. Zellen, Abbildung 28 zeigt das erstellte Rechengitter für den Kaminofen.

Bei Kleinf Feuerung ist es aufwendig, ein Rechengitter mit möglichst wenigen Zellen aber mit einer ausreichenden Qualität zu generieren. Die Besonderheit bei Kleinf Feuerungsanlagen liegt in den vergleichsweise kleinen Querschnitten für die Luftkanäle, gerade im Bereich der Scheibenluft und den im Vergleich hierzu großen Volumina im Brennraum.



**Abbildung 28 Rechengitter für Kaminofen Modena von Hase**

Daher wurde bei diesem Modell globale Netzparameter gewählt und die sehr kleinen Querschnitte im Bereich der Scheibenluft lokal verfeinert (vgl. Abbildung 28 rechts).

Für die richtige Berechnung der Wandtemperatur, und damit verbunden des Wärmetransports an die Umgebung, müssen Randbedingungen für jede Fläche definiert werden. Ebenso muss die Vorwärmung der Verbrennungsluft in den Luftkanälen durch geeignete Randbedingungen abgeschätzt werden. In Tabelle 10 sind beispielhaft einige gewählte Randbedingungen für die Simulationsrechnungen beim Kaminofens Modena des Herstellers Hase aufgeführt.

**Tabelle 10 Beispiel von Randbedingungen der Wände am Modell Modena von Hase**

Position	Material	Randbedingung	Wert
Feuerraumwand	Vermiculite	Wärmedurchgangskoeff. Umgebungstemp. Emissionsgrad $\varepsilon$	5,5 W/(m <sup>2</sup> K) 300 K 0,84
Feuerraumboden	Guss GGG40	konst. Temperatur Emissionsgrad $\varepsilon$	643 K 0,78
Umlenkplatte	Vermiculite	konst. Wärmedurchgang Emissionsgrad $\varepsilon$	0,0 W/m <sup>2</sup> 0,84
Scheibe	Borosilikatglas	Wärmedurchgangskoeff. Umgebungstemp. Emissionsgrad $\varepsilon$	7,7 W/(m <sup>2</sup> K) 300 K 0,64
Haube	unleg. Stahl	Wärmedurchgangskoeff. Umgebungstemp. Emissionsgrad $\varepsilon$	7,0 W/(m <sup>2</sup> K) 300 K 0,79
Sekundärluftkanal	unleg. Stahl	konst. Temperatur	503 K

Die Randbedingungen für die Massenströme der Verbrennungsluft und des Brenngases sind in Tabelle 11 aufgeführt. Der Energieinhalt des Brennstoffgemisches entspricht einer Feuerungswärmeleistung von 10 kW.

**Tabelle 11 Randbedingungen der Massenströme am Modell Modena von Hase**

Eingangsgröße	Massenstrom	Temperatur
Verbrennungsluft bei 10 Vol.% O <sub>2</sub> im Abgas	Luft 6,2 g/s davon 10 % Primärluft	293 K
Brennstoffgemisch (als Ersatz für Holz- brennstoffe)	CO 0,33 g/s CH <sub>4</sub> 0,13 g/s CO <sub>2</sub> 0,17 g/s H <sub>2</sub> O 0,13 g/s	973 K

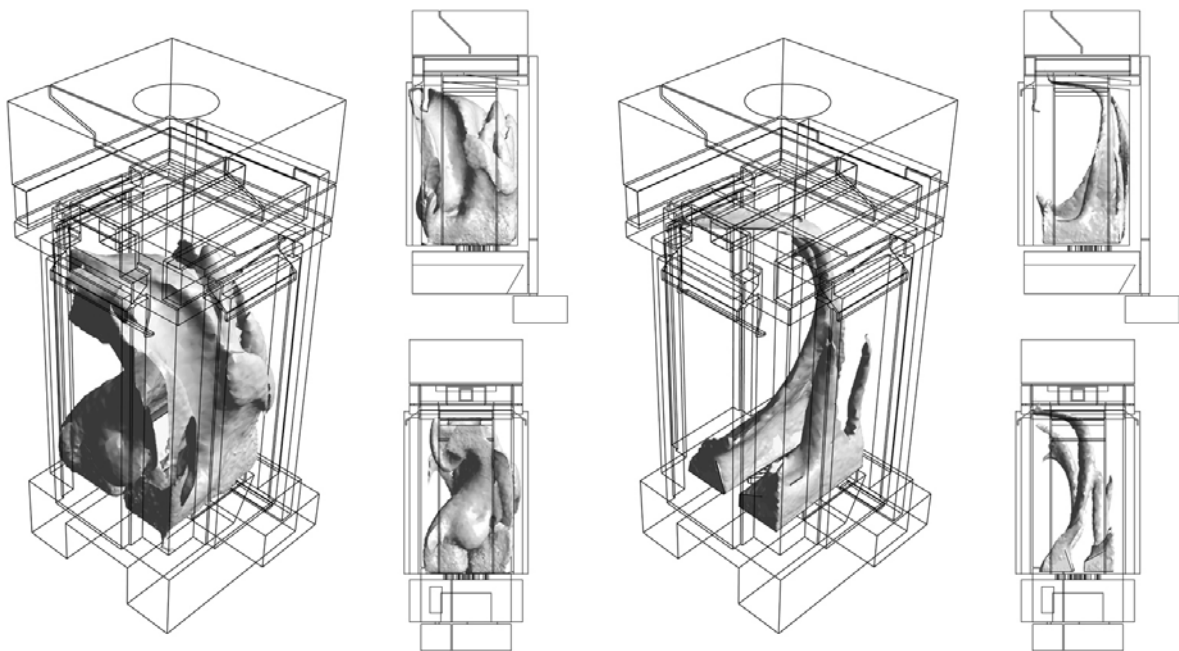
Mit den aufgeführten Randbedingungen wurden für die Originalkonstruktion Simulationsrechnungen durchgeführt. Abbildung 29 (links) zeigt die Isoflächen der Kohlenmonoxidkonzentration im Kaminofen. Die Originalkonstruktion weist einen ausgeprägten Bereich mit hohen Konzentrationen von Kohlenmonoxid auf, die beinahe den gesamten Feuerraum ausfüllt. Wird der Bereich mit niedrigen Sauerstoffkonzentrationen (Abbildung 29



rechts) betrachtet, so kann kein ausgeprägter Bereich ausgemacht werden. Einzig eine Strähne beginnend aus dem hinteren linken Bereich zieht sich durch den gesamten Feuerraum bis zur linken Scheibenluft.

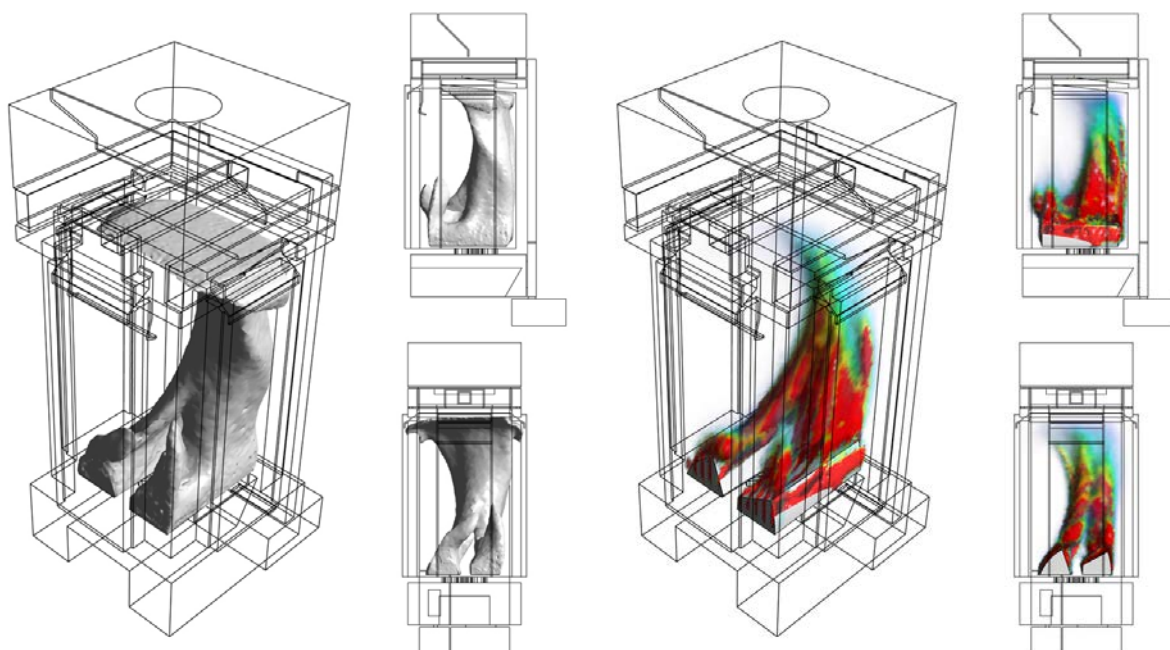
Entscheidend für eine vollständige CO-Oxidation ist die Temperatur im Feuerraum. Abbildung 30 (links) zeigt die Isoflächen der Temperatur mit Werten größer  $650^{\circ}\text{C}$  in der Originalkonstruktion. Bereiche mit hohen Temperaturen sind in der Originalkonstruktion hauptsächlich im Rückwandbereich zu finden. In diesem Bereich finden auch hauptsächlich die Reaktionen statt (vgl. Abbildung 30 rechts).

Das Vorhandensein des kleinen Bereichs hoher Temperatur im Rückwandbereich liegt sicherlich darin begründet, dass der Kaminofen drei Sichtscheiben aufweist. Hierdurch wird viel Wärme aus dem Feuerraum an die Umgebung abgegeben. Eine Verbesserung des Emissionsverhaltens des Kaminofens ist damit bei gleichzeitiger Wahrung des Designs nur äußerst schwer zu erreichen. Um trotzdem eine Verbesserung zu erreichen, wurde der obere Sekundärluftkanal dahingehend geändert, dass eine bessere Vorwärmung der Sekundärluft stattfindet.



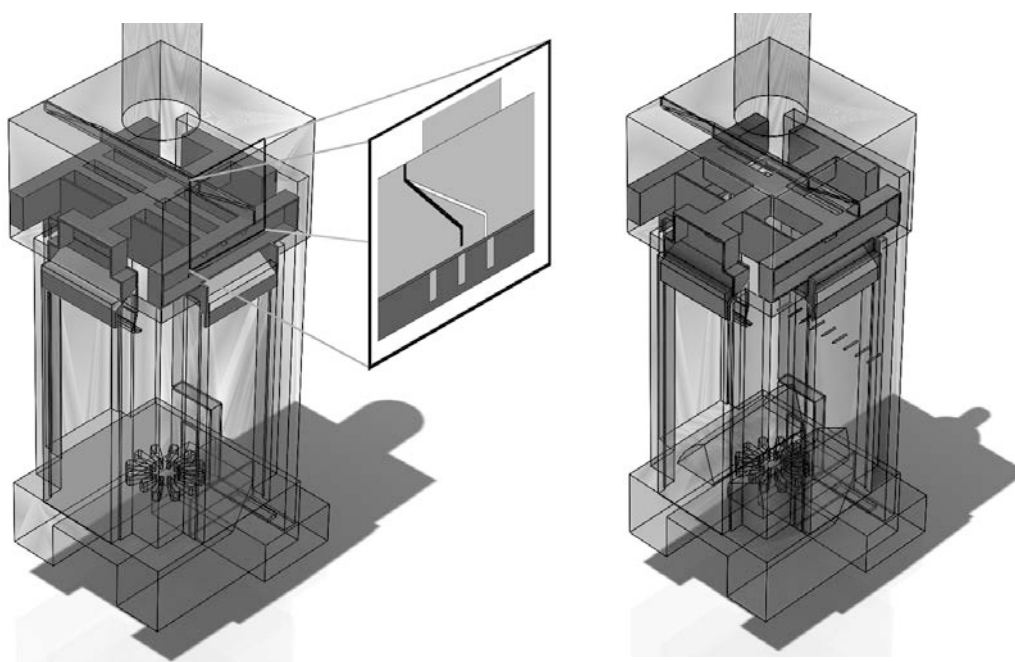
**Abbildung 29 Isoflächen der Konzentration von Kohlenmonoxid (links) und des Sauerstoffs kleiner 6 Vol.% (rechts) der Originalkonstruktion des Modells Modena von Hase**

Die Seitenkanäle des w-förmigen Sekundärkanals für die seitliche Scheibenluft in der Originalkonstruktion wurde in der modifizierten Version durch drei orthogonal verlaufende Kanäle geändert (vgl. Abbildung 31 links). Zusätzlich wurde im Durchgang zwischen Brennraum und Haube ein Blech eingebracht, damit die Abgase vollständig in die Haube gelangen und dann die orthogonalen Luftkanäle gleichmäßig umströmen.



**Abbildung 30** Isoflächen der Temperatur größer 650°C (links) und freigesetzte Reaktionsenergie (rechts) der Originalkonstruktion vom Modell Modena von Hase

Damit die orthogonalen Luftkanäle vollständig umströmt werden, wird das Umlenklech in der Haube neu positioniert. Um den erhöhten Strömungswiderstand durch die neue Luftführung zu kompensieren, wurde der Spalt der vorderen Scheibenluft von 8 mm auf 5 mm verringert.

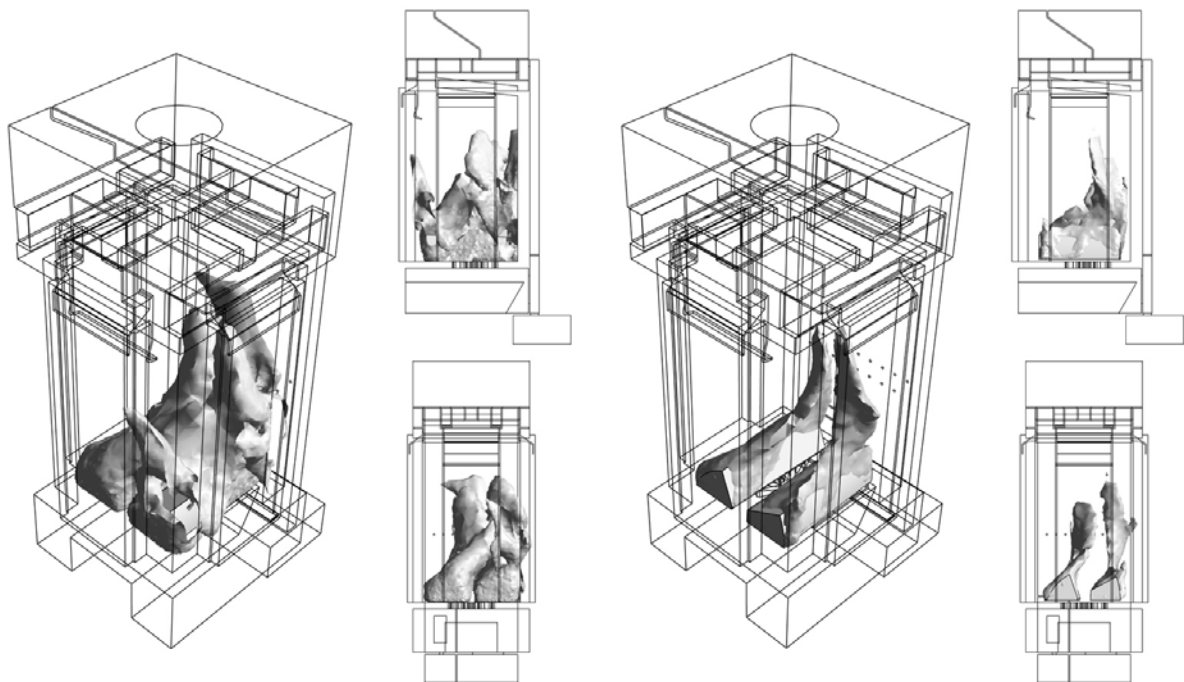


**Abbildung 31** Kaminofen Modena mit Modifikation M1 (links) und M2/M3 (rechts)

Der Spalt der seitlichen Scheibenluft wurde bei 5 mm belassen. Ebenso wurde das obere Umlenblech in der Haube für eine erzwungene Strömung verlängert um damit eine bessere Luftvorwärmung zu erreichen (vgl. Abbildung 31 - Detail: schwarz = Original; weiß = Modifikation M1-M3).

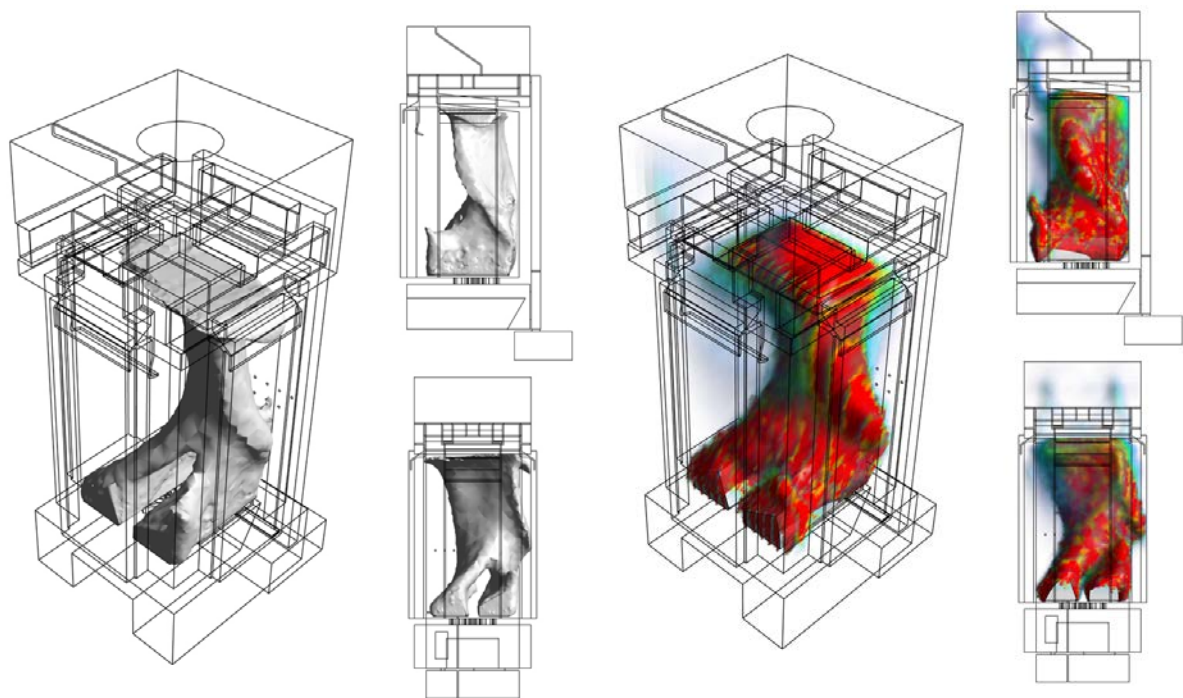
Aus fertigungstechnischen Gründen wurden in der Modifikation M2/M3 die drei orthogonalen Luftkanäle zu einem Luftkanal zusammengefasst. Zusätzlich wurden bei der Modifikation M3 noch Luftlöcher in die Rückwand eingebracht, um die Sauerstoffkonzentration im hinteren Bereich der Feuerung zu erhöhen.

Die Simulationsergebnisse sollen an der Modifikation M3 diskutiert werden. Abbildung 32 (links) zeigt die Isoflächen der Kohlenmonoxidkonzentration bei dieser Modifikation. Die Bereiche hoher CO-Konzentrationen (links) und geringer Sauerstoffkonzentrationen (rechts) konnte gegenüber der Originalkonstruktion verkleinert werden.



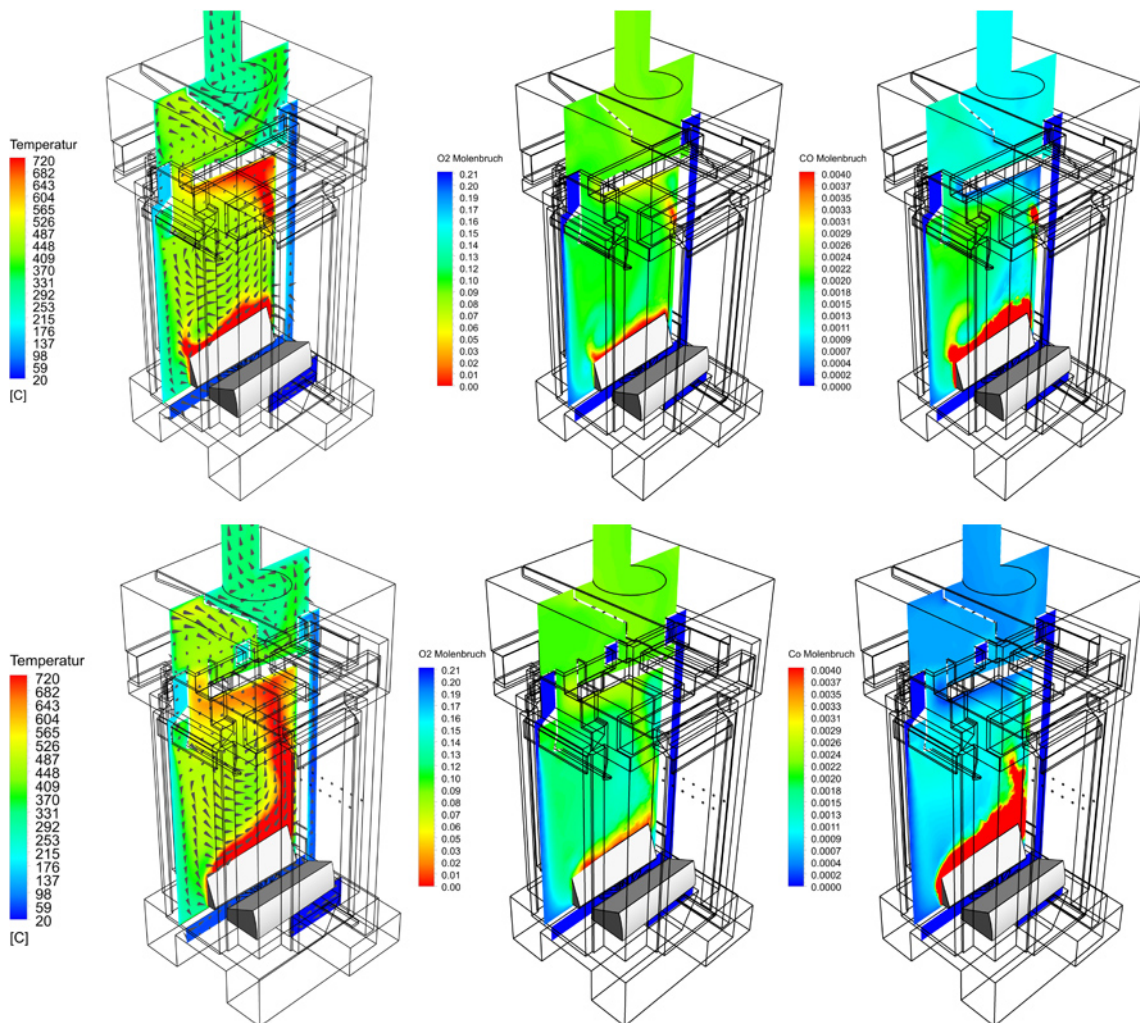
**Abbildung 32 Isoflächen der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (links) und des Sauerstoffs kleiner 6 Vol.% (rechts) beim Kaminofen Modena mit Modifikation M3**

Die Reaktionen finden nahezu im gesamten Feuerraum statt (Abbildung 33 rechts). Trotz der zusätzlichen Vorwärmung der Sekundärluft konnte der Bereich von Temperaturen größer 650°C nicht vergrößert werden (vgl. Abbildung 33 links). Durch die Betrachtung der Temperaturbereiche sowie der Verteilung der Sauerstoff- und CO-Konzentrationen im Feuerraum mit Hilfe von Konturflächen, lassen sich die Unterschiede zwischen Originalkonstruktion und Modifikation M3 beim Kaminofen Modena ausmachen.



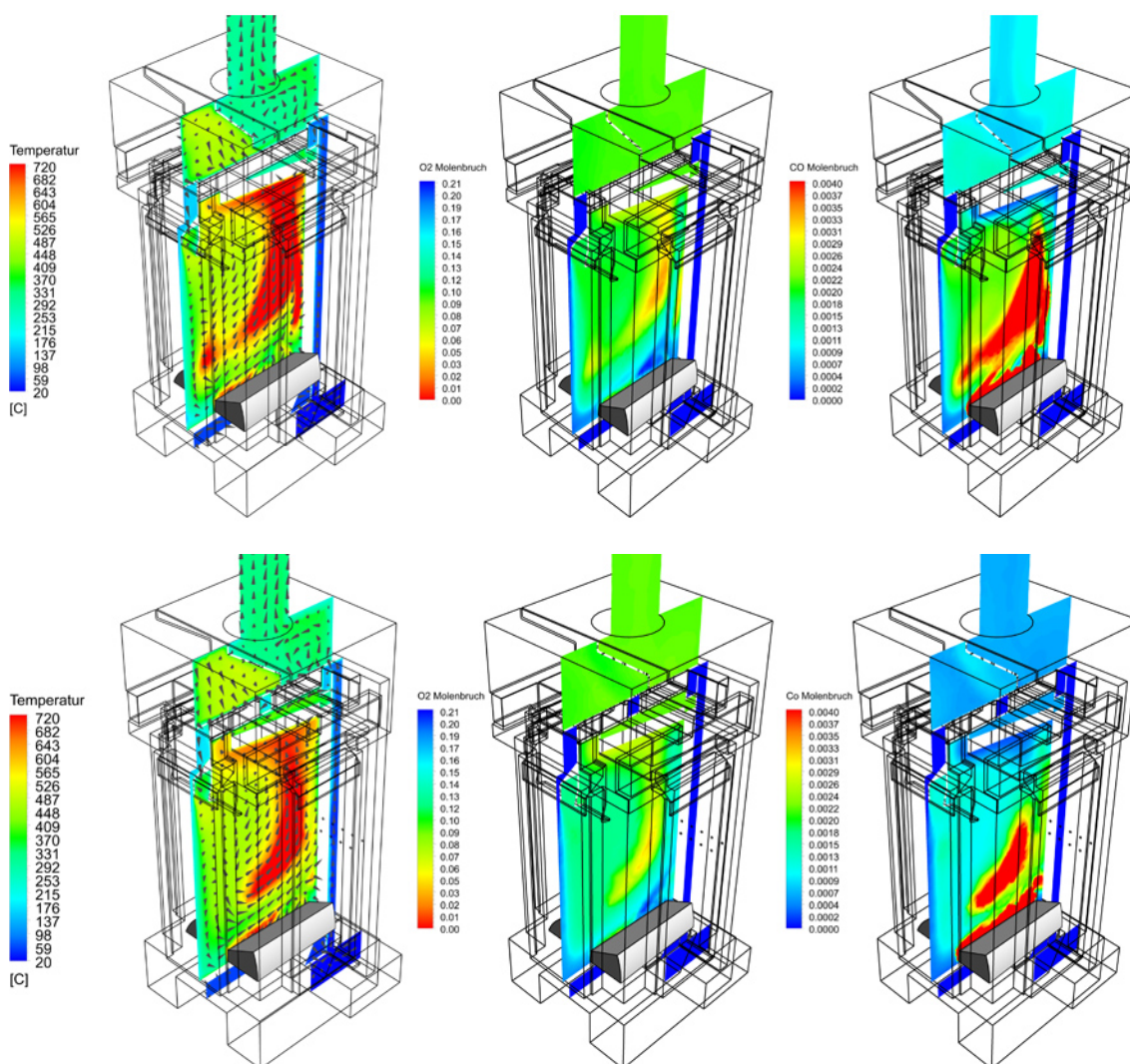
**Abbildung 33 Isoflächen der Temperatur größer 650°C (links) und freigesetzte Reaktionsenergie (rechts) beim Kaminofen Modena mit Modifikation M3**

Abbildung 34 zeigt die Verteilung von Temperatur sowie Sauerstoff- und Kohlenmonoxidkonzentration im linken Bereich des Feuerraums. In der Originalkonstruktion bildet sich über dem linken Holzstück kein zusammenhängender Bereich mit hohen Temperaturen aus. In der modifizierten Feuerung M3 hat sich die Strömung gegenüber der Originalkonstruktion homogenisiert. Bei der Originalkonstruktion bildet sich am vorderen Holzstück eine CO-Strähne, die sich in den Bereich mit niedrigen Temperaturen einmischt und dadurch nicht mehr an der Reaktion teilnehmen kann. Die Strömung der modifizierten Feuerung bewirkt, dass das Kohlenmonoxid in den hinteren Bereich mit hohen Temperaturen geführt wird und an der Reaktion weiter teilnehmen kann.



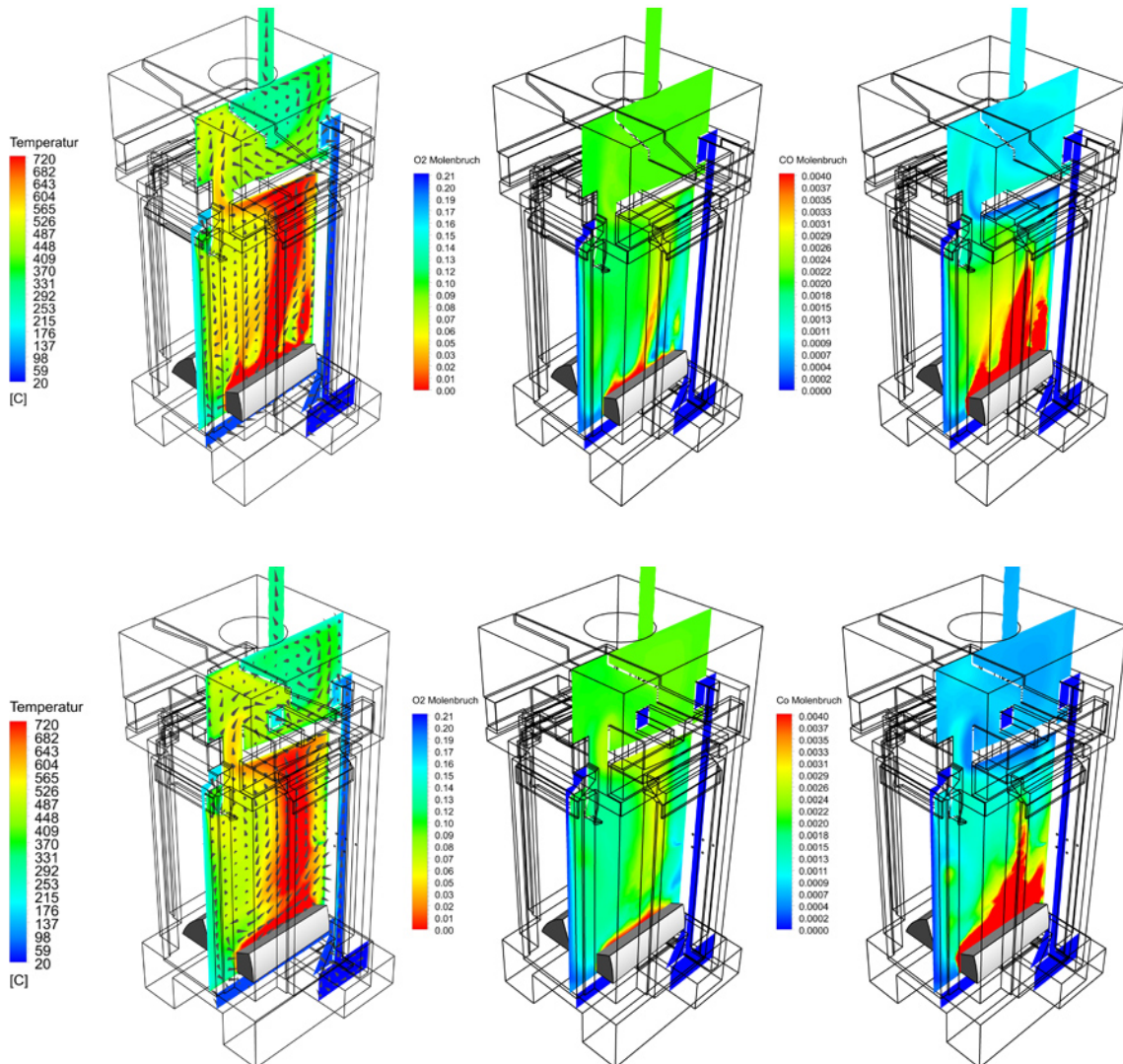
**Abbildung 34** Verteilung von Temperatur (links), Sauerstoff (mittig) und Kohlenmonoxid (rechts) der Originalkonstruktion (oben) und der Modifikation M3 (unten) bei Kaminofen Modena (Position: linker Bereich Feuerraum, berechnet jeweils für Luftüberschusszahl 2)

Gegenüber der Originalkonstruktion des Kaminofens entsteht bei der Modifikation M3 ein zusammenhängender Bereich mit hohen Temperaturen, wie die Abbildung 35 in einem Schnitt für die Feuerraummitte zeigt. Des Weiteren konnte die lokale Luftmangelsituation und der Bereich mit hohen CO-Konzentrationen in der Modifikation M 3 reduziert werden. Eine ganz ähnliche Situation ergibt sich auch im rechten Bereich des Kaminofens (Abbildung 36). Der Bereich mit hohen Temperaturen ist in der Modifikation M 3 homogener und kompakter als in der Originalkonstruktion. Luftmangelsituationen sind in der Modifikation M 3 in dieser Region des Feuerraumes nicht mehr auszumachen. Damit ist auch entsprechend der Bereich mit hohen CO-Konzentrationen gegenüber der Originalkonstruktion kleiner.



**Abbildung 35** Verteilung von Temperatur (links), Sauerstoff (mittig) und Kohlenmonoxid (rechts) der Originalkonstruktion (oben) und der Modifikation M3 (unten) bei Kaminofen Modena (Position: Mitte Feuerraum, berechnet jeweils für Luftüberschusszahl 2)

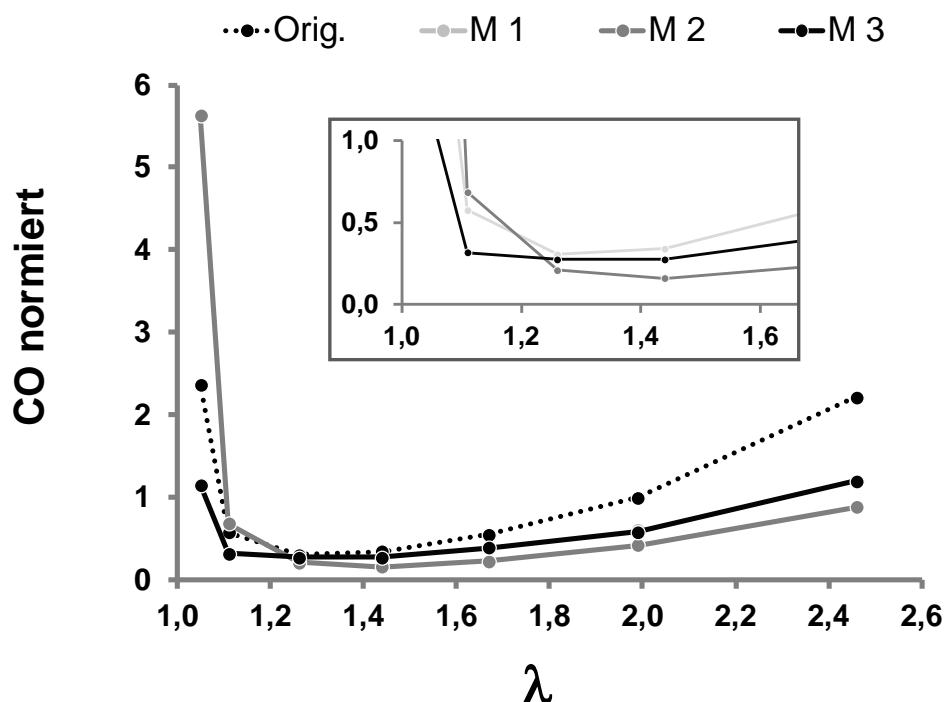
Auch beim Kaminofen wurden Simulationsrechnungen für verschiedene Luftüberschusszahlen  $\lambda$  erstellt und die Ergebnisse der Berechnungen für CO wurden ebenfalls auf einen definierten Anfangszustand nach Gleichung (1) normiert, in diesem Fall auf  $\lambda = 2$ . Der sich hierbei ergebende Verlauf der normierten CO-Konzentration in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl ist in Abbildung 37 dargestellt. Der Kaminofen weist einen für diese Bauart charakteristischen CO- $\lambda$ -Verlauf auf, allerdings liegt das Minimum bei einer deutlich zu niedriger Luftüberschusszahl von ca.  $\lambda = 1,3$  (dies entspricht ca. 4 Vol.% O<sub>2</sub> im Abgas). Bei der Interpretation der Simulationsergebnisse ist allerdings zu beachten, dass bei der Simulation eine Methanverbrennung unter stationären Bedingungen berechnet wird. Im Gegensatz hierzu ist die tatsächliche Verbrennung in Kaminöfen ein nicht stationärer Prozess.



**Abbildung 36** Verteilung von Temperatur (links), Sauerstoff (mittig) und Kohlenmonoxid (rechts) der Originalkonstruktion (oben) und der Modifikation M3 (unten) bei Kaminofen Modena (Position: rechter Bereich Feuerraum, berechnet jeweils für Luftüberschusszahl 2)

Wird beim CO- $\lambda$ -Verlauf der Bezugspunkt bei  $\lambda = 2$  betrachtet, weisen die modifizierten Feuerungen M 1-M 3 eine Minderung der CO-Konzentrationen von über 40% auf. Für die Modifikation M 1 wurden nur die Verhältnisse für  $\lambda = 2$  berechnet. Das Ergebnis dieser Rechnung deckt sich mit dem Ergebnis der Modifikation M 3 bei  $\lambda = 2$ .

Im Minimum der Kurvenverläufe, zwischen  $\lambda = 1,25$  und  $\lambda = 1,6$ , kann keine merkliche Verbesserung bei den CO-Konzentrationen durch die Modifikationen des Kaminofens festgestellt werden. Allerdings weist die Modifikation M3 eine minimale CO-Konzentration über einen größeren  $\lambda$ -Bereich auf und bei hohen  $\lambda$ -Werten erfolgt der Anstieg langsamer als bei der Originalkonstruktion. Die Modifikation M2 weist bis zu einem  $\lambda$  von ca. 1,25 die geringsten CO-Konzentrationen auf. Bei noch geringerem Luftüberschuss steigt die CO-Konzentration bei allen Konstruktionen stark an.



**Abbildung 37** normierte CO-Konzentration in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl  $\lambda$  beim Kaminofen Modena im Original und in den modifizierten Versionen M1-M3

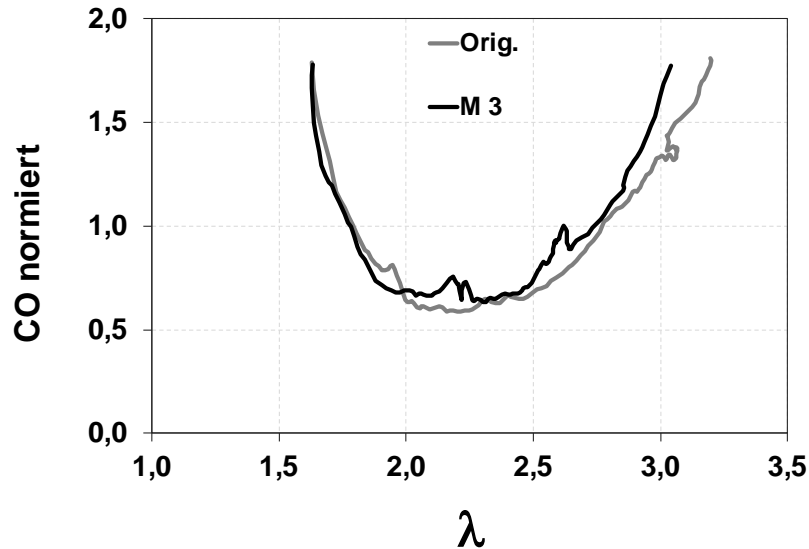
Für eine Evaluierung der Simulationsergebnisse soll die Modifikation M 3 herangezogen werden. Diese weist über den gesamten  $\lambda$ -Bereich die geringsten berechneten CO-Konzentrationen im Vergleich zur Originalkonstruktion auf. Deshalb wurden vom Hersteller des Kaminofens die Änderungen der Modifikation M3 an einem Ofen vorgenommen. Mit diesem modifizierten Kaminofen wurden dann Abbrandversuche auf dem IFK-Prüfstand unter Typ-Prüfbedingungen vorgenommen. Im Vergleich hierzu wurden auch mit der Originalkonstruktion unter vergleichbaren Randbedingungen Abbrandversuche durchgeführt.

Abbildung 38 zeigt die normierten CO-Konzentrationen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl als Mittelwerte aus jeweils 6 Versuchen für die Hauptverbrennungsphasen für die Originalkonstruktion und die Modifikation M3. Die Hauptverbrennungsphase wurde deshalb für den Vergleich von Messwerten und Simulationsergebnissen herangezogen, da in dieser Verbrennungsphase die Zustände sich am besten den in der Simulation angenommenen stationären Zuständen bei der Verbrennung annähern. Die Hauptverbrennungsphase wurde derart definiert, dass eine Kohlenmonoxidkonzentration unter  $1.200 \text{ mg/m}^3$  (bezogen auf 13 Vol.%  $\text{O}_2$ ) im Abgas vorliegt und eine weitgehend konstante Abgastemperatur vorhanden ist.

In dieser Evaluierung kann bei dieser Darstellung keine Verbesserung des Emissionsverhaltens beim modifizierten Kaminofen in der Hauptverbrennungsphase gegenüber der Originalversion festgestellt werden. Nach den Simulationsergebnissen sollte die Kurve



der modifizierten Feuerung M3 leicht unter der Kurve für die Originalfeuerung liegen. Dies wurde allerdings in der Messung nicht bestätigt.



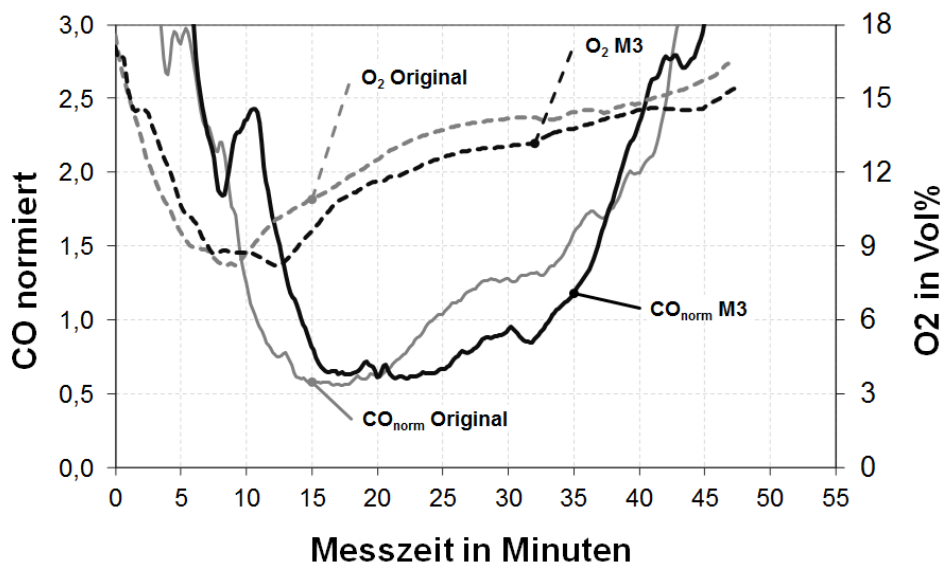
**Abbildung 38** Verlauf der normierten CO-Konzentration in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl  $\lambda$  beim Kaminofen Modena im Original und in den modifizierten Versionen M3 aus Messungen (jeweils Mittelwerte aus 6 Hauptverbrennungsphasen)

Auch in der absoluten Höhe für die CO-Konzentration konnte keine Verbesserung mit der Modifikation gegenüber dem Originalzustand erreicht werden. Wird allerdings der Mittelwert der CO-Konzentration für die Hauptverbrennungsphase für einen Vergleich herangezogen, so kann im Mittel eine geringe Verbesserung von 80 mg/m<sup>3</sup> (bei 13 Vol.% O<sub>2</sub>) für die Modifikation M3 festgestellt werden. Dies rührt daher, dass die Phase mit niedrigen Konzentrationen von Kohlenmonoxid gegenüber dem Originalzustand des Kaminofens verlängert wurde.

Abbildung 39 zeigt die Verläufe der Mittelwerte aus jeweils 6 Versuchen der normierten CO-Konzentrationen und der Sauerstoffkonzentrationen über der Abbrandzeit für den Kaminofen im Original und in der Modifikation M3. Bei beiden Kaminöfen treten hohe CO-Konzentrationen bei einem Sauerstoffgehalt von ca. 8 Vol.% auf. Die Originalkonstruktion hat im Mittel eine kürzere Anbrandphase, da der typische 2. Anstieg der CO-Konzentration in der 9. Minute des Abbrandes deutlich geringer ausfällt. Bei der modifizierten Feuerung M3 ist hingegen ein deutlicher Anstieg der CO-Konzentrationen vorhanden.

In der 15. Minute des Abbrandes erreicht dann die Modifikation M3 einen Bereich mit geringen CO-Konzentrationen, die über einen langen Messzeitraum weitgehend konstant niedrig bleiben. Erst ab der 32. Minute des Abbrandes steigen die CO-Konzentrationen dann wieder deutlich an. Bei der Originalkonstruktion wird der Bereich geringer CO-Konzentrationen im Mittel erst in der 14. Minute erreicht und auch nur für relativ kurze

Zeit. Bereits in der 20. Minute des Abbrandes ist dann ein Anstieg der CO-Konzentration zu verzeichnen.



**Abbildung 39** Verlauf der normierten CO- und O<sub>2</sub>-Konzentrationen über der Abbrandzeit beim Kaminofen Modena im Original und in den modifizierten Versionen M3 aus Messungen (jeweils Mittelwerte aus 6 Abbränden)

Anhand der CO-Mittelwerte des Gesamtabbrandes und der einzelnen Verbrennungsphasen lassen sich die Unterschiede der beiden Konstruktionen qualitativ vergleichen (Tabelle 12). Die Berechnung des  $CO_{\text{Anteil}}$  für die Verbrennungsphasen Anbrand, Hauptverbrennung und Ausbrand wurde nach folgender Gleichung durchgeführt:

$$CO_{\text{Anteil}} = CO_{\text{norm}} \cdot \frac{t_{\text{phase}}}{t_{\text{ges}}} \quad (2)$$

mit:

$CO_{\text{norm}}$	normierte CO-Konzentration nach (1)	[-]
$t_{\text{ges}}$	Zeit des gesamten Abbrandes	[min]
$t_{\text{phase}}$	Zeit der einzelnen Verbrennungsphase	[min].

Die Gesamtabbrandzeit ist bei beiden Konstruktionen im Mittel etwa gleich. Deutlich Unterschiede lassen sich in der Anbrand- und der Hauptverbrennungsphase ausmachen. Die Anbrandzeit der Modifikation M 3 erhöht sich um drei Minuten, dafür verkürzt sich die Hauptverbrennungsphase um drei Minuten.

Werden die mittleren normierten CO-Konzentrationen verglichen, weist die Modifikation M3 höhere Werte gegenüber der Originalkonstruktion auf. Da bei diesen Feuerungsanlagen die Anbrandphase die Gesamthöhe der Emissionen maßgeblich bestimmt, kann

durch eine Verbesserung in der Hauptverbrennung die erhöhte Emission und die längere Dauer des Anbrands nicht unbedingt kompensiert werden.

**Tabelle 12 Ergebnisse der Evaluierungsmessungen - Mittelwerte für Abbrandzeit und CO für den Gesamtabbrand und die Verbrennungsphasen beim Kaminofen Modena**

Verbrennungs- phase	Zeit in min		CO <sub>norm</sub>   CO <sub>Anteil</sub> * (jeweils dimensionslos)	
	Original	M 3	Original	M 3
Gesamt	47	48	2,4	2,6
Anbrand	9	12	5,6   1,1	5,7   1,4
Hauptverbrennung	29	26	1,0   0,6	0,9   0,5
Ausbrand	9	10	3,0   0,6	2,8   0,6

\* CO<sub>Anteil</sub> nach Gleichung (2)

Zusätzlich muss noch erwähnt werden, dass die Feuerung in der Originalkonstruktion Abweichungen gegenüber den CAD-Daten und damit gegenüber dem CFD-Modell aufweist. Die Austrittsöffnung der vorderen Scheibenluft weist in der Simulation einen Spalt von 8 mm und in der Versuchsfeuerung von 5 mm auf. Eine der Modifikationen von der Version M3 war, dass der Spalt der vorderen Scheibenluft von 8 mm auf 5 mm reduziert wird. Da am realen Kaminofen keine Möglichkeit bestand den Spalt der Austrittsöffnung einzustellen, konnte die Wirkung unterschiedlicher Spalte nicht evaluiert werden. Eine Änderung des Luftspaltes im CFD-Modell konnte im Projekt nicht mehr vorgenommen werden.

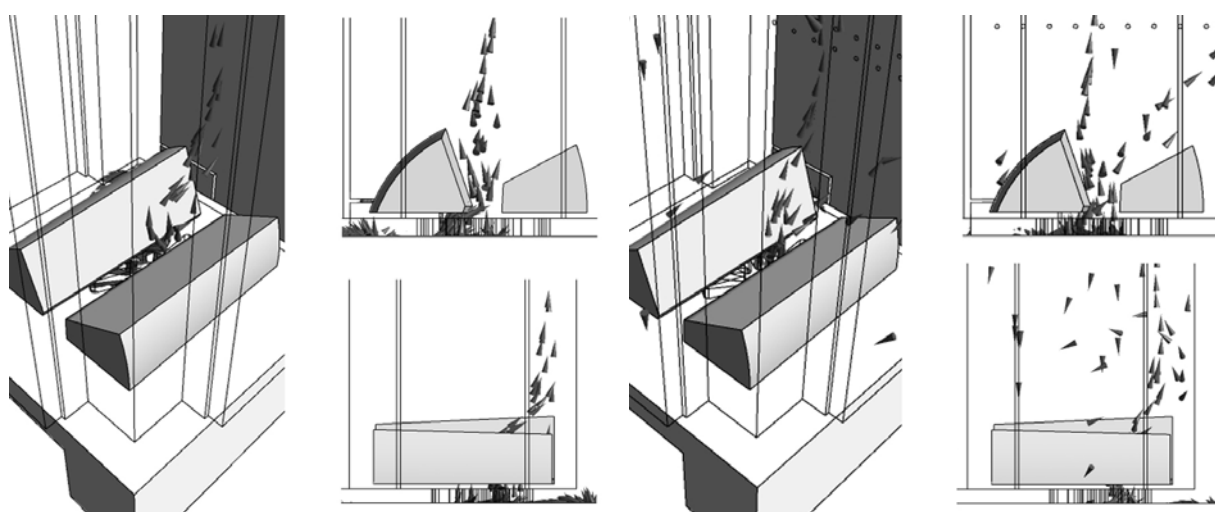
Eine weitere Modifikation der Version M3 des Kaminofens war der Umbau der orthogonalen Luftkanäle in der Haube. Damit die orthogonalen Luftkanäle vollständig umströmt werden, musste das Umlenkblech in der Haube geändert werden, was in der Simulation nach Abbildung 31 geschah. In der umgebauten Feuerung wurde das Umlenkblech in der Haube unverändert belassen. Inwieweit dies auf den Druckverlust in der Feuerung und damit auf die Luftverteilung der Scheibenlüfte und der Rostluft einen Einfluss hat, konnte in der Messreihe nicht untersucht werden. Es konnte allerdings beobachtet werden, dass sich die Luftverteilung der Primärzone in der Modifikation verändert hatte.

Bei den Abbrandversuchen fanden in der Originalkonstruktion in der hinteren linken Region des Rostes die stärksten Verbrennungsreaktionen statt. Beim Anbrennen zündete das Holzstück in dieser Region als erstes, was sich dann auch positiv auf die Dauer des Anbrandes auswirkte. In der Hauptverbrennungsphase brannten die Holzstücke ausgehen von dieser Region langsam nach vorne ab. In Abbildung 40 (links) ist die sehr begrenzte, lokale Rostluft auch in der Simulation erkennbar.

Bei der modifizierten Feuerung war die Luft im Primärbereich gleichmäßiger über dem Rost verteilt. Dadurch brannte das Holz relativ langsam an, was sich dann negativ auf die Dauer des Anbrandes auswirkte. Damit die Entgasung des Brennstoffes in der Anbrennphase nicht zu stark ausfällt und dadurch hohe Emissionsspitzen verursacht, musste die Primärluft sehr genau eingestellt werden. War allerdings der Primärluftstrom zu gering,

dauerte es bis zu 15 Minuten, bis sich eine stabile Flamme über dem Holz ausbildete. Wurde ein hoher Primärluftstrom eingestellt, so bildete sich innerhalb von wenigen Minuten eine stabile Flammenfront über dem Holz aus. Diese bewirkte eine hohe Entgasungsrate des Brennstoffes, sodass über einen längeren Zeitraum lokale Luftmangelsituationen entstanden, was zu hohen CO-Konzentrationen führte.

In Abbildung 40 (rechts) ist die berechnete Luftverteilung der modifizierten Feuerung in der Primärzone zu sehen. Auch hier strömt die Rostluft in Richtung des hinteren Bereichs des Feuerraumes, allerdings fächert sich die Strömung bei der Modifikation M3 etwas mehr im Feuerraum auf. Bei den Messungen konnte beobachtet werden, dass die Rostluft bei der modifizierten Variante ein anderes Strömungsbild zeigt, als nach den Simulationsergebnissen eigentlich erwartet wurde.

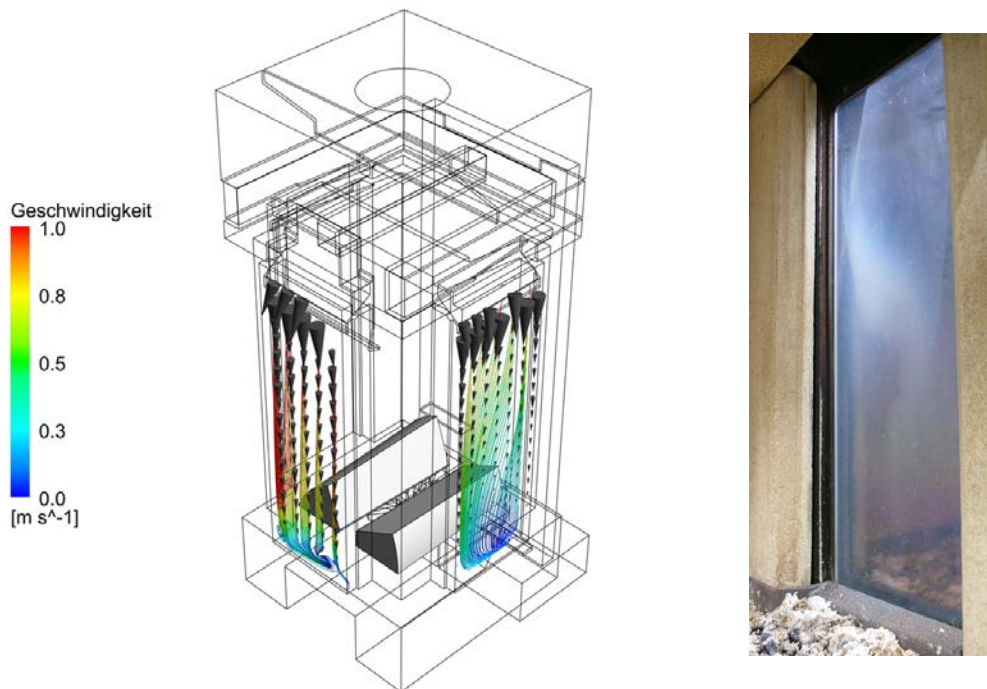


**Abbildung 40** Luftströmung in der Primärzone der Originalkonstruktion (links) des Kaminofens Modena und der Modifikation M3 (rechts)

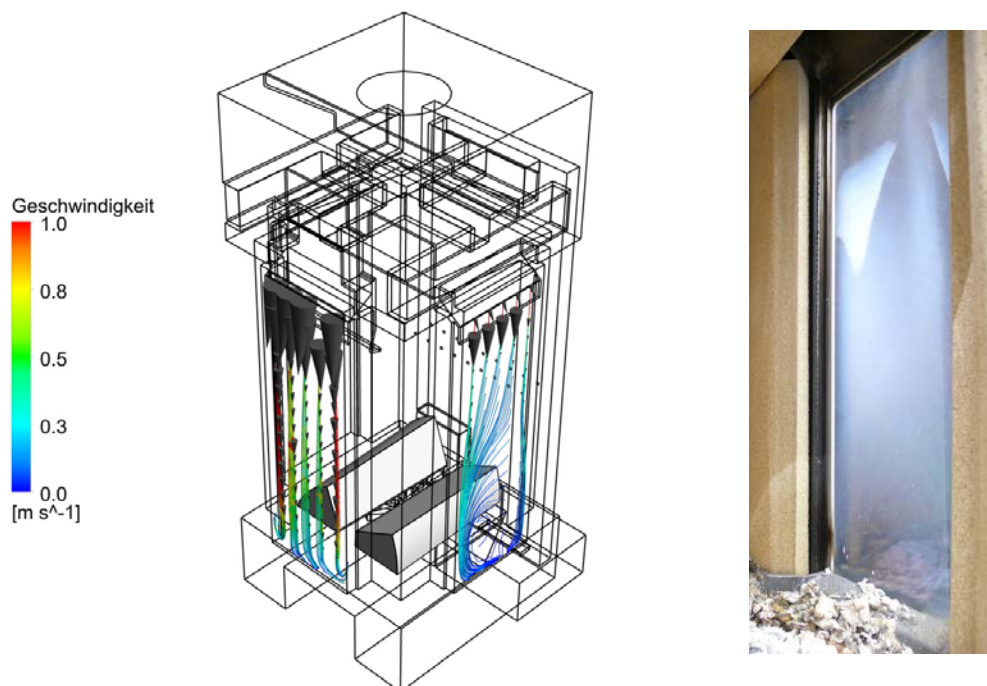
Bei der Originalkonstruktion konnte während den Messungen die Wirkung der seitlichen Scheibenluft gut beobachtet werden. Die Beobachtungen in der realen Feuerung decken sich gut mit den Strömungsbildern der Simulation (Abbildung 41 links). Die Verfärbungen an der Seitenscheibe (Abbildung 41 rechts) stimmen ebenfalls gut mit den Strömungsbildern der Simulation überein, d.h. die Verfärbung markiert das Ablösen der Strömung von der Scheibe.

Bei der modifizierten Feuerung konnte während den Messungen keine Wirkung der seitlichen Scheibenluft beobachtet werden. Wird das Strömungsbild der Simulation in Abbildung 42 (links) betrachtet, so kann eine Ablösung der Strömung der Seitenluft relativ kurz nach dem Austritt ausgemacht werden. Auch hier können die Verfärbungen der Seitenscheibe auf ein Ablösen der Strömung hindeuten.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass zukünftig bei der Evaluierung von Simulationsrechnungen an Feuerungen mit Naturzug die Spaltbreiten von Luftöffnung sorgfältig überprüft und jeder Luftvolumenstrom (einschließlich der Temperaturen) separat gemessen werden sollte.



**Abbildung 41** Strömungsbild (links) und Verfärbungen (rechts) im Bereich der Seitenscheibe der Originalkonstruktion vom Kaminofen Modena



**Abbildung 42** Strömungsbild (links) und Verfärbungen (rechts) im Bereich der Seitenscheibe der Modifikation M 3 bei Kaminofen Modena

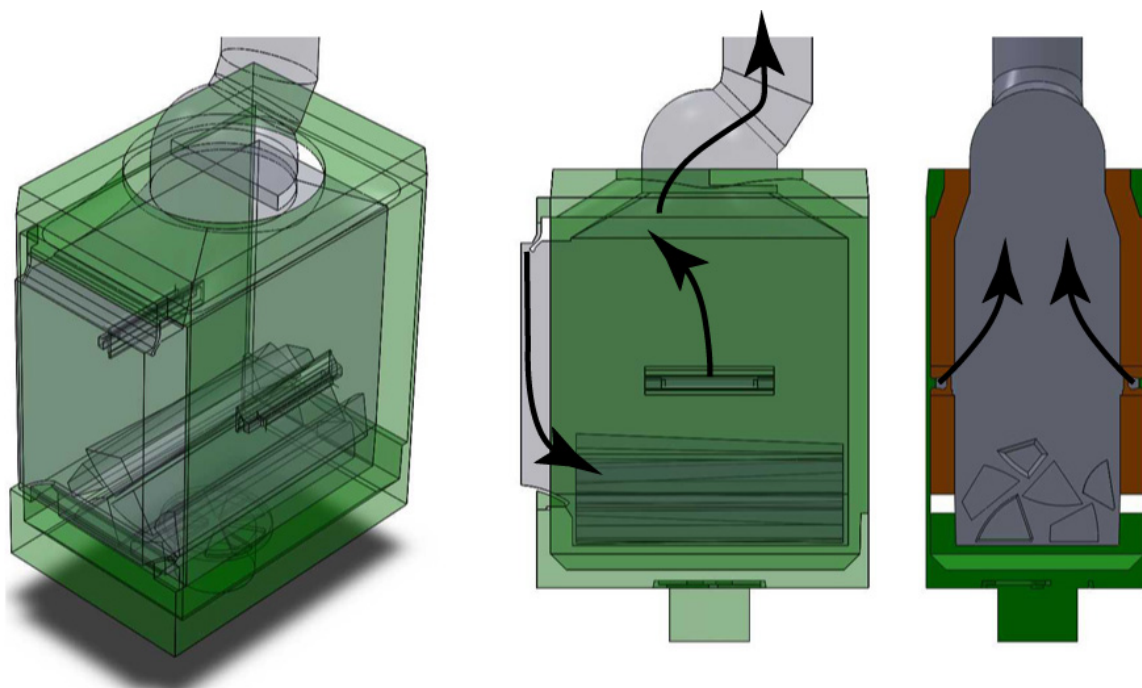
Des Weiteren muss das CFD-Modell so aufgebaut werden, dass ein Mittelwert der einzelnen Luftströme im Spalt berechnet werden kann. In diesem Beispiel wurde eine konstante Wandtemperatur der Sekundärluftkanäle für alle berechneten Luftüberschusszah-

len vorgegeben. Da sich die Luftvorwärmung in Abhängigkeit des Luftüberschusses ändern kann, sollten zukünftige Modelle so aufgebaut werden, dass eine ggf. stattfindende Luftvorwärmung mit berechnet wird. Dies erhöht den Rechenaufwand zusätzlich.

Wie dieses Beispiel der numerischen Simulation eines Kaminofens zeigt, sind für die Beurteilung des Emissionsverhalten einer Feuerung nicht nur die errechneten CO-Konzentrationen wichtig, sondern es müssen auch die Aspekte der Strömungsführung sowie der Temperatur- und O<sub>2</sub>-Verteilung mit einbezogen werden. Für zukünftige Projekte sollte überprüft werden, ob die berechnete CO-λ-Charakteristik mit Messwerten übereinstimmt und ob diese Information für eine Beurteilung von Optimierungsmaßnahmen genutzt werden kann.

### 5.3 Kachelofeneinsatz

Als Vertreter von Kachelöfen wurde von der Firma Ulrich Brunner GmbH die Feuerung HKD 2.2 XL zur Verfügung gestellt. Die Feuerung weist einen schmalen, tiefen Feuerraum mit einer Sichtscheibe auf (siehe Abbildung 43).



**Abbildung 43** Heizeinsatz HKD 2.2 XL von Brunner als 3D-Modell

Die Feuerung hat keinen Rost, das Holz wird direkt auf einen Schamotteboden gelegt. Die Verbrennungsluft gelangt von einem zentralen Anschluss über doppelt ausgeführte Wände zu den seitlichen Luftschlitzen und über die Haube zur Austrittsöffnung für die Scheibenluft. Durch die doppelt ausgeführten Wände findet eine Aufwärmung der Seiten- und Scheibenluft statt. Die Abgase gelangen über eine Umlenkplatte in die Kuppel des Heizeinsatzes. Für eine weitere Wärmeabgabe werden die Abgase dann in eine Nach-

heizfläche geführt. Dies kann z.B. ein keramischer Zug sein, der allerdings nicht mehr Bestandteil der Simulation ist.

Der Heizeinsatz ist für Stückholz mit einer maximalen Länge von 50 cm geeignet. Die feuerungstechnischen Daten sind in Tabelle 13 aufgelistet.

**Tabelle 13 Technische Daten für Kachelofeneinsatz HKD 2.2 XL von Brunner**

Nennwärmeleistung (NWL)	11 kW
Aufgabemenge Holz	8 kg
Abgasstutztemperatur	520 °C
Mindestförderdruck bei NWL	12 Pa
CO-Gehalt bei 13 Vol.% O <sub>2</sub>	<1.250 mg/m <sup>3</sup>
Wirkungsgrad	>78 %
Gesamtstaub	<40 mg/m <sup>3</sup>

Auch der Heizeinsatz musste von einer CAD-Konstruktion für die Fertigung in ein CFD-konformes Modell überführt werden. Dabei wurde der Fluidraum mit allen relevanten Geometrien als ein zusammenhängendes Bauteil neu erstellt. Aufgrund der Erfahrungen der vorangegangenen Simulationen wurde das Modell in zwei Fluidkörper und einen Festkörper unterteilt (siehe Abbildung 43: hellgrün: äußeres Fluid; graublau: inneres Fluid; braun: Schamottewand). Das gesamte Modell besteht damit aus knapp 8,7 Mio. Zellen.

Um die Vorwärmung der Scheiben- und Seitenluft nicht abschätzen zu müssen, wurde zusätzlich die Feuerraumauskleidung mit modelliert, damit eine Berechnung des Wärmedurchgangs stattfindet. Dadurch wird auch die Vorwärmung bei unterschiedlichen Massenströmen der Verbrennungsluft exakt berechnet. Durch diese relativ aufwendige Modellerstellung konnte die Qualität des Rechengitters deutlich verbessert werden, da jedes Teilvolumen bedarfsgerecht vernetzt wurde.

Für die richtige Berechnung der Wandtemperatur und damit verbunden des Wärmetransports an die Umgebung, müssen Randbedingungen für jede Fläche definiert werden. Tabelle 14 sind beispielhaft einige Randbedingungen des Heizeinsatzes HDK 2.2 XL von Brunner aufgeführt.

Die Randbedingungen für die Massenströme der Verbrennungsluft und des Brenngases sind in Tabelle 15 aufgeführt. Der Energieinhalt des Brennstoffgemisches entspricht einer Feuerungswärmeleistung von 13 kW.

Mit den aufgeführten Randbedingungen wurden für die Originalkonstruktion Simulationsrechnungen durchgeführt. Abbildung 44 (links) zeigt die Isoflächen der Kohlenmonoxidkonzentration im Heizeinsatz. Die Originalkonstruktion weist einen ausgeprägten Bereich mit hohen Konzentrationen von Kohlenmonoxid im hinteren Bereich der Feuerung auf. Ein weiterer Bereich mit hohen CO-Konzentrationen ist in der Mitte der Feuerung zu finden.

**Tabelle 14 Beispiel von Randbedingungen der Wände am Modell HKD 2.2 XL von Brunner**

Name	Material	Randbedingung	Wert
Feuerraumwand	Schamotte	Temperatur und Wärmedurchgang wird im Modell berechnet. Emissionsgrad $\varepsilon$	0,84
Feuerraumboden	Schamotte	konst. Temperatur Emissionsgrad $\varepsilon$	777 K 0,84
Umlenkplatte	Schamotte	konst. Wärmedurchgang Emissionsgrad $\varepsilon$	0,0 W/m <sup>2</sup> 0,84
Scheibe	Borosilikatglas	Wärmedurchgangskoeff. Umgebungstemp. Emissionsgrad $\varepsilon$	4 W/(m <sup>2</sup> K) 300 K 0,93
Gehäuse	GGG-40	Wärmedurchgangskoeff. Umgebungstemp. Emissionsgrad $\varepsilon$	7,0 W/(m <sup>2</sup> K) 300 K 0,64

**Tabelle 15 Randbedingungen der Massenströme am Modell HKD 2.2 XL von Brunner**

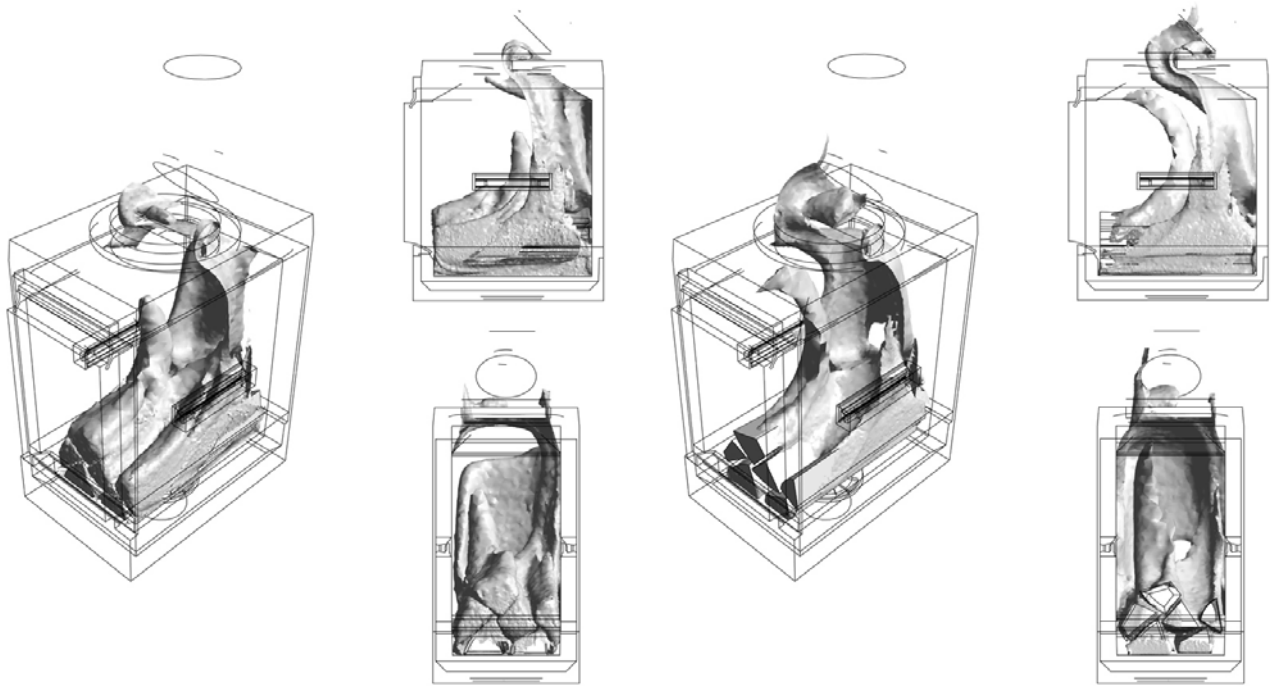
Eingangsgröße	Massenstrom	Temperatur
Verbrennungsluft bei 11 Vol.% O <sub>2</sub> im Abgas	Luft 8,9 g/s	293 K
Brennstoffgemisch (als Ersatz für Holz- brennstoff)	CO 0,42 g/s CH <sub>4</sub> 0,17 g/s CO <sub>2</sub> 0,21 g/s H <sub>2</sub> O 0,17 g/s	973 K

Wird der Bereich mit niedrigen Sauerstoffkonzentrationen in Abbildung 44 (rechts) betrachte, decken sich diese mit den Bereichen hoher CO-Konzentrationen. Daher ist davon auszugehen, dass die hohen CO-Konzentrationen im hinteren Teil des Heizeinsatz-Feuerraumes durch einen lokalen Luftmangel entstehen.

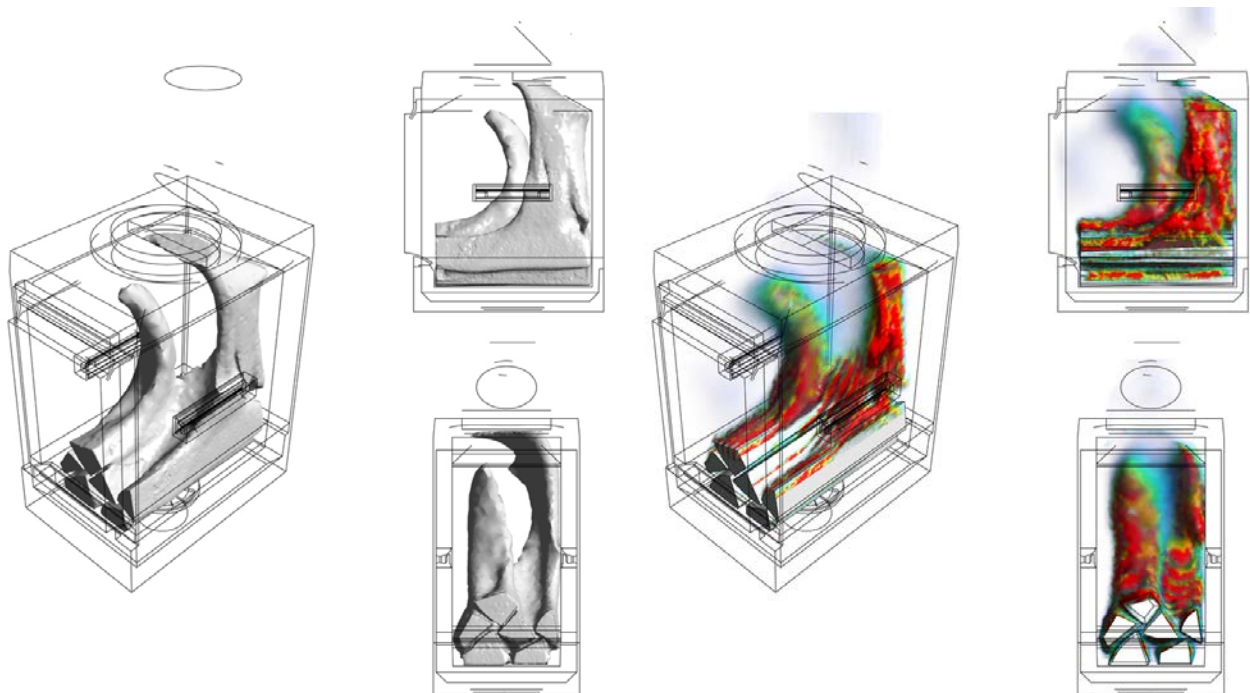
Ebenso sind für eine vollständige Oxidation von brennbaren Gasen die Temperaturen im Feuerraum entscheidend. Abbildung 45 (links) zeigt die Bereiche mit Temperaturen größer 650°C im Feuerraum. Im Feuerraum sind zwei Bereiche mit hohen Temperaturen auszumachen. In diesen Bereichen findet auch vornämlich die Oxidationsreaktionen statt (Abbildung 45 rechts).

Für eine Weiterentwicklung des Feuerraumes wurde die Strömung im Feuerraum des Heizeinsatzes detailliert betrachtet. Abbildung 46 (links) zeigt die Strömungslinien der Scheibenluft bei der Originalkonstruktion. Die Scheibenluft strömt gleichmäßig nach unten und mischt sich dann in den Holzstapel ein. Nach ca.  $\frac{2}{3}$  der Feuerraumtiefe tritt die Strömung der Scheibenluft aus dem Holzstapel aus und bildet im vorderen Bereich des Brennraums eine Rückströmung aus. Dadurch erhöht sich die Verweilzeit der nicht vollständig oxidierten Gase bzw. diese werden wieder in den heißen Bereich der Feuerung geführt.

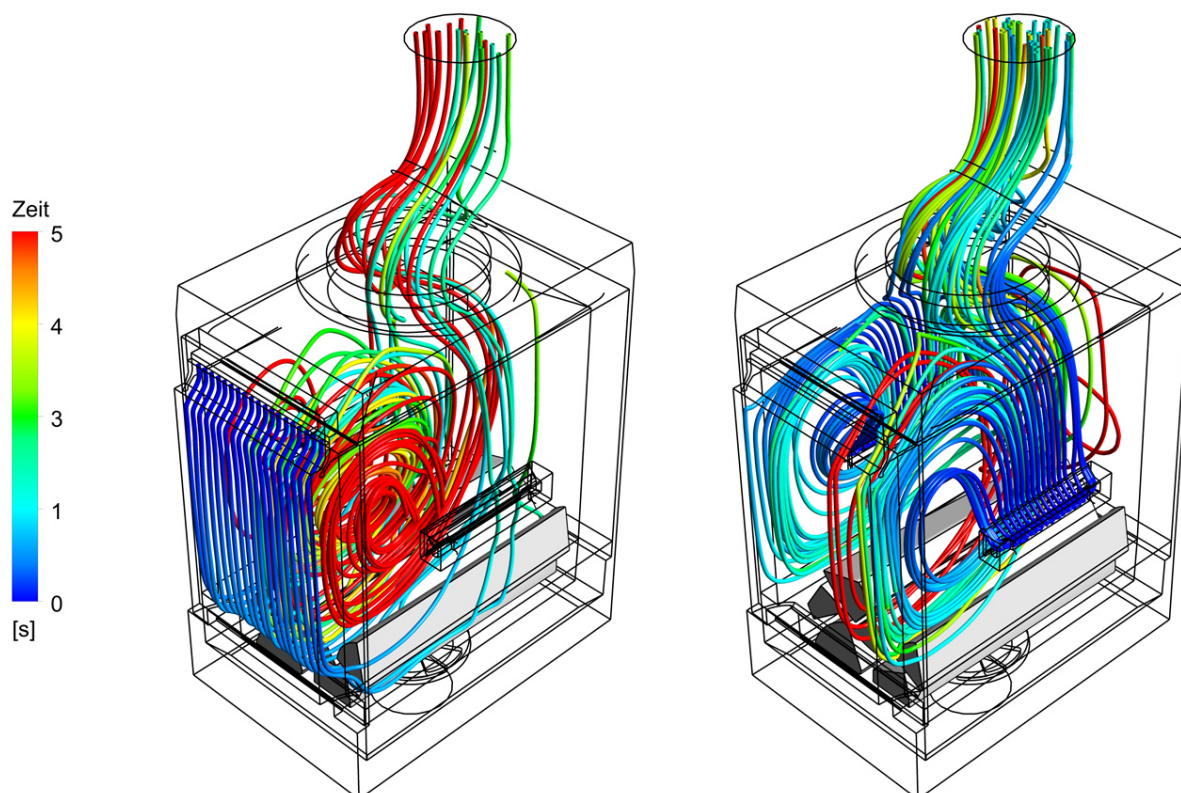




**Abbildung 44** Isoflächen der Konzentration von Kohlenmonoxid (links) und Sauerstoff kleiner 6 Vol.% (rechts) der Originalkonstruktion des Modells HKD 2.2 XL von Brunner



**Abbildung 45** Isoflächen der Temperatur größer 650°C (links) und freigesetzte Reaktionsenergie (rechts) der Originalkonstruktion vom Modell HKD 2.2 XL von Brunner



**Abbildung 46 Strömungslinien der Scheibenluft (links) und der Seitenluft (rechts) der Originalkonstruktion HKD 2.2 XL von Brunner**

Wird die Strömung der Seitenluft, wie in Abbildung 46 (rechts) dargestellt, betrachtet, ist zu erkennen, dass diese Luftströmung nur zu einem geringen Teil an der Verbrennung teilnimmt. Die Luft tritt aus der Öffnung aus und strömt an der Wand nach oben. Im Bereich der Feuerraumdecke teilt sich die Strömung. Ein Teil strömt ohne nennenswerte Reaktion in die Haube. Da das Temperaturniveau für eine weitere Reaktion in der Haube zu niedrig ist, hat dieser Teilstrom nur eine verdünnende Wirkung. Der zweite Teilstrom strömt zur Scheibe und bildet einen Wirbel im Wandbereich aus. Allerdings mischt sich diese Strömung nicht in den mittleren Bereich der Feuerung ein, um an der Reaktion teilzunehmen. Anhand der Färbung der Stromlinien kann die Verweilzeit abgeschätzt werden. Für die Seitenluft liegt diese im Feuerraum unter 3 Sekunden. Zusätzlich sind im Wandbereich die Temperaturen für eine Reaktion zu niedrig. Daher bewirkt die Seitenluft überwiegend eine Verdünnung der CO-Konzentration und nimmt nur im geringen Teil an der Reaktion teil.

Um das Emissionsverhalten dieser Feuerung zu verbessern, sollte zum einen die Strömungsführung geändert werden, zum anderen sollte die Temperaturen im Brennraum erhöht werden. Da eine Erhöhung der Brennraumtemperatur mit der geänderten Strömungsführung einhergehen sollte, ist zuerst ein neues Konzept zur Strömungsführung zu erstellen.

## 6 Ergebnisbewertung und -verbreitung durch HKI

Die Aufgabenstellung des Projekts stellte eine große wissenschaftliche Herausforderung für die beteiligten Firmen als auch die gesamte Branche dar.

Durch die erfolgreiche Bearbeitung der angestrebten Arbeitspakete steigerten die beteiligten Firmen ihr Wissen im Bereich der Feinstaubentstehung und Verbrennungsoptimierung. Mit den Ergebnissen des Vorhabens und den realisierten Demonstrationsfeuerungen wurde eine Basis für zukünftige eigene Entwicklungsarbeiten geschaffen. Dass das Projekt gemeinsam von der Industrie, unter Federführung des HKI Industrieverbandes durchgeführt wurde, war besonders für die firmenübergreifende Anwendung der Ergebnisse von erheblicher Bedeutung. Dies verbesserte für alle Firmen die Möglichkeiten, auf die Fragestellung der Reduzierung der Partikelemissionen antworten zu können. Das Projekt wurde von den beteiligten Firmen als Möglichkeit gesehen, in der Zukunft zu Umweltschutzaspekten die Zusammenarbeit der Industrie zu erhöhen.

### 6.1 Hintergrund

Es ist das politische Ziel der Europäischen Union sowie der Bundesregierung, erneuerbare Energieträger zu fördern und ihren Anteil am Energieverbrauch deutlich zu steigern. Nachwachsende heimische Energieträger sind Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungsstrategie und tragen zu einer unabhängigen und sicheren Energieversorgung bei.

Der Einsatz von Biomasse zur Wärmeerzeugung in häuslichen Feuerstätten für feste Brennstoffe trägt zum Erreichen dieser politischen Ziele zu Klimaschutz und Ressourcenschonung bei.

Diesem Nutzen steht der Feinstaubausstoß der Feuerungen entgegen, denn Feuerstätten für feste Brennstoffe emittieren Feinstäube. Feinstäube gefährden die Gesundheit. Schädliche Effekte treten vor allem bei Personen mit bereits bestehenden Atemwegs- oder Herzkreislauferkrankungen auf. Um die Gesundheitsgefahr künftig zu vermindern, müssen die Emissionen der Feinstaubemittenten reduziert werden.

Durch die Verbesserungen der Verbrennungstechnik in modernen häuslichen Feuerstätten für feste Brennstoffe konnte bereits in den letzten Jahren eine deutliche Reduzierung der Emissionen sowie eine Steigerung des Wirkungsgrades der einzelnen Geräte erreicht werden. Die Arbeiten an technischen Entwicklungen zur weiteren Reduzierung der Emissionen werden von den Herstellern stetig weitergeführt.

Um effektiv an der weiteren Emissionsminderung durch Primärmaßnahmen arbeiten zu können, sind Informationen zu Prozessen der Feinstaubentstehung, -zusammensetzung und -fortpflanzung bei der Verwendung fester Brennstoffe notwendig.

Durch die Optimierung der Verbrennungstechnik sollte in dem Vorhaben Grundlagenforschung für die häuslichen Feuerstätten für feste Brennstoffe betrieben werden, um die bestehenden Wissenslücken zu schließen, die Minderungsmöglichkeiten bezüglich des Feinstaubausstoßes aufzuzeigen und damit diese einer breiten Anwendung zuzuführen.

## 6.2 Ergebnisbewertung

Ziel des gemeinsamen Forschungsvorhabens war die Weiterentwicklung der Feuerungstechnik für Kaminöfen, Kachelöfen und Kamineinsätze und die Umsetzung von praxistauglichen Minderungsmaßnahmen für Feinstaub und für Produkte unvollständiger Verbrennung durch Primärmaßnahmen.

In dem Forschungsvorhaben sollten Demonstrationsfeuerungen (kleine chargenweise beschickte Feuerstätten - Kaminöfen, Kachelofen-Heizeinsatz, Kamineinsatz) für Holz mit geringen Emissionen von Partikeln und anderen Produkten unvollständiger Verbrennung in Zusammenarbeit mit dem IFK, Geräteherstellern und HKI über eine Optimierung der Verbrennungsbedingungen und der Einsatz einer Verbrennungsregelung entwickelt werden.

Durch das Vorhaben sollten Minderungsmöglichkeiten aufgezeigt und praxistaugliche Maßnahmen zur Reduzierung der Partikelemissionen und zur Verbesserung der Verbrennungsbedingungen umgesetzt werden. Es war das Ziel, dass Anhand der entwickelten und getesteten Demonstrationsfeuerungen den Heizgeräteherstellern eine Basis zur Verfügung stehen würden, um häusliche Feuerstätten für feste Brennstoffe mit geringen Emissionen anbieten zu können. Mit Hilfe der Untersuchungs- und Entwicklungsergebnisse sowie der wirtschaftlichen und technischen Bewertung war die Erarbeitung eines Grundlagenhandbuches für die Entwicklung von Feuerräumen mit geringen Emissionen geplant. Dieses sollte als Leitfaden zukünftiger Entwicklungsarbeiten dienen, in dem auf die bauartbedingten Besonderheiten und Marktanforderungen der Feuerstätten detailliert eingegangen wird.

Ergebnisse dieses Projektes (für eine positive Verbrennung):

- Scheibenspülung von oben einströmen lassen
- kleine Schlitze verwenden
- keine Nachbrennzone bei Kaminöfen im Anschluss an den Füllraum
- wärmespeichernde Materialien für Feuerstätten verwenden, die häufig für längere Zeit in Betrieb sein sollen
- heiße Feuerraumwände erzeugen.

Die ersten Ansätze zur Optimierung und Entwicklung eines Musterfeuerraumes in diesem Projekt waren nicht erfolgversprechend.

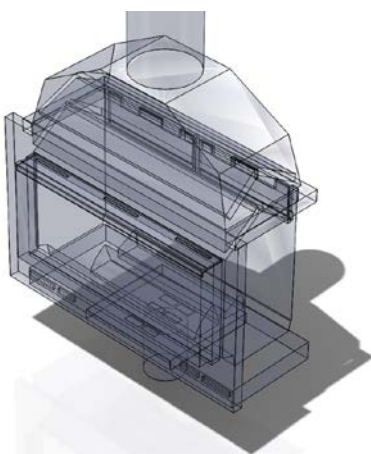
Aus einem Forschungsprojekt der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) für die Weiterentwicklung von Einzelfeuerstätten für Braunkohlenbriketts wurde am IFK ein Musterfeuerraum erarbeitet und untersucht. Der Musterfeuerraum (mit 7,3 kW Feuerungswärmeleistung) wurde mit verschiedenen als positiv angenommenen Eigenschaften ausgestattet. Das Ergebnis der Untersuchungen zeigte, dass für klassische Feuerraumkonstruktionen die Reduzierung durch Primärmaßnahmen nur noch bedingt möglich ist.

Aufgrund bisheriger Ergebnisse aus diesem Projekt und aus dem AIF-Projekt gestaltet sich die Festlegung eines Musterfeuerraumes schwierig und konnte im Rahmen dieses Projektes nicht weiter verfolgt werden.

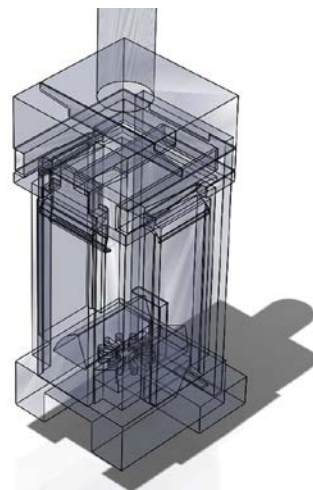
Für die Erzielung von positiven Ergebnissen in diesem Projekt wurde für die Weiterführung des Projektes daher abgestimmt, dass die drei Feuerstättenhersteller je ein 3-D-Modell einer bestehenden Feuerstätte an das IFK geben. Mit Hilfe der Simulation hat das IFK verschiedene Einströmungen und Umlenkungen an den Modellen untersucht und hieraus positive und negative Effekte zu der jeweiligen Feuerstätte festgehalten. Durch die Simulation wurden die Festbrennstofffeuerstätten leicht umgestaltet, so dass eine Optimierung von Feuerstätten im Allgemeinen vorangetrieben werden konnte und alle Feuerstättenhersteller von den Ergebnissen des Projektes profitierten. Zukünftig ist die Industrie an weiteren Forschungen hinsichtlich der CFD-Simulationen interessiert, besonders mit dem Augenschein auf mögliche Prototypberechnungen und Optimierungen der Verbrennungsprozesse.

### 6.3 Wesentliche Erkenntnisse für die Hersteller

Von den HKI Herstellern wurde jeweils eine bestehende Feuerstätte als 3-D-Modell dem IFK zur Verfügung gestellt, siehe nachfolgende Beispiele. Diese wurde in ein CFD-konformes Modell überführt und vernetzt. Die Netzqualität war von entscheidender Bedeutung. Die Geometrien der Feuerstätten weisen neben sehr engen Luftschlitzen (ca. 3 mm), einhergehend mit sehr kleinen und damit sehr viele Zellen, auch vergleichsweise große Volumina (z.B. Brennraum) mit größeren Zellen auf. Um eine Netzqualität von guter Qualität (minimale orthogonale Qualität > 0,2, maximale Schiefe < 0,85) zu erreichen, mussten verschiedene Strategien und Methoden getestet werden.



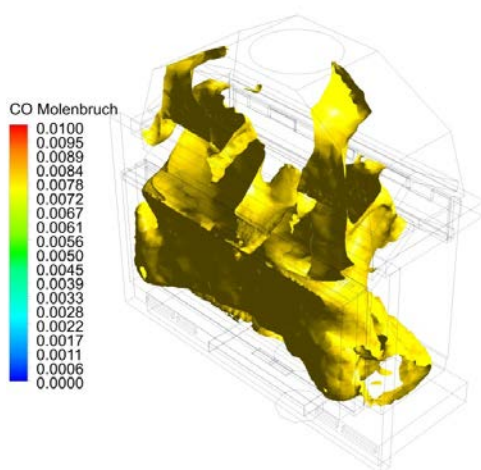
**Heizeinsatz Leda Sera 100**



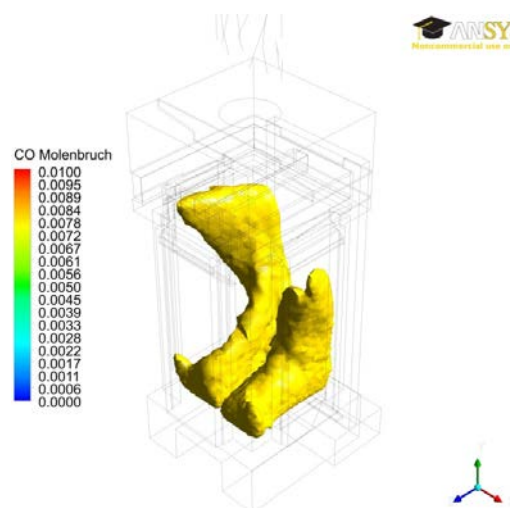
**Kaminofen Hase Modena**

Mit den vorher zu bestimmenden Randbedingungen, wie materialspezifische Daten für Wärmeleitung, Wärmedurchgang und Strahlung, konnten ein entsprechendes Simulationsmodell mit Verbrennung aufgebaut und erste Simulationen des Ist-Zustandes der

Feuerung gerechnet werden. Es stellte sich allerdings heraus, dass mit einer reinen Methanverbrennung, wie sie in den ersten Simulationen im Projekt implementiert wurde, keine plausiblen Ergebnisse erhalten werden. Die Höhe der Emissionen, die Verbrennungstemperaturen und die Oberflächentemperaturen entsprachen nicht den zu erwartenden Werten. Daher wurde ein Gasmisch aus CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O entwickelt, das den Eigenschaften von Holz entspricht. Dadurch konnten für die Feuerungsanlagen von z.B. der Fa. Hase und Fa. Leda Simulationsrechnungen durchgeführt werden. Zusätzlich wurden Simulationen mit verschiedenen Restsauerstoffgehalten im Abgas (6%, 8%, 10%, 12% bei Hase, 6%, 8%, 13% bei Leda) durchgeführt. Dabei zeigte sich das typische Emissionsverhalten bei unterschiedlichen Restsauerstoffgehalten in den Simulationsergebnissen. Ein sprunghafter Anstieg der CO-Emissionen ist bei 6% Restsauerstoffgehalt (Luftmangel), ein Optimum bei ca. 8% und ein leichter (Hase) bzw. steiler (Leda) Anstieg der Emissionen bei zu hohem Luftüberschuss mit 12% Restsauerstoffgehalt zu verzeichnen. Mit der entsprechenden Auswertung der Simulationsergebnisse ist es möglich, Bereiche mit hohen Emissionen im Brennraum zu lokalisieren. Diese ergeben sich auf Grund von Luftmangelsituationen, zu niedrigen Temperaturen oder durch schlechte Durchmischung von brennbaren Gasen und Verbrennungsluft. Durch eine entsprechend geänderte Luftströmung und Vorwärmung von Sekundärluft können diese Bereiche mit hohen Emissionen verringert werden. Es wurden entsprechende Modifikationen an den jeweiligen Feuerungsanlagen erstellt und diese ebenfalls bei den gleichen Sauerstoffklassen gerechnet. So konnten entsprechende Emissionsminderungen um ca. 50% erreicht werden. Wie sich diese Emissionsminderungen in der Praxis darstellen, soll durch Umbau und Emissionsmessung bei den Feuerungsanlagen durch die Hersteller untersucht werden.



**Isflächen CO ≥ 8.000ppm  
Kamineinsatz Leda Sera 100**



**Kaminofen Hase Modena**

### **Kaminheizeinsatz von Leda**

Im Simulationsmodell ist zu erkennen, dass die Verbrennungsreaktion im Brennraum stattfindet. Im Simulationsprogramm berechnet sich die Simulation in folgenden 2 Pfaden: die Reaktionsgeschwindigkeit und die Durchmischung.

In einigen Bereichen sind in der Simulation relativ hohe CO-Werte zu erkennen. Der Sauerstoffgehalt in diesen Bereichen ist in Ordnung, aber die Simulation zeigt, dass die Temperaturen für die Verbrennung zu niedrig sind.

Diese Ergebnisse dieser Simulation weichen von den Ergebnissen der Leda-internen Simulation ab, hier will Leda die Ergebnisse mit der internen Simulation nochmals prüfen.

Optimierung des Kaminheizeinsatzes:

Das IFK hat für die Simulation am Kamineinsatz im Rahmen der Optimierung den Auslass geändert/verengt und für den Brennstoff wurde eine Mulde verwendet.

Durch diese Konstruktionsbeeinflussung wird die Verbrennungsluft so beeinflusst, dass ein heißerer Bereich geschaffen wurde, so dass die resultierenden CO-Emissionen niedriger sind.

### **Kaminofen von Hase**

Auch hier ist im Simulationsmodell ist zu erkennen, dass die Verbrennungsreaktion im Brennraum stattfindet. Die Bereiche mit hohen CO-Werten haben hier genügend hohe Temperaturen, allerdings herrscht im Kaminofen hier Luftmangel.

Optimierung des Kaminofens:

Es wurde versucht, eine bessere Vorwärmung der Sekundärluft zu erreichen. Hierzu wurden drei Luftkanäle (ein Mittelkanal und zwei Seitenkanäle) für die Sekundärluft eingerichtet und die Umlenkung wurde mit Sekundärluftkanal verbunden.

Ergebnis: die Reaktion im oberen Bereich ist abgeschlossen und die Fläche mit hohen CO-Werten hat sich verkleinert!

Bereiche mit Luftmangel konnte reduziert werden und damit die CO-Emissionen, der Wirbel an der Scheibe wurde reduziert – es ist davon auszugehen, dass die Scheibe an der Stelle sauberer bleibt.

Bei längerem Betrieb des Ofens trat in der Praxis in diesem Bereich ein schwärzen (verrußen) der Scheibe auf.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In der novellierten Fassung der 1. BImSchV werden für Einzelraumfeuerstätten nur Anforderungen an Emissionsgrenzwerte aus der Typprüfung gestellt, in Ausnahmefällen sind Messungen vor Ort vorgesehen. Aufgrund der einfachen Bauweise der Feuerstätten und der Eingriffsmöglichkeiten der Betreiber ist nicht sicher gestellt, dass die Feuerungen im Praxisbetrieb diese Prüfstandswerte einhalten. So können z.B. durch ungeeignete Brennstoffqualitäten und Fehlbedienungen der Betreiber die Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung merklich erhöht werden. Da der Betreiber meist keinerlei Information über die aktuelle Qualität der Verbrennung hat, kann er erhöhte Emissionen kaum erkennen und vermeiden. Somit stellt die Typprüfung idealisierte Emissionswerte bereit und spiegelt nicht unbedingt den Praxisbetrieb dieser Feuerungsanlagen wieder.

Zur Reduzierung des Emissionsaufkommens von Produkten unvollständiger Verbrennung bei Einzelraumfeuerstätten sind weitere feuerungs- und regelungstechnische Optimierungen notwendig. Um weiteres Entwicklungspotential zur Verbesserung der Verbrennungsbedingungen zu erschließen, können verschiedene Werkzeuge zum Einsatz kommen. Eine Visualisierung der Strömung mittels Laser und Nebel in einem Kaltmodell der Feuerungsanlage kann einen ersten Eindruck über die Strömungs- und Mischungsverhältnisse geben. Es können hiermit allerdings keine Aussagen über das Emissionsverhalten der Feuerung getroffen werden. Hierzu kann die CFD-Simulation mit Reaktionsmodell einen wichtigen Beitrag leisten. Die in diesem Projekt benutzten Modelle können die Strömungsvorgänge in den Feuerungen und deren Emissionsverhalten für die Hauptverbrennungsphase bei den Chargenabbränden gut beschreiben.

Die Berechnungen an einem Kamineinsatz, einem Kaminofen und einem Kachelofeneinsatz zeigen, dass an die CFD-Modellerstellung und die anschließende Vernetzung hohe Anforderungen gestellt werden, um plausible Ergebnisse zu erzeugen. Dies erfordert ein hohes Maß an Wissen und Erfahrung. Auch bei der Beurteilung der Simulationsergebnisse sind die Strömungen sowie die Temperatur-, O<sub>2</sub>- und CO-Verteilungen in den Feuerungen differenziert zu beurteilen und zu bewerten.

Mit den Simulationsrechnungen können derzeit nur stationäre Verbrennungsbedingungen (beim Chargenabbrand entspricht dies in etwa der Hauptverbrennungsphase) beschrieben werden. Die Gesamtemissionen beim Chargenabbrand werden aber maßgeblich von der Anbrand- und auch Ausbrandphase mit beeinflusst. Deshalb ist die Bewertung dieser Feuerungen anhand der Simulationsrechnungen noch unvollständig bzw. muss eine exakte Übereinstimmung der berechneten CO-Konzentrationen mit Messergebnissen einer Realgasmessung nicht unbedingt vorrangiges Ziel der Berechnungen sein.

Bei Neuentwicklungen können mit der numerischen Strömungssimulation mit Integration eines vereinfachten Reaktionsmodells verschiedene Designvarianten in Bezug auf die Strömungsführung und die Verteilung von Temperatur, O<sub>2</sub> und CO verglichen und bewertet werden. Über die Gesamthöhe der zu erwartenden CO-Emissionen der Feuerung sind allerdings derzeit nur qualitative bzw. vergleichende Aussagen möglich. Für die bisher nicht erfassten Verbrennungsphasen Anbrand und Ausbrand sind neue Modelle zu entwickeln, damit auch diese Phasen mittels CFD-Simulation optimiert werden können.



## 8 Literatur

### 1. BImSchV (2010)

Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV) vom 15. Juli 1988 (BGBl. I, S. 1059), zuletzt geändert am 26. Januar 2010 (BGBl. I, Nr. 4, S. 38-56).

### Aigenbauer, S. (2011)

Präsentation zum Vortrag „Entwicklungsguideline zur Emissionsminderung“ beim Abschlussworkshop „Neue Öfen 2020“. Wien, Haus der Forschung, 14. Juni 2011.

### Ansys (2011)

„06 - Turbulence,“ in Introduction to ANSYS Fluent (Trainingsmaterial der Basisschulung), ANSYS Germany GmbH (<http://www.ansys-germany.de/>), 64295 Darmstadt.

### Dietl, S. (2012)

Validierung der CFD-Simulation eines Kaminofens, Diplomarbeit am Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik der Universität Stuttgart, Stuttgart.

### DIN CERTO (2011)

„Zertifizierungsprogramm Raumheizer für feste Brennstoffe mit schadstoffarmer Verbrennung nach DIN EN 13240“ / „Zertifizierungsprogramm Heizeinsätze (Kachel- und Putzofenheizeinsätze sowie Kamineinsätze) einschließlich offene Kamine mit schadstoffarmer Verbrennung für feste Brennstoffe nach DIN EN 13229“ [http://www.dincertco.de/de/kaminoefen\\_pelletofen\\_heizeinsaetze\\_herde\\_und\\_sonstige\\_haesusliche\\_heizgeraete.html](http://www.dincertco.de/de/kaminoefen_pelletofen_heizeinsaetze_herde_und_sonstige_haesusliche_heizgeraete.html) (Stand August 2011).

### Juschka, W; Struschka, M. (2012)

Untersuchungen zur Feinstaubentstehung und CO-Bildung beim Verbrennungsprozess in chargenweise betriebenen Hausbrandfeuerstätten und Entwicklung emissions- und partikelarmer Feuerungsanlagen. Endbericht zum AiF/FDBI-Vorhaben Nr. 16207 N. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK), Universität Stuttgart, Stuttgart.

### Kaltschnitt, M., Hartmann, H. (2009)

Energie aus Biomasse. Grundlagen, Technik und Verfahren. Springer Verlag, Heidelberg.

### Nussbaumer, T. (2010)

Emissionsfaktoren von Holzfeuerungen und Klimaeffekt von Aerosolen aus der Biomasse-Verbrennung. 11. Holzenergiesymposium 2010 <http://www.holzenergie-symposium.ch/download2010.html> (Stand August 2011).

Oser, M; Nussbaumer, T.; Müller, P.; Mohr, M.; Figi, R (2003)

Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen. Projekt im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Energie und des Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Verenum, Zürich.

Scharler, R. (2009)

CFD based design and optimisation of wood log fired stoves. 17. Europäische Biomasse Konferenz [http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Scharler-CFD\\_gestuetzte\\_Kaminofen\\_Entwicklung\\_2009-06-29.pdf](http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Scharler-CFD_gestuetzte_Kaminofen_Entwicklung_2009-06-29.pdf). (Stand August 2011).