

# **Low-Particle-Pelletfeuerung** im Leistungsbereich von 100 bis 500 kW

Projekt 100373 Vertrag 150467

Ausgearbeitet durch

**Michael Oser**, Verenum, 8006 Zürich

**Thomas Nussbaumer**, Verenum, 8006 Zürich

Unter Mitarbeit von

**Peter Müller**, Müller AG, 4710 Balsthal

**David Köchli**, Müller AG, 4710 Balsthal

**Kurt Meier**, Müller AG, 4710 Balsthal

Im Auftrag von

**Bundesamt für Energie**

Schlussbericht August 2004

ISBN 3-908705-09-6

**Auftraggeber**

Bundesamt für Energie

**Auftragnehmer**

Verenum, 8006 Zürich

Müller AG Holzfeuerungen, 4710 Balsthal

**Autoren**

Dr. Michael Oser, Verenum

PD Dr. Thomas Nussbaumer, Verenum

**Mitarbeit**

Peter Müller, Müller AG

David Köchli, Müller AG

Kurt Meier, Müller AG

**Begleitung**

Daniel Binggeli, Bundesamt für Energie

Dieses Dokument ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie erarbeitet worden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind alleine die Autoren verantwortlich.

ISBN 3-908705-09-6

Copyright © Verenum (Switzerland) 2004

Michael Oser, Thomas Nussbaumer:

Low-Particle-Pelletfeuerung für den Leistungsbereich von 100 bis 500 kW, Bundesamt für Energie, Bern, 2004

**Bundesamt für Energie BFE**

Worbentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. 031 322 56 11 Fax 031 323 25 00 office@bfe.admin.ch www.admin.ch/bfe

**Vertrieb**

ENET, Egnacherstrasse 69, CH-9320 Arbon Tel. 071 440 02 55 Fax 071 440 02 56

enet@temas.ch www.energieforschung.ch www.energie-schweiz.ch

# Inhaltsverzeichnis

|                                                      |           |
|------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Zusammenfassung.....</b>                       | <b>2</b>  |
| <b>2. Abstract .....</b>                             | <b>3</b>  |
| <b>3. Einleitung.....</b>                            | <b>4</b>  |
| <b>3.1 Ausgangslage .....</b>                        | <b>4</b>  |
| 3.1.1 Partikelemissionen aus Holzfeuerungen .....    | 4         |
| 3.1.2 Gesundheitsrelevanz von Aerosol-Partikeln..... | 6         |
| 3.1.3 Holzpellets und Pelletfeuerungen.....          | 6         |
| <b>3.2 Low-Particle-Konzept.....</b>                 | <b>7</b>  |
| <b>3.3 Ziel der Arbeit.....</b>                      | <b>8</b>  |
| <b>4. Methode .....</b>                              | <b>9</b>  |
| <b>4.1 Versuchsanlage .....</b>                      | <b>9</b>  |
| <b>4.2 Regelung .....</b>                            | <b>10</b> |
| <b>4.3 Messungen .....</b>                           | <b>11</b> |
| <b>4.4 Auswertungen.....</b>                         | <b>11</b> |
| <b>5. Resultate.....</b>                             | <b>14</b> |
| <b>5.1 Emissionen.....</b>                           | <b>14</b> |
| <b>5.2 Eigenschaften der Regelung .....</b>          | <b>17</b> |
| <b>6. Diskussion.....</b>                            | <b>19</b> |
| <b>6.1 Emissionen.....</b>                           | <b>19</b> |
| <b>6.2 Beurteilung der Regelung.....</b>             | <b>20</b> |
| <b>7. Literatur .....</b>                            | <b>22</b> |

# 1 Zusammenfassung

Die Verbrennung von Biomasse führt zu relativ hohen Partikelemissionen. In einem vorgängigen Forschungsprojekt wurde die Partikelbildung bei der Holzverbrennung analysiert und ein neues Konzept zur Reduktion der Partikelemissionen entwickelt (Low-Particle-Konzept) [Oser et al. 2003]. Dabei wurde gezeigt, dass die Partikel von automatischen Holzfeuerungen hauptsächlich aus Salzen bestehen und der Anteil an organischen Verbindungen unter 5 Massen-% liegt, falls eine quasi-vollständige Verbrennung erreicht wird. Die anorganischen Partikel (Salze) werden hauptsächlich über den Fest-Dampf-Partikel-Pfad, also durch Kondensation von verdampften Holzbestandteilen, gebildet.

Das Low-Particle-Konzept basiert in erster Linie auf einer ausgeprägten Sauerstoffarmut im Glutbett, welche die Oxidation von salzförmigen Holzbestandteilen zu leichter-flüchtigen Komponenten vermindert, die in der Abkühlphase wieder zu Partikeln werden. Weiter führt ein tiefer Gesamt-Luftüberschuss zu einer Verstärkung der Koagulation und damit zu einer Reduktion der Partikelanzahl.

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist die Umsetzung des Low-Particle-Konzepts an einer Holzpelletfeuerung im Leistungsbereich zwischen 100 und 500 kW. Dabei sollen Partikelkonzentrationen im Rohgas von deutlich unter  $50 \text{ mg/m}_N^3$  (13 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) erreicht werden. Dazu wurde eine 100 kW Prototyp-Feuerung entworfen, realisiert und optimiert. Um die Low-Particle-Betriebsanforderungen selbst bei wechselndem Leistungsbedarf in einem automatischen Betrieb aufrechterhalten zu können, wurde ein spezielles Regelungskonzept mit insgesamt 4 PI-Reglern entworfen und umgesetzt. Geeignete Reglergrößen wurden mit dem Ziegler-Nichols-Verfahren evaluiert.

Unter Verwendung der Low-Particle-Betriebsbedingungen konnten im gesamten Lastbereich von 20% bis 100% Partikelemissionen zwischen 6 und  $11 \text{ mg/m}_N^3$  (13 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) erreicht werden. Dabei lag der Glutbett-Luftüberschuss zwischen 0.33 und 0.37 und die CO-Emissionen betrugen stets weniger als  $70 \text{ mg/m}_N^3$  (13 Vol.-%  $\text{O}_2$ ). Im Vergleich dazu führte der Betrieb mit einem Glutbett-Luftüberschuss von 0.68 zu Partikelkonzentrationen von  $30 \text{ mg/m}_N^3$  (13 Vol.-%  $\text{O}_2$ ). Dies bestätigt das Reduktionspotential für Partikelemissionen mit Hilfe des Low-Particle-Konzepts von etwa 70% bis 80%. Bei der optimierten Feuerungsgeometrie konnte sowohl für die Partikelemissionen als auch für die CO-Emissionen keine eindeutige Abhängigkeit von der Kesselleistung (20% bis 100%) gefunden werden.

Mit der in diesem Projekt entwickelten Regelung können die Low-Particle-Bedingungen auch bei wechselndem Leistungsbedarf kontinuierlich eingehalten werden. Weiter ermöglicht die Regelung deutlich geringere Schwankungen des Luftüberschusses, so dass die Betriebsbedingungen präziser eingestellt werden können. Ein wesentlicher Vorteil des verwendeten Regelungskonzepts ist, dass sowohl der Gesamt- als auch der Primär-Luftüberschuss als Sollwert eingegeben werden kann und die entsprechenden Zuluft-Volumenströme automatisch eingeregelt werden.

## 2 Abstract

Biomass combustion leads to relatively high particle emissions. In a preceding investigation, particle formation in wood combustion was systematically analysed and a new concept to reduce the particle emissions was developed (low-particle-concept) [Oser et al. 2003]. It was shown that the particles from automatic wood furnaces consist mainly of salts with an organic content of typically less than 5 mass %, if the conditions for a quasi-complete combustion are safely met. These inorganic particles (salts) are mainly formed by the solid-vapour-particle path through condensation of volatilised wood constituents.

The low-particle-concept is based on a strongly reduced oxygen content (lack of oxygen) in the solid fuel conversion zone, which reduces the oxidation of wood constituents to higher volatile compounds which recondense to particles in the cooling phase. This lack of oxygen consequently reduces the particle mass concentration in the flue gas. Furthermore, a low total excess air ratio enhances the particle coagulation and hence reduces the particle number concentration.

The aim of the present project is to implement the low-particle-concept for an automatic wood pellet furnace in the size range from 100 to 500 kW. Particle concentrations distinctly lower than  $50 \text{ mg/m}_N^3$  (13 vol.-%  $\text{O}_2$ ) shall be reached. For this purpose, a 100 kW prototype furnace was designed, investigated, and optimised. To maintain the low-particle-conditions even under varying heat demand, a special control system with four PI controllers was designed. Suitable controller parameters were evaluated with the Ziegler-Nichols-method.

The low-particle-conditions resulted in particle mass concentrations between 6 to  $11 \text{ mg/m}_N^3$  (13 vol.-%  $\text{O}_2$ ) and CO-emissions below  $70 \text{ mg/m}_N^3$  (13 vol.-%  $\text{O}_2$ ) in the heat output range between 20% and 100% and at a glow bed excess air ratio between 0.33 and 0.37. In comparison, an operation at a glow bed excess air ratio of 0.68 resulted in particle emissions of  $30 \text{ mg/m}_N^3$  (13 vol.-%  $\text{O}_2$ ). Hence the results confirm the reduction potential of the low-particle-concept of approx. 70% to 80%. Furthermore, using an optimised furnace geometry the particle and CO-emissions were nearly independent of the boiler load.

Due to the control system which was developed for this investigation, the low-particle-conditions can be continuously maintained also under changing heat demands. Furthermore, this control system leads to lower fluctuations of the excess air ratio so that the operation conditions can be set more precisely. An important advantage of the applied control system is that the total excess air ratio as well as the glow bed excess air ratio can be fed into the control system and the air volume flows are adjusted according to the needed value.

## 3 Einleitung

### 3.1 Ausgangslage

Da die Biomasse und im speziellen Holz global gesehen eine zunehmende Rolle bei der Energiebereitstellung spielt und die Partikelemissionen neben den Stickoxidemissionen der ökologische Hauptnachteil der Bioenergie ist, nimmt die Bedeutung der Partikelemissionen aus Holzfeuerungen stetig zu [van Loo und Koppejan 2002].

Die Aerosolbildung im allgemeinen, d.h. die Bildung von festen und flüssigen Partikeln in einem umgebenden Gas, ist seit längerem Gegenstand ausführlicher Untersuchungen. Eine detaillierte Zusammenstellung geben die Werke von [Hinds 1998] und [Friedlander 2000]. Im folgenden wird die Aerosolbildung bzw. die Partikelbildung bei Holzfeuerungen diskutiert.

#### 3.1.1. Partikelemissionen aus Holzfeuerungen

Vergleiche mit anderen Heizsystemen zeigen, dass Holzfeuerungen auch bei annähernd vollständiger Verbrennung hohe Partikelmengen (Staub) emittieren [Nussbaumer und Hasler 1999, Kessler et al. 2000]. Grund dafür sind Salze aus dem Brennstoff, die partikelförmig emittiert werden. Man unterscheidet zwei Bildungsvarianten: Zum einen können diese Salze im Glutbett verdampft, mit dem Abgasstrom mitgeführt und in der Abkühlphase zu Partikeln rekondensiert werden (Fest-Dampf-Partikel-Pfad [Livbjerg 2001]). Dabei können andere Salze (chemische Verbindungen) entstehen als ursprünglich im Holz vorhanden waren. Die so entstehenden Partikelgrößen liegen in der Größenordnung von  $0.1\ \mu\text{m}$  [Hasler und Nussbaumer 1998, Oser et al. 2003]. Dies ist in der Regel der bedeutendste Bildungspfad bei der Holzverbrennung. Zum andern können schwerflüchtige Salze mit dem Abgasstrom mitgeführt werden ohne in die Gasphase überzugehen (Fest-Partikel-Pfad [Livbjerg 2001]). Die Salze bestehen hauptsächlich aus den positiven Ionen K und Ca und liegen als Sulfate, Chloride, Carbonate, Oxide und Hydroxide vor (negative Ionen). [Oser et al. 2003]

Daneben gibt es Partikel aus organischen Verbindungen aufgrund unvollständiger Verbrennung. Bei geeigneten Verbrennungsbedingungen ist der Anteil organischer Verbindungen an den Abgaspartikeln unter 5 Massen-% [Nussbaumer und Hasler 1999] und kann bei guten Verbrennungsbedingungen sogar unter 1 Massen-% gesenkt werden [Oser et al. 2003].

Die Partikelbildung bei der Verbrennung von Holz ist in Bild 3.1 dargestellt. Es werden 5 Hauptpfade unterschieden. Der bedeutendste Pfad bei geeigneter Verbrennung ist der 2. Pfad von links (Fest-Dampf-Partikel-Pfad). Die Verdampfung der anorganischen Holzkomponenten spielt somit eine zentrale Rolle. Die Verdampfung wird beeinflusst durch die Menge an zugeführter Luft bzw. des zugeführten Sauerstoffs und zwar über die folgenden Effekte [Oser et al. 2004]:

- Sauerstoff führt zur Oxidation anorganischer Holzbestandteile wie Kalium- und Calciumverbindungen, die so in leichter flüchtige Verbindungen umgewandelt werden. Dieser Effekt wurde als Haupteffekt identifiziert.
- Hohe Sauerstoffkonzentrationen können zu örtlich höheren Temperaturen und damit einer Begünstigung des Verdampfungsprozesses führen.
- Wenig Primärluft führt zu geringen Gasgeschwindigkeiten durch das Glutbett und reduziert die Wahrscheinlichkeit des Mitreissens von Aschepartikeln, die dann als kohlenstoff-

haltige Partikel aufgrund von unvollständigem Ausbrand frei werden können. Bei automatischen Holzfeuerungen spielt dieser Effekt aber kaum eine Rolle, da der Anteil der unverbrannten organischen Verbindungen am Partikelkollektiv gering ist.

Sauerstoffarmut im Glutbett kann somit zu deutlich geringeren Partikel-Massenkonzentrationen im Abgas führen. Die tiefsten Werte werden bei sehr tiefem Glutbett-Luftüberschuss erreicht, der aber noch genügend hoch ist um die minimale Temperatur zur Umsetzung der organischen Holzbestandteile zu erreichen. In einer Holzschnitzelfeuerung wurde der bezüglich Partikelemissionen optimale Glutbett-Luftüberschuss zwischen 0.2 und 0.4 bestimmt, und zwar in Abhängigkeit der Holzart [Oser et al. 2004].

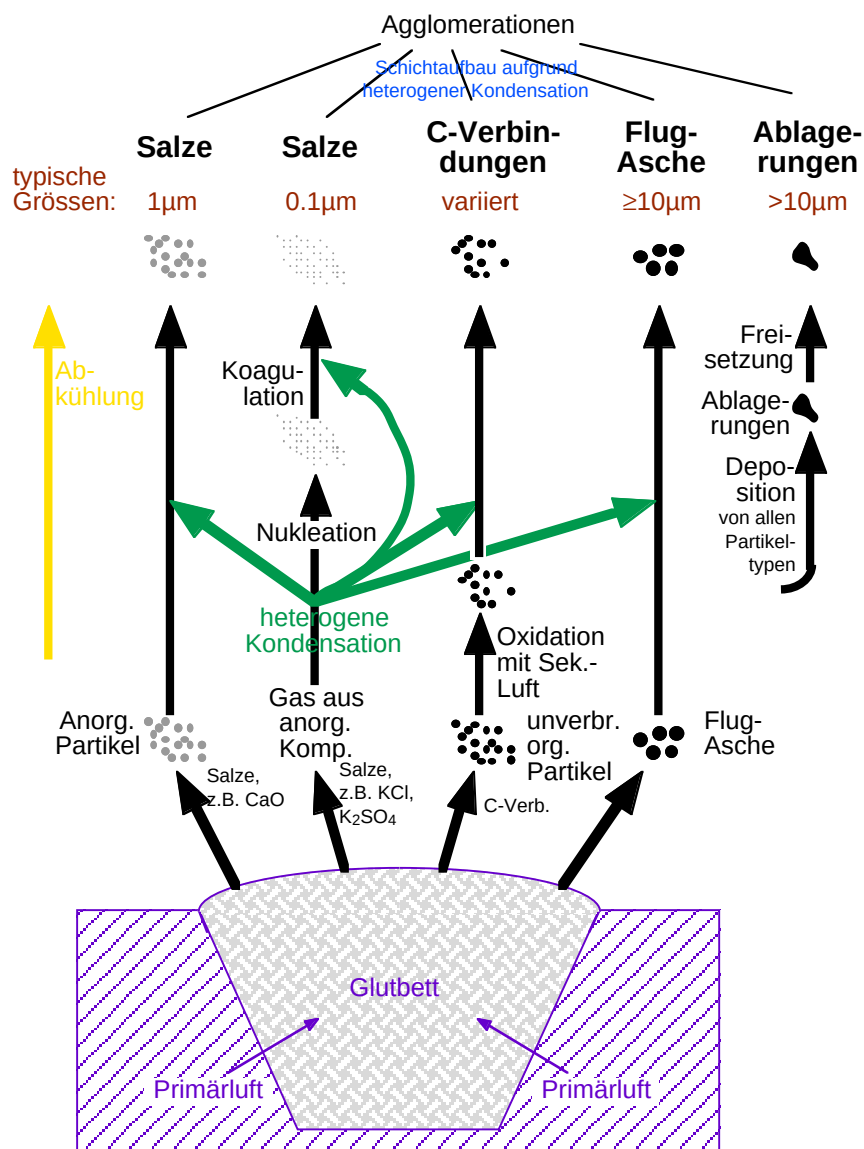


Bild 3.1: Partikelbildung bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz in automatischen Feuerungen. Es lassen sich daraus 5 verschiedene Partikeltypen ableiten [Oser et al. 2003].

Die Partikel-Anzahlkonzentration im Abgas wird hauptsächlich über die Koagulation in der Abkühlphase bestimmt. Eine Reduktion des Gesamt-Luftüberschusses führt zu verstärkter Koagulation und damit zu weniger Partikel im Abgas [Oser et al. 2004].

### 3.1.2. Gesundheitsrelevanz von Aerosolpartikeln

Es gilt heute als erwiesen, dass lungengängige Partikel – also Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als  $10\text{ }\mu\text{m}$  – in der Atemluft zu einer Vielzahl von Atemwegserkrankungen, aber auch zu Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems führen können [Dockery et al. 1993, Pope et al. 1995, Schwartz 1997, Braun-Fahrlander 2001, Hoek et al. 2002, Clancy et al. 2002, Donaldson et al. 2002]. Diese Erkenntnisse stützen sich sowohl auf epidemiologische Studien, bei denen eine deutliche Korrelation zwischen Feinstaub und Lungenerkrankungen gefunden wurden, als auch auf Untersuchungen an Zellen und Tieren.

Ultrafeine Partikel weisen die beste Korrelation zur Mortalität auf, was möglicherweise mit der grossen aktiven Oberfläche zusammenhängt [Donaldson et al. 2002]. Auf Basis dieser Erkenntnisse sind Immissionsgrenzwerte für PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> und in einigen Ländern sogar für PM<sub>1</sub> eingeführt worden (PM<sub>x</sub>: Masse der Partikel kleiner als  $x\text{ }\mu\text{m}$ ).

Verbrennungsprozesse in Verkehr, Haushalt und Industrie sind die bedeutendsten Quellen von ultrafeinen Partikeln ( $<1\text{ }\mu\text{m}$ ). Zudem können Verbrennungspartikel Träger von toxischen und kanzerogenen Substanzen wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sein, die an den Partikeloberflächen adsorbiert sind.

Die genauen Wirkmechanismen und gesundheitsschädigenden Agenzien sind heute allerdings nicht oder nur beschränkt bekannt. Somit ist auch unklar, welche der lungengängigen Partikel stark gesundheitsschädigend und welche allenfalls unproblematisch sind. Es wird heute vermutet (ist aber nicht wissenschaftlich gesichert), dass anorganische Partikel wie Salzpartikel ein geringeres gesundheitsschädigendes Potential aufweisen als z.B. Russpartikel aus der motorischen Verbrennung. Falls diese Vermutung stimmt, wären die Partikel aus der quasi-vollständigen Holzverbrennung (Salze) weniger gesundheitsrelevant als andere lungengängige Partikel.

### 3.1.3. Holzpellets und Pelletfeuerungen

Heute werden Pelletfeuerungen vor allem für Leistungen bis 50 kW eingesetzt. Es besteht aber eine starke Tendenz, Pellets in Zukunft auch bei höheren Leistungen bis etwa 500 kW einzusetzen, weil Holzpellets gegenüber Holzschnitzeln einige wesentliche Vorteile aufweisen:

- Kleineres Lagervolumen aufgrund der etwa 4 x grösseren Energiedichte (pro Volumen)
- Kleinere Fördereinrichtungen aufgrund der höheren Schüttdichte und der homogenen Grösse
- Einfachere Feuerungen mit einfacherer Mess- und Regeltechnik aufgrund der konstanten Brennstoffeigenschaften (Heizwert, Schüttdichte)
- In der Regel tiefere Emissionen an CO, Staub und NO<sub>x</sub> [Hasler et al. 2000]

Messungen bei Typenprüfungen an kleinen Pelletkesseln zwischen 12 und 80 kW haben mittlere Partikelkonzentrationen von etwa  $25\text{ mg/m}_N^3$  (13 Vol.-% O<sub>2</sub>) ergeben. Die einzelnen Werte dieser 70 Messungen in der Schweiz lagen zwischen 10 und  $45\text{ mg/m}_N^3$  (13 Vol.-% O<sub>2</sub>) [Rutschmann und Vock 2004]. Dabei handelt es sich wahrscheinlich um für eine bestimmte Leistung von Hand optimierte Betriebseinstellungen, so dass in der Praxis eher mit höheren Werten zu rechnen ist. Eine schwedische Untersuchung weist bei einer 2 MW-Feuerung nach Multizyklon zwischen  $45\text{ und }70\text{ mg/m}_N^3$  (13 Vol.-% O<sub>2</sub>) und bei Pelletöfen und Pelletbrennern mit Leistungen von 6 bis 22 kW zwischen  $20\text{ und }40\text{ mg/m}_N^3$  (13 Vol.-% O<sub>2</sub>) aus



[Johansson et al. 2003]. Im Vergleich dazu liegen die Partikelemissionen bei Holzschnitzelfeuerungen zwischen 100 kW und 1 MW höher und zwar im Bereich zwischen etwa 75 und 150 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup> (13 Vol.-% O<sub>2</sub>).

Der Hauptnachteil der Pellets sind die gegenüber Holzschnitzeln deutlich höheren Brennstoffkosten aufgrund der Pelletaufbereitung [Nussbaumer 2002]. Für die Pelletherstellung aus nassem Holz werden (hauptsächlich für die Trocknung) typischerweise etwa 14% der Brennstoffenergie aufgewendet [Hasler und Nussbaumer 2001]. Falls auf die Trocknung verzichtet werden kann (z.B. bei der Verwendung von trockenen Spänen) reduziert sich dieser Wert auf ca. 1.5% [Hasler und Nussbaumer 2001]. Aus ökologischer Sicht ist die Pelletaufbereitung vor allem dann problematisch, wenn für die Trocknung nicht eine erneuerbare Energie sondern z.B. Öl eingesetzt wird.

Um die oben erwähnten Vorteile von Holzpellets auch wirklich nutzen zu können, ist bedeutend, dass Pellets von konstanter und guter Qualität erhältlich sind. In einigen Ländern wurden deshalb zertifizierte Standards eingeführt, die eine Qualitätskontrolle des Brennstoffs gewährleisten und z.B. den Asche- und Fremdstoffanteil beschränken (Schweiz: Swisspellet oder SN 166600; Deutschland: DIN 51731; Österreich: ÖNORM).

Ein vermehrter Einsatz von Holzpellets für Anwendungen über 100 kW setzt voraus, dass geeignete Feuerungssysteme verfügbar sind, mit denen bei geringeren Gesamtkosten für das Feuerungssystem tiefe Staubemissionen erzielt werden. Für Pelletfeuerungen über 100 kW ist damit ein Zielwert unter 50 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup> anzustreben, um einen Vorteil gegenüber Holzschnitzeln zu gewährleisten und auch Anwendungen in Massnahmengebieten zu ermöglichen, wo ein Grenzwert von 50 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup> einzuhalten ist.

Dabei ist auch denkbar, dass auf einen Zyklon verzichtet werden kann, der neben zusätzlichen Kosten auch einen erheblichen Verbrauch an hochwertiger elektrischer Hilfsenergie zur Überwindung des Druckverlustes verursacht und damit ökologisch und ökonomisch unvorteilhaft ist.

## 3.2 Low-Particle-Konzept

Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojekts von Verenum Zürich, EMPA Dübendorf und Müller AG Balsthal wurde das Low-Particle-Konzept entwickelt und an einer Prototypanlage gezeigt. Dieses Low-Particle-Konzept führt bei der Verbrennung von Holzschnitzeln und ähnlichen Brennstoffen zu im Vergleich zum heutigen Stand der Technik sehr tiefen Partikelemissionen (Staubemissionen). Das Low-Particle-Konzept umfasst die – für eine Praxisanwendung hohen – folgenden Anforderungen:

- Betrieb bei sehr tiefem Glutbett-Luftüberschuss (0.2 bis 0.4) für tiefe Partikel-Massenkonzentrationen im Abgas
- Hohe Gasdichtheit der Feuerung inklusive Brennstoffzuführung um einen tiefen Glutbett-Luftüberschuss zu ermöglichen (z.B. Einsatz einer Zelleradschleuse)
- Betrieb bei tiefem Gesamt-Luftüberschuss (1.3 bis 1.6) für tiefe Partikel-Anzahlkonzentrationen im Abgas
- Späte Sekundärluftzuführung (ausgeprägte Luftstufung) und geeignete geometrische Anordnung zur sicheren Verhinderung einer partiellen Rückströmung der Sekundärluft zum Glutbett
- Ausreichend gross dimensionierter Feuerraum um ein hohes Glutbett zu ermöglichen, das sich aufgrund des tiefen Glutbett-Luftüberschusses einstellt

- Guter Ausbrand der organischen Kohlenstoffverbindungen, was zu tiefen CO-Werten (unter  $100 \text{ mg/m}_N^3$  (13 Vol.-%  $\text{O}_2$ )) und geringem organischen Kohlenstoffanteil der Partikel führt; dazu muss eine gute Vermischung der Sekundärluft mit dem Abgas und anschließender genügender Verweilzeit bei ausreichend hoher Temperatur gewährleistet werden (0.3 Sekunden auf  $800^\circ\text{C}$ )
- Genügend hohe Temperaturen im primären Brennraum, d.h. im Bereich des Glutbetts (über  $650^\circ\text{C}$ ) um eine quasi-vollständige Umsetzung der organischen Feststoffkomponenten zu gasförmigen Komponenten zu erreichen.

### 3.3 Ziel der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Pelletfeuerung für den Leistungsbereich von 100 bis 500 kW, die unter Verwendung des oben beschriebenen Low-Particle-Konzepts bei Swisspellets die Einhaltung eines Staubgrenzwerts von  $50 \text{ mg/m}_N^3$  (13 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) ohne Einsatz eines Staubabscheiders (weder Filter noch Zyklon) ermöglicht. Im Rahmen des Projekts soll dazu eine 100 kW-Prototypanlage konzipiert und erstellt werden, die in ähnlicher Form für Leistungen bis zu 500 kW geeignet ist.

Die Prototypanlage soll über eine automatische Zündung und Entaschung verfügen. Zur Einhaltung der Low-Particle-Bedingungen ist ein neues Regelungskonzept zu entwickeln. Dieses Regelungskonzept soll dafür sorgen, dass auch bei wechselndem Leistungsbedarf die Low-Particle-Bedingungen eingehalten werden.

Weiter soll die in [Oser et al. 2003] erarbeitete Theorie über die Partikelbildung und die Partikelreduktion bei Holzfeuerungen validiert werden.

Dazu sollen systematische Staubmessungen im Abgas der Pelletfeuerung bei Low-Particle-Betrieb durchgeführt werden und zwar bei unterschiedlichen Leistungen. Zum Vergleich sollen punktuell Staubmessungen bei konventionellen Betriebsbedingungen durchgeführt werden.

Die angestrebten tiefen Staubwerte sollen bei gleichzeitig tiefen CO-Emissionen unter  $100 \text{ mg/m}_N^3$  (13 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) erreicht werden, was einen guten Gasausbrand voraussetzt.

## 4 Methode

Für das vorliegende Projekt wurde eine Unterschubfeuerung, optimiert für die Verbrennung von Holzpellets unter Low-Particle-Bedingungen konzipiert und hergestellt. Dabei ist sowohl die Feuerungsgeometrie (Kap. 4.1) als auch die Feuerungsregelung von besonderer Bedeutung (Kap. 4.2).

### 4.1 Versuchsanlage

Die Versuchsanlage wurde bei der Müller AG in Balsthal aufgebaut. Bei der Feuerung handelt es sich um eine Unterschubfeuerung mit einer Nennleistung von 100 kW. Während des Projekts wurde die ursprüngliche Feuerungsgeometrie Typ A verbessert und durch die Feuerungsgeometrie Typ B ersetzt (Bild 4.1). Feuerungstyp B weist eine optimierte Geometrie im Bereich der Gasphasenoxidation auf um auch bei Teillast eine gute Ausbrandqualität zu erreichen.

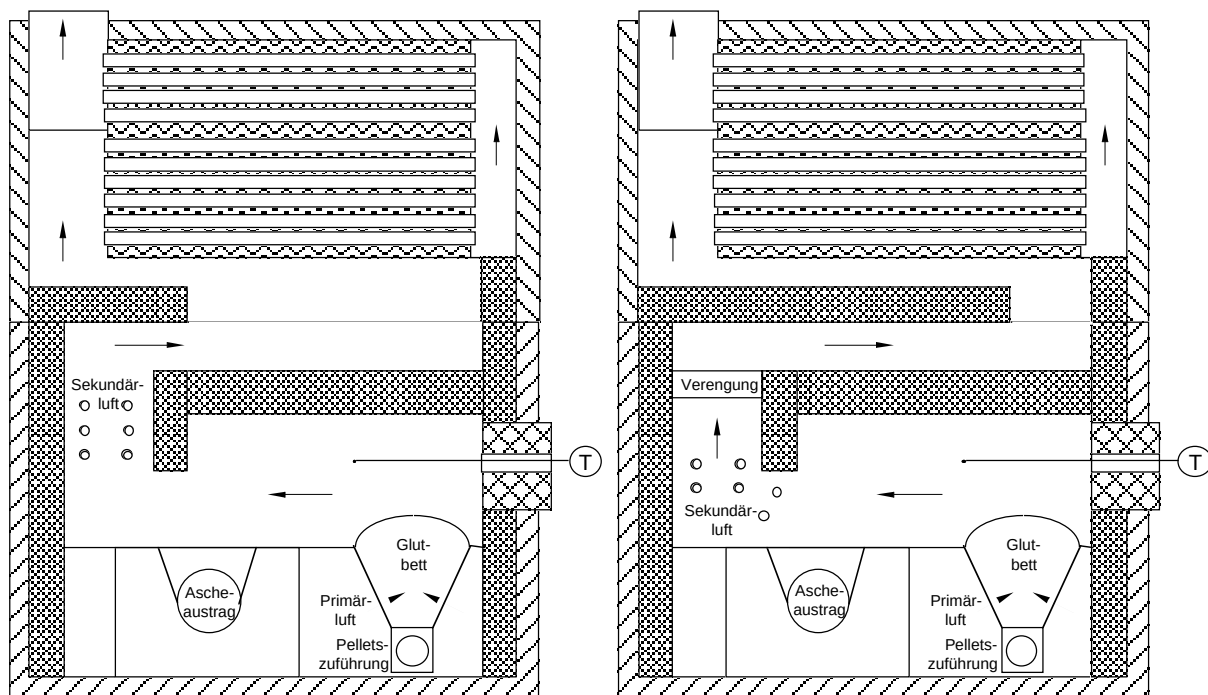


Bild 4.1: Schematische Darstellung der eingesetzten 100 kW – Pelletfeuerungen. Links: Feuerungstyp A für erste Untersuchungen. Rechts: Optimierter Feuerungstyp B. Am Feuerungstyp B wurden 3 Änderungen vorgenommen: 1. Nach Zugabe der Sekundärluft wurde eine Verengung angebracht um eine Verwirbelung und damit eine bessere Durchmischung von Abgas und Sekundärluft zu bewirken. 2. Die Zuführung der Sekundärluft wurde nach vorne verlegt um die Verweilzeit der Ausbrandphase zu verlängern. 3. Der Zwischenboden vor Wärmeüberträger wurde vergrößert um den Wärmeüberträger als kalten Strahlungspartner abzudecken und die Ausbrandphase so zu verlängern. (T: Temperatur)

Im Vergleich zu einer Holzschnitzelfeuerung gleicher Heizleistung wurden der Bereich des primären Feuerraums sowie der Pelletzuführkanal wesentlich kleiner ausgeführt. Dies ist möglich, weil die Energiedichte (pro Volumen) von Holzpellets im Vergleich zu Holzschnitzeln etwa 4 mal grösser ist.

## 4.2 Regelung

Um die strengen Anforderungen des Low-Particle-Konzepts automatisch und auch bei wechselnder Heizleistung kontinuierlich aufrecht erhalten zu können, musste ein spezielles Regelsystem entwickelt werden. Dazu wurden insgesamt 4 PI-Regler eingesetzt und deren Reglerparameter mit dem Verfahren von Ziegler-Nichols optimiert.

Für die Regelung wurden die folgenden Eingangsgrößen erfasst:

- Unterdruck im Feuerraum
- Kesseltemperatur
- Sauerstoffgehalt im Abgas
- Primärluft-Volumenstrom
- Sekundärluft-Volumenstrom

Daraus wurden die Steuergrößen für Abgasventilator, Pelleteinschub, Primärluft-Ventilator und Sekundärluft-Ventilator ermittelt.

Schematisch sieht das verwendete Regelungskonzept wie folgt aus:

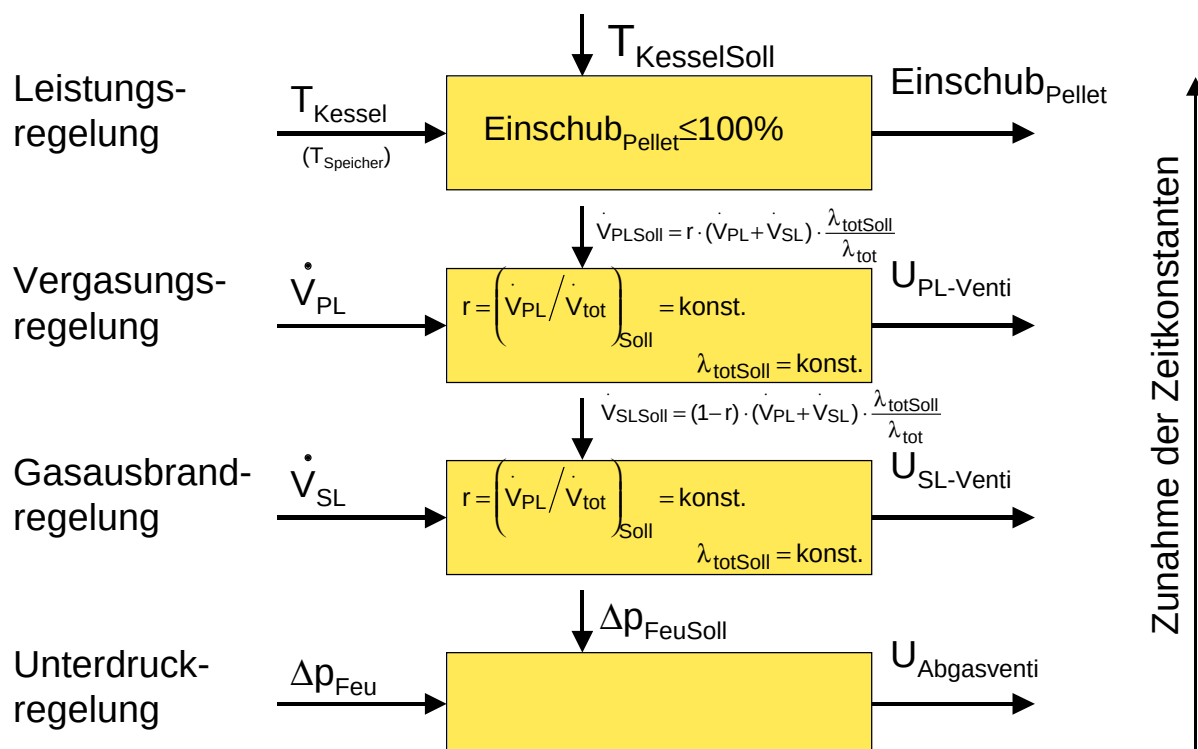


Bild 4.2: Verwendetes Regelungskonzept mit 4 PI-Reglern. Die Sollwerte sind abhängig von der aktuellen Feuerungsleistung. Für die Anfahr- und Ausschalt-Phase sind angepasste Sollwerte zu verwenden.

### 4.3 Messungen

Die Emissionsmessungen wurden bei stationärem Betrieb durchgeführt, wobei gleichzeitig auch eine Reihe von Betriebsgrössen erfasst wurden. Dazu wurden die Messungen erst gestartet, nachdem die Betriebseinstellungen während mindestens 2 Stunden fixiert waren. Für jede Einstellung der Feuerung wurden 3 halbstündige Messungen durchgeführt. Dabei wurden die folgenden Messgrössen erfasst und zwar – bis auf die Partikelmassenkonzentration – kontinuierlich (alle 5 Sekunden ein Messwert):

- Partikelmassenkonzentration gemessen mit einem aussenliegenden Filter mit gestopften Quarzwatte-Hülsen gemäss BUWAL-Empfehlungen [BUWAL 1996] und in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2066 Blatt 2. Dazu wurde ein Teilvolumenstrom dem Abgas isokinetisch entnommen.
- Konzentrationen von O<sub>2</sub>, CO und NO<sub>x</sub> im Abgas mit einem Gasanalysegerät.
- Volumenströme von Primärluft und Sekundärluft mit Thermoanemometern ergänzt mit einem Flügelradanemometer, das zur Kontrolle abwechselungsweise für Primärluft bzw. Sekundärluft eingesetzt wurde.
- Temperaturen in der primären Verbrennungskammer sowie im Abgas mittels Thermoelementen.

Die verwendeten Holzpellets erfüllen den Qualitätsstandard „Swisspellets“, welcher Grenzen bezüglich chemischer Zusammensetzung, Heizwert, Aschegehalt, Wassergehalt und Pelletgrösse festlegt.

### 4.4 Auswertungen

Der Glutbett-Luftüberschuss wurde aus der O<sub>2</sub>-Konzentration im Abgas und dem Verhältnis zwischen Primärluft-Volumenstrom und Sekundärluft-Volumenstrom berechnet:

$$\lambda_G = \lambda_p = \lambda \cdot \left( \frac{\dot{V}_p}{\dot{V}_p + \dot{V}_s} \right) = \left( \frac{20.95}{20.95 - O_2} \right) \cdot \left( \frac{\dot{V}_p}{\dot{V}_p + \dot{V}_s} \right) \quad (4.1)$$

|                |                                                 |
|----------------|-------------------------------------------------|
| $\lambda_G$    | Glutbett-Luftüberschuss [–]                     |
| $\lambda_p$    | Primär-Luftüberschuss [–]                       |
| $\lambda$      | Gesamt-Luftüberschuss [–]                       |
| $\dot{V}_p$    | Primärluft-Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]     |
| $\dot{V}_s$    | Sekundärluft-Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]   |
| O <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> -Konzentration im Abgas [Vol.-%] |

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad wurde aufgrund der chemischen und thermischen Verluste gemäss den folgenden Formeln bestimmt [Good und Nussbaumer 1992]:

$$\eta_f = 100 - V_{\text{therm}} - V_{\text{chem}} \quad (4.2)$$

$$V_{\text{therm}} = \frac{(T_A - T_U) \cdot (1.39 + \frac{122}{\text{CO}_2 + \text{CO}} + 0.02 \cdot u)}{\frac{H_{u \text{ atro}}}{100} - \frac{\Delta h_v}{10} \cdot u} = \frac{(T_A - T_U) \cdot (1.39 + \frac{122}{\text{CO}_2 + \text{CO}} + 0.02 \cdot 7.5)}{\frac{18300}{100} - 0.2442 \cdot 7.5} \quad (4.3)$$

$$V_{\text{chem}} = \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \cdot \frac{11800}{\frac{18300}{100} - \frac{\Delta h_v}{10} \cdot u} = \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \cdot \frac{11800}{\frac{18300}{100} - 0.2442 \cdot 7.5} \quad (4.4)$$

Daraus lässt sich auch der Kesselwirkungsgrad abschätzen: Es wurde angenommen, dass die Verluste durch Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung über die Oberfläche der Feuerung sowie die Verluste durch Brennbare im Feuerungsrückstand insgesamt 1% der zugeführten Energie ausmachen. Der Kesselwirkungsgrad liegt somit um 1% tiefer als der feuerungstechnische Wirkungsgrad (Erfahrungswert):

$$\eta_K = \eta_f - V_F - V_{\text{Str}} = \eta_f - 1\% \quad (4.5)$$

|                      |                                                                                                                    |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\eta_f$             | Feuerungstechnischer Wirkungsgrad [%]                                                                              |
| $\eta_K$             | Kesselwirkungsgrad [%]                                                                                             |
| $V_{\text{therm}}$   | Thermische Verluste [%]                                                                                            |
| $V_{\text{chem}}$    | Chemische Verluste [%]                                                                                             |
| $V_F$                | Verluste durch Brennbare im Feuerungsrückstand [%]                                                                 |
| $V_{\text{Str}}$     | Verluste durch Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung [%]                                                          |
| $T_A$                | Abgastemperatur [°C]                                                                                               |
| $T_U$                | Umgebungstemperatur [°C]                                                                                           |
| $\text{CO}_2$        | $\text{CO}_2$ -Konzentration im Abgas [Vol.-%]                                                                     |
| $\text{CO}$          | $\text{CO}$ -Konzentration im Abgas [Vol.-%]                                                                       |
| $u$                  | Holzfeuchtigkeit (bezogen auf absolut trockenes Holz) [%]: 7.5% (Pellets - typisch)                                |
| $H_{u \text{ atro}}$ | Heizwert des wasserfreien Holzes [kJ/kg]: 18'300 kJ/kg (mittlerer Wert)                                            |
| $\Delta h_v$         | Verdampfungsenthalpie von Wasser [MJ/kg]: 2.442 MJ/kg (bei 25°C, Standardtemperatur für thermochemische Messungen) |

Der zugeführte Brennstoffenergiestrom (Pellets) lässt sich über den Heizwert des Brennstoffs sowie der Luftzuführung und dem Gesamt-Luftüberschuss bestimmen:

$$\dot{Q}_{\text{Zu}} = \frac{H_{u \text{ atro}} \cdot (1+u) \cdot (V_p + V_s)}{V_{\text{stöch}} \cdot \lambda} \cdot \left( \frac{T_{\text{Ref}}}{T_{\text{Ref}} - T_U} \right) \cdot \left( \frac{p_U}{p_{\text{Ref}}} \right) \quad (4.6)$$

Die Kesselleistung wurde kontinuierlich über den zugeführten Brennstoffenergiestrom (Formel 4.6) und den Kesselwirkungsgrad (Formel 4.5) bestimmt:

$$\dot{Q}_K = \eta_K \cdot \dot{Q}_{\text{Zu}} = \eta_K \cdot \frac{H_{u \text{ atro}} \cdot (1+u) \cdot (V_p + V_s)}{V_{\text{stöch}} \cdot \lambda} \cdot \left( \frac{T_{\text{Ref}}}{T_{\text{Ref}} - T_U} \right) \cdot \left( \frac{p_U}{p_{\text{Ref}}} \right) \quad (4.7)$$

|                       |                                                               |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------|
| $\dot{Q}_{\text{Zu}}$ | Zugeführte Brennstoffenergiestrom (Pellets) [kW]              |
| $\dot{Q}_K$           | Kesselleistung [kW]                                           |
| $V_{\text{stöch}}$    | Stöchiometrisches Verbrennungsluftvolumen [m³/kg]: 4.58 m³/kg |
| $T_{\text{Ref}}$      | Referenztemperatur [°C]: 0°C                                  |
| $p_{\text{Ref}}$      | Referenzdruck [mbar]: 1013 mbar                               |

$p_U$       Umgebungsdruck [mbar]

Der Kesselwirkungsgrad wird im allgemeinen als über ein Zeitintervall gemittelter Wert betrachtet. Hier wird der Kesselwirkungsgrad als momentaner Wert bestimmt, was bei einem stationären Betriebszustand zulässig ist.

## 5 Resultate

### 5.1 Emissionen

Tabelle 1 zeigt die Emissionsdaten sowie die zugehörigen Betriebsparameter, die an den Feuerungen der Typen A und B gemessen wurden. Beide Feuerungstypen sind in zwei unterschiedlichen Betriebsarten eingesetzt worden: Zum einen in einer konventionellen Betriebsart K, zum andern in der Low-Particle-Betriebsart LP. Weiter sind die Messwerte für verschiedene Leistungen zwischen 20% und 100% der Nennleistung dargestellt.

Tabelle 5.1: Emissionen und Betriebsparameter der Pelletfeuerungen der Typen A und B. (T: Temperatur in der primären Brennkammer (s. Bild 4.1);  $\eta_f$ : feuerungstechnischer Wirkungsgrad; n.g.: nicht gemessen)

| Feuerungstyp | Betriebsart | Last-<br>vorgabe | Kessel-<br>leistung | $\lambda$ | $\lambda_G$ | T       | $\eta_f$ | Partikel                                                   | CO                                                         | NO <sub>x</sub>                                            |
|--------------|-------------|------------------|---------------------|-----------|-------------|---------|----------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|              |             | [%]              | [kW]                | [-]       | [-]         | [°C]    | [%]      | [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]<br>(13% O <sub>2</sub> ) | [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]<br>(13% O <sub>2</sub> ) | [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]<br>(13% O <sub>2</sub> ) |
| A            | LP          | 100              | 109±1               | 1.49±0.00 | 0.30±0.00   | 845±16  | 89.8±0.1 | 15.9±4.8                                                   | 24±1                                                       | n.g.                                                       |
| A            | LP          | 50               | 64±1                | 1.50±0.00 | 0.30±0.00   | 727±26  | 94.2±0.2 | 19.1±2.1                                                   | 161±18                                                     | n.g.                                                       |
| A            | LP          | 20               | 26±1                | 1.54±0.06 | 0.36±0.04   | 795±2   | 97.1±0.2 | 45.2±12.5                                                  | 499±167                                                    | n.g.                                                       |
| A            | K           | 50               | 63±1                | 1.47±0.00 | 0.72±0.00   | 1193±29 | 93.6±0.1 | 30.9±2.7                                                   | 87±75                                                      | n.g.                                                       |
| B            | LP          | 100              | 102±2               | 1.48±0.00 | 0.33±0.00   | 878±6   | 87.5±0.1 | 10.5±1.2                                                   | 70±6                                                       | 198±6                                                      |
| B            | LP          | 50               | 64±3                | 1.33±0.01 | 0.37±0.01   | 817±14  | 94.8±0.1 | 8.8±1.0                                                    | 46±4                                                       | 149±1                                                      |
| B            | LP          | 30               | 31±1                | 1.50±0.01 | 0.33±0.01   | 745±5   | 96.9±0.7 | 11.2±1.5                                                   | 41±5                                                       | 147±5                                                      |
| B            | LP          | 20               | 22±2                | 1.98±0.18 | 0.37±0.01   | 722±6   | 97.9±0.1 | 6.3±0.7                                                    | 64±1                                                       | 151±14                                                     |
| B            | K           | 50               | 68±1                | 1.42±0.01 | 0.68±0.01   | 1306±5  | 92.4±0.0 | 29.8±0.5                                                   | 24±1                                                       | 111±1                                                      |

Die Diagramme der Bilder 5.1 und 5.2 zeigen den Einfluss von Kesselleistung bzw. Glutbett-Luftüberschuss auf die Partikelkonzentration im Abgas. Bild 5.1 zeigt dies für den Feuerungstyp A und Bild 5.2 für den Feuerungstyp B. Dabei wird unterschieden, ob die Feuerung mit konventionellen oder Low-Particle-Einstellungen betrieben wurde.



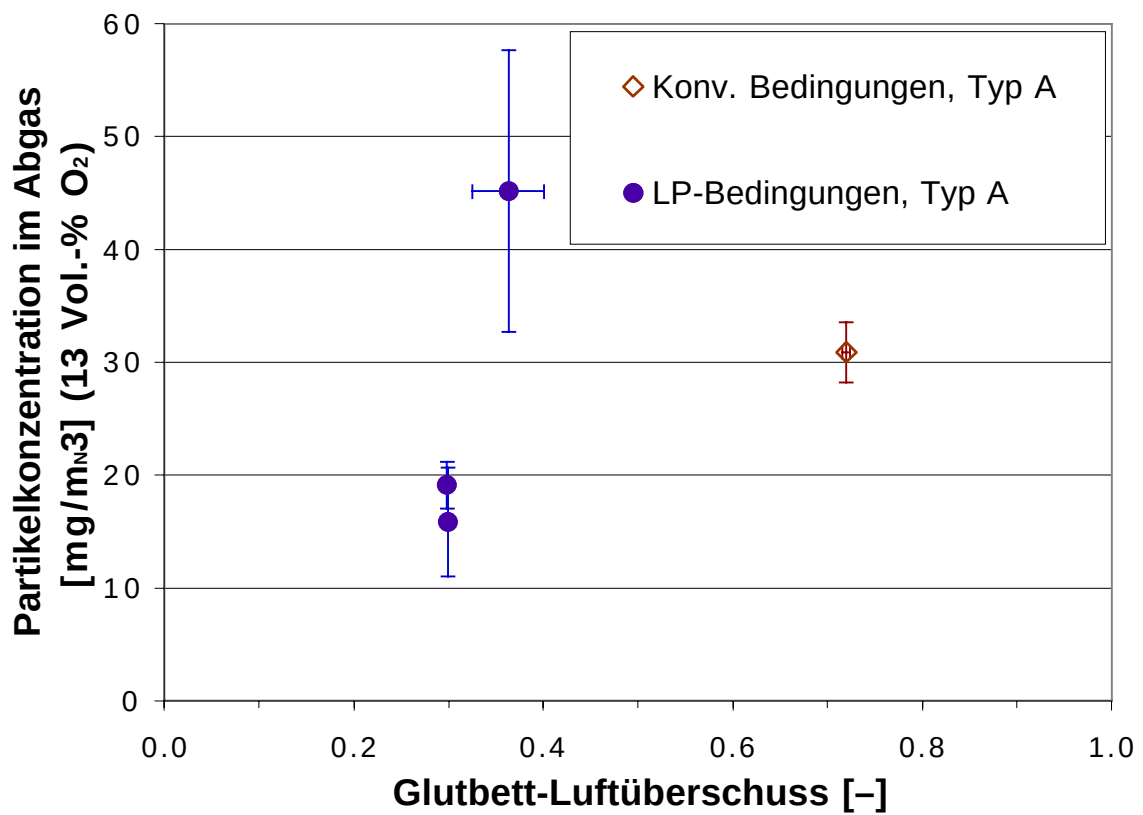
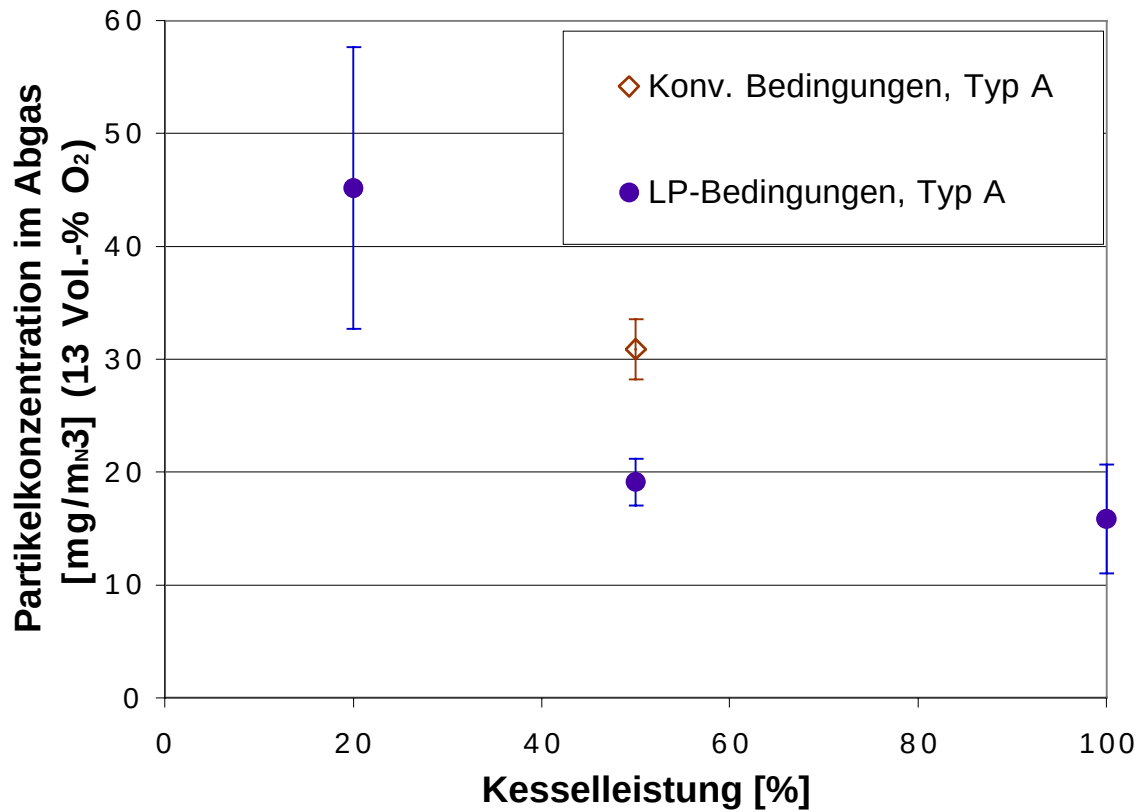


Bild 5.1: Partikelkonzentrationen im Abgas der Feuerung Typ A in Abhängigkeit der Kesselleistung (oben) und des Glutbett-Luftüberschusses (unten). Unterschieden werden konventionelle Betriebsbedingungen (konv. Bedingungen) und Low-Particle-Betriebsbedingungen (L-P-Bedingungen).

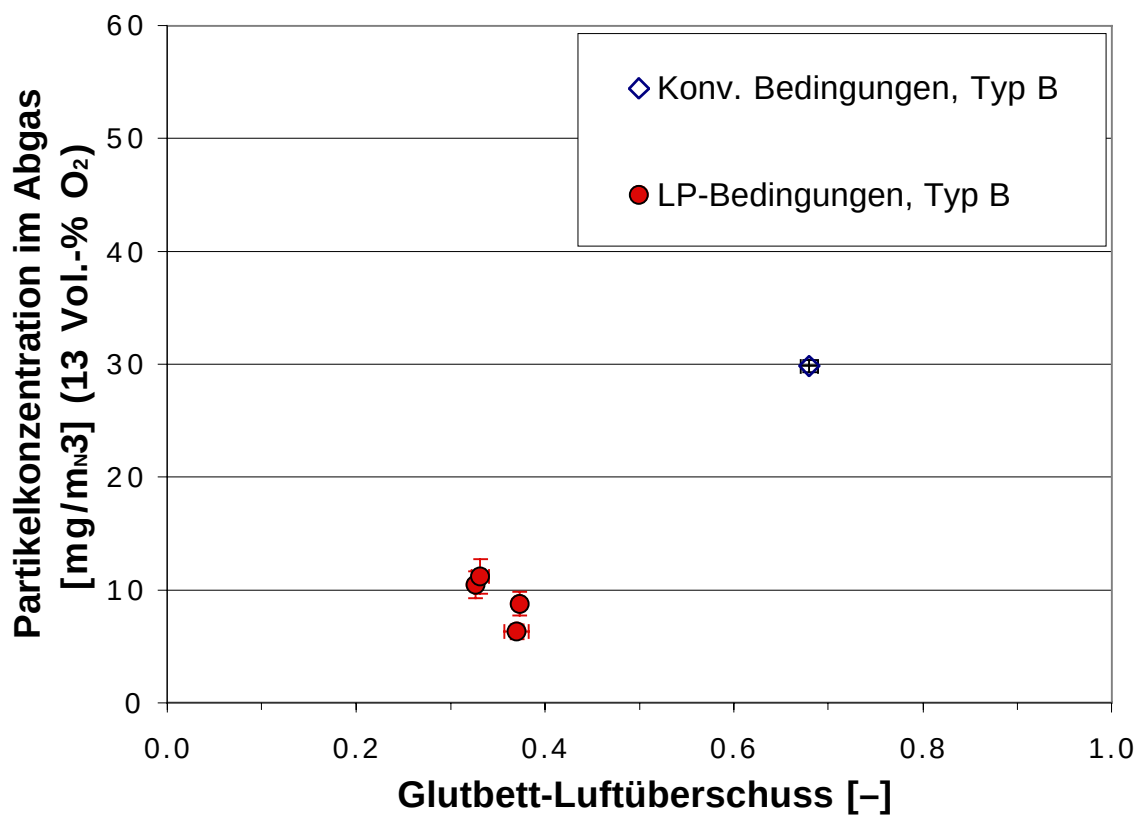
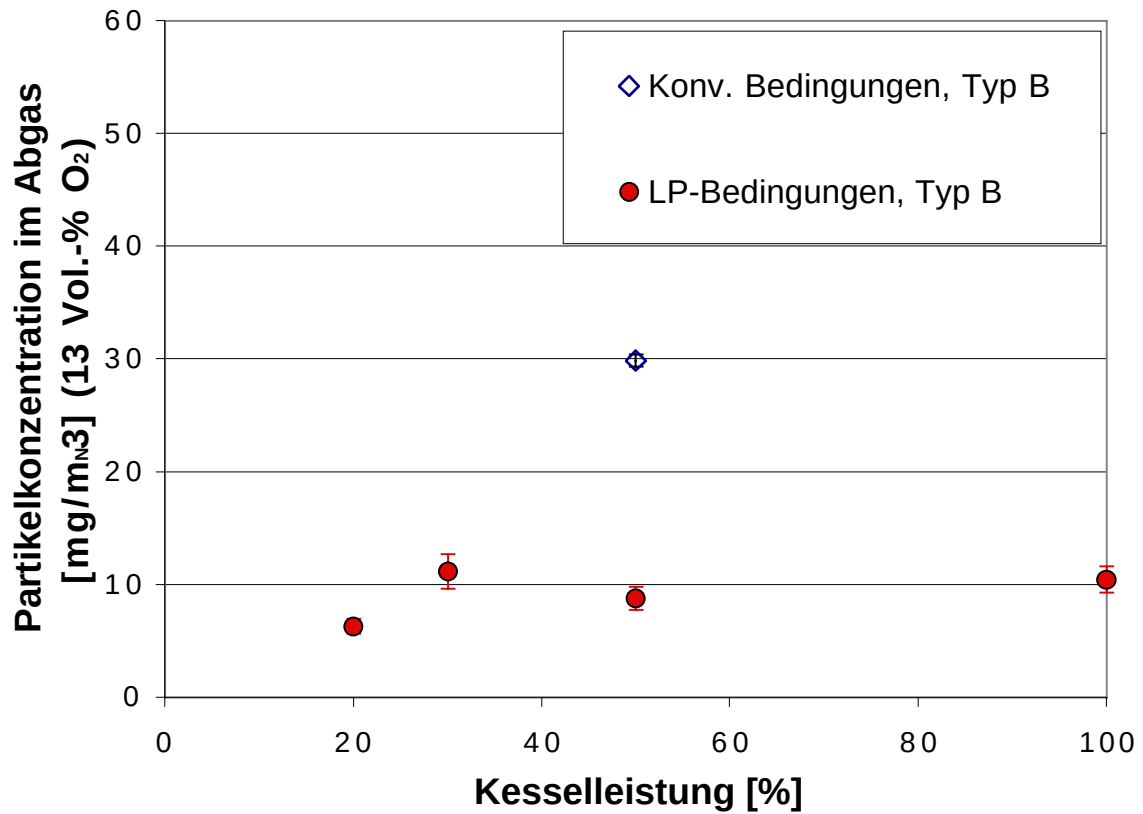


Bild 5.2: Partikelkonzentrationen im Abgas der Feuerung Typ B in Abhängigkeit der Kesselleistung (oben) und des Glutbett-Luftüberschusses (unten). Unterschieden werden konventionelle Betriebsbedingungen (konv. Bedingungen) und Low-Particle-Betriebsbedingungen (L-P-Bedingungen).

## 5.2 Eigenschaften der Regelung

Bild 5.3 zeigt den Verlauf von CO und O<sub>2</sub> im Abgas bei einer Reduktion der Last von 100% auf 20%. Nach Reduktion der Last dauert es 1 Minute bis die momentane Kesselleistung auf die Hälfte und etwa 5.5 Minuten bis sie auf 25% reduziert ist.

Die O<sub>2</sub>-Konzentration im Abgas steigt von den ursprünglichen 7 Vol.-% bei 100% Last auf einen Maximalwert von 9.3 Vol.-% bevor sie auf einen Endwert von 8.2 Vol.-% absinkt. Die O<sub>2</sub>-Konzentration während des stationären Betriebs bei 100% Last liegt bei  $7.03 \pm 0.37$  Vol.-% und der Gesamt-Luftüberschuss liegt bei  $1.50 \pm 0.04$  (Messwerterfassung alle 10 Sekunden).

Die CO-Konzentration im Abgas steigt nach der Lastreduktion kurzfristig um etwa  $10 \text{ mg/m}_\text{N}^3$  an und fällt dann auf einen Endwert knapp über  $40 \text{ mg/m}_\text{N}^3$  ab.

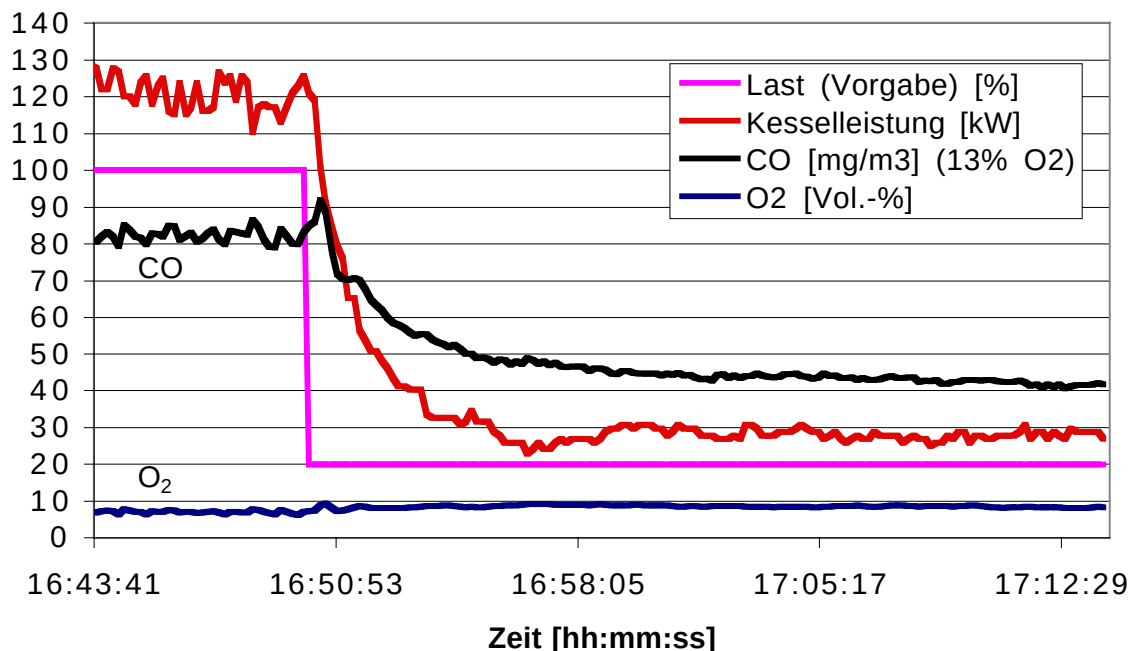


Bild 5.3: Sprungantwort des Feuerungssystems bei einer Reduktion der Vorgabe-Leistung von 100% auf 20%. Dargestellt sind die zeitlichen Verläufe der Vorgabe-Leistung in %, der momentanen Kesselleistung berechnet nach Formel 4.7, der CO-Konzentration im Abgas in  $\text{mg/m}_\text{N}^3$  bei 13 Vol.-% O<sub>2</sub> und der O<sub>2</sub>-Konzentration im Abgas.

Wie in Bild 4.3 gezeigt, wird der Pelleteinschub über die Kesseltemperatur geregelt. Die Leistungsregelung muss sicherstellen, dass die Kesseltemperatur nicht zu stark überschwingt. Dies wurde überprüft, indem die Feuerung unter Vollast bei einem geringen effektiven Leistungsbedarf angefahren wurde, was dem ungünstigsten Fall entspricht (worst case). Die Soll-Temperatur betrug 80°C. Bild 5.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Kesseltemperatur. Die maximal erreichte Temperatur betrug 82.3°C, so dass die Überschwingweite der Kesseltemperatur 2.3°C betrug.

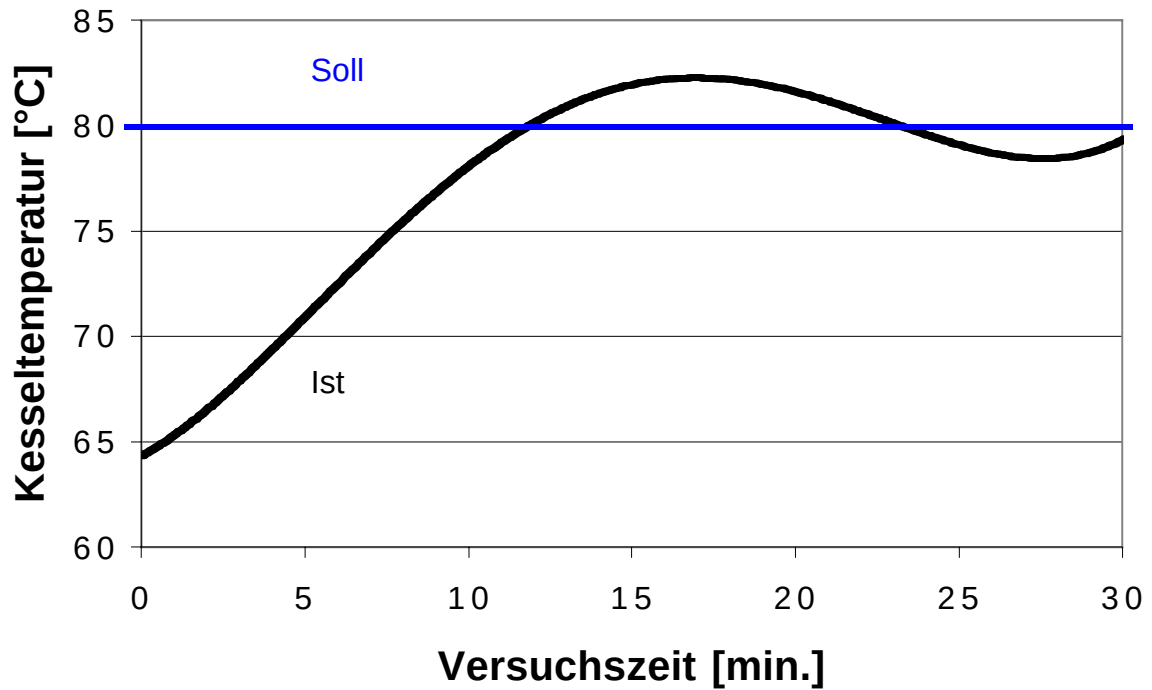


Bild 5.4: Charakterisierung der Leistungsregelung: Verlauf der Kesseltemperatur bei schnellem Anfahren der bereits heissen Feuerung bei geringem Leistungsbedarf (worst case). Die Überschwingweite beträgt 2.3°C.

## 6 Diskussion

### 6.1 Emissionen

Der Vergleich zwischen konventionellem und Low-Particle-Betrieb der Feuerung A zeigt bei 50% der Nennleistung eine Partikelmassenreduktion von 32 auf 19 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup> (13 Vol.-% O<sub>2</sub>) (Tab. 5.1, Bild 5.2). Bei geringer Kesselleistung steigen sowohl die Partikel- als auch die CO-Emissionen aufgrund unvollständiger Verbrennung deutlich an. Der Grund dafür ist, dass dann die Vermischung der brennbaren Gase mit der Sekundärluft ungenügend ist. Aus diesem Grund wurde die Feuerungsgeometrie zur Feuerung B optimiert (Bild 4.1).

Die optimierte Feuerungsgeometrie B führte zu einer besseren Vermischung der brennbaren Gase mit der Sekundärluft und zu einer längeren Verweilzeit bei genügend hoher Temperatur für den Ausbrand. Damit konnte eine quasi-vollständige Verbrennung über den gesamten Leistungsbereich von 20% bis 100% der Nennleistung erreicht werden. Die CO-Konzentrationen lagen für den gesamten Leistungsbereich unter 70 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup> (13 Vol.-% O<sub>2</sub>) (Tab. 5.1). Gleichzeitig wurden Partikelkonzentrationen zwischen 6 und 11 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup> (13 Vol.-% O<sub>2</sub>) gemessen. Bei konventionellem Betrieb hingegen lagen die Partikelkonzentrationen bei 30 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup> (13 Vol.-% O<sub>2</sub>), was etwa den typischen Werten von konventionellen Pelletkesseln entspricht (Kap. 3.1.3). Dies bedeutet, dass durch die Low-Particle-Einstellungen eine Reduktion der Partikelemissionen von etwa 70% erreicht wurden. Dabei ist zu erwähnen, dass dazu keine speziellen Einstellungen an der Feuerung vorgenommen werden mussten, sondern die Regelung die Feuerung automatisch im richtigen Betriebspunkt gehalten hat. Damit ist gewährleistet, dass diese sehr tiefen Partikelemissionen auch im automatischen Dauerbetrieb erreicht werden können.

Der Vergleich zwischen den Feuerungstypen A und B zeigt bei 20% Leistung, dass bei Typ B sowohl die CO-Konzentrationen als auch die Partikel-Konzentrationen im Abgas wesentlich tiefer sind: Die CO-Konzentrationen betrugen 64 anstatt 499 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup> (13 Vol.-% O<sub>2</sub>) und die Partikel-Konzentrationen 6 anstatt 45 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup> (13 Vol.-% O<sub>2</sub>). Somit zeigt der Feuerungstyp B im Vergleich zum Feuerungstyp A ein wesentlich besseres Teillast-Emissionsverhalten.

Mit dem Low-Particle-Konzept konnte am Feuerungstyp B über den gesamten Leistungsbe- reich tiefe Partikelemissionen erreicht werden. Eine Änderung des Feuerungsdesigns (wie beim Feuerungstyp A) kann sowohl bei Teillast als auch bei Vollast zu deutlich höheren Partikelemissionen führen. Dies ist insbesondere bei der Übertragung der Geometrie auf andere Feuerungsgrößen zu berücksichtigen (Konzipierung einer Baureihe). In der Praxis ist ein gutes Teillastverhalten gerade im zu betrachtenden Leistungsbereich zwischen 100 und 500 kW von grosser Bedeutung, da solche Anlagen zu einem grossen Teil bei Teillast betrieben werden.

Die Temperatur im Brennraum steigt mit steigender Leistung, sofern die selben Betriebsbedingungen verwendet werden. Im der Feuerung Typ B ist die Temperatur im primären Feuer- raum bei Vollast um etwa 156°C höher als bei 20% Last (Tab. 5.1). In der Literatur wird die Temperatur der Brennstoffvergasungszone als Schlüsselgrösse für die Partikelbildung aus Brennstoffbestandteilen betrachtet, da bei steigender Temperatur mehr Komponenten verga- sen [Knudsen et al. 2004, Wolf et al. 2004]. Allerdings ist diese Temperatur im untersuchten Bereich nur von untergeordneter Rolle, da die Partikelemissionen nicht mit zunehmender Leistung steigen. Dieses Resultat bestätigt frühere theoretische und gemessene Erkenntnisse,

wonach der Sauerstoffgehalt im Glutbett als wichtigster Parameter für die Partikelbildung bei der Holzverbrennung identifiziert wurde [Oser et al. 2003, Oser et al. 2004].

Die untersuchten Feuerungen ermöglichen eine konsequente Luftstufung, die tiefe Stickoxidemissionen ermöglichen. Die optimalen Betriebsbedingungen bezüglich der Stickoxidemissionen liegen bei einem Primär-Luftüberschuss von etwa 0.7 und einer Temperatur  $> 1150^{\circ}\text{C}$  [Nussbaumer 2003]. Unter diesen Bedingungen wirkt die Zone vor der Sekundärluftzuführung als Reduktionszone. In der vorliegenden Untersuchung entspricht der konventionelle Betrieb einem solchen Low- $\text{NO}_x$ -Betrieb. Dadurch sind die  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen im Abgas beim konventionellen Betrieb gegenüber dem Low-Particle-Betrieb reduziert und zwar beim Feuerungstyp B von 149 auf  $111 \text{ mg/m}_N^3$  (13 Vol.-%  $\text{O}_2$ ). Dies entspricht einer Reduktion von etwa 25%. In der Praxis sind die  $\text{NO}_x$ -Emissionen allerdings oft im Bereich derjenigen des Low-Particle-Betriebs, weil die Feuerungen entweder bei geringfügig höherem Primär-Luftüberschuss ( $>0.7$ ) oder ohne genügend grosse Reduktionskammer betrieben werden. Der Low-Particle-Betrieb stellt somit gegenüber dem Stand der Technik keine Verschlechterung bezüglich der  $\text{NO}_x$ -Emissionen dar, wenngleich der optimale Betrieb für die Partikelemissionen und der optimale Betrieb für  $\text{NO}_x$ -Emissionen nicht kongruent sind.

## 6.2 Beurteilung der Regelung

Für die Praxis ist entscheidend, dass Feuerungsanlagen im untersuchten Grössenbereich zwischen 100 und 500 kW nicht nur im stationären Betrieb, sondern auch bei wechselndem Leistungsbedarf in einem geeigneten Betriebszustand bleiben und so nicht erhöhte Emissionen oder tiefe Wirkungsgrade aufweisen. Denn in der Praxis werden solche Anlagen kaum konstant bei Vollast betrieben, sondern entsprechend des Heizbedarfs in der Regel des öftern auf Teillast umgestellt. In der Übergangsphase von Vollast auf Teillast werden dabei oft erhöhte  $\text{CO}$ -Konzentrationen im Abgas beobachtet.

Ein Hauptvorteil der in diesem Projekt entwickelten Regelung ist, dass sowohl der gewünschte Gesamt-Luftüberschuss als auch der gewünschte Primär-Luftüberschuss vorgegeben werden können und die Regelung die gewünschten Zuluft-Volumenströme automatisch anpasst und zwar auch bei wechselndem Leistungsbedarf. Dies ist auch ein Vorteil bei der Inbetriebnahme, da die Volumenströme für verschiedene Leistungen nicht vor Ort eingestellt werden müssen.

Bild 5.3 zeigt, dass eine rasche Reduktion der Leistung möglich ist, ohne dabei hohe Emissionen zu erzeugen oder den Wirkungsgrad wesentlich zu verschlechtern. Die Low-Particle-Bedingungen konnten bis auf den zwischenzeitlich etwas zu hohen Gesamt-Luftüberschuss eingehalten werden. (Der zu hohe Gesamt-Luftüberschuss dürfte kurzfristig zu einer etwas erhöhten Partikel-Anzahlkonzentration geführt haben, was allerdings hier nicht gemessen wurde.) Die  $\text{CO}$ -Konzentrationen konnten während der gesamten Sprungantwort unter dem Zielwert von  $100 \text{ mg/m}_N^3$  (13 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) gehalten werden.

Im stationären Betrieb konnte der Gesamt-Luftüberschuss deutlich konstanter gehalten werden als mit herkömmlichen Regelungssystemen (Bild 5.3): Typische Standardabweichungen des Gesamt-Luftüberschusses bei (gut betriebenen) automatischen Holzfeuerungen (inkl. Holzpelletfeuerungen) liegen im Bereich von 0.15 bis 0.4 [Oser et al. 2000, Oser et al. 2003], wogegen die Standardabweichung bei der untersuchten Anlage bei lediglich 0.04 Vol.-% lag. In die Praxis können die gewünschten Betriebsbedingungen somit genauer eingestellt werden. Insbesondere ist damit das Einstellen eines tieferen Gesamt-Luftüberschusses möglich, was zu einem höheren Wirkungsgrad führt.

Die verwendete Leistungsregelung sorgt dafür, dass die Kesseltemperatur auch im schlechtesten Fall nur wenig über die vorgegebene Soll-Temperatur hinausschwingt. Bei schnellem Anfahren bei bereits heisser Feuerung und geringem Leistungsbedarf lag die Überschwingweite bei lediglich 2.3°C, während bei heutigen Feuerungen in der Regel eine Überschwingweite von 5°C bis 10°C toleriert wird, bevor die Feuerung in einen Stand-by-Betrieb übergeht.

Insgesamt erfüllt die Regelung alle üblichen Anforderungen an eine Feuerungsregelung und ermöglicht darüber hinaus eine wesentlich präzisere Einstellung der Verbrennungsbedingungen sowohl im stationären als auch im instationären Betrieb.

## 7 Literatur

- [BUWAL 1996] BUWAL: Empfehlungen über die Emissionsmessungen von Luftfremdstoffen bei stationären Anlagen. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 1996
- [Braun-Fahrländer 2001] Braun-Fahrländer Ch.: Health effects of aerosols: What is the epidemiologic evidence? Aerosols from Biomass Combustion, International Energy Agency IEA und Bundesamt für Energie, ISBN 3-908705-00-2, 2001, 11-18
- [Clancy et al. 2002] Clancy L., Goodman P., Sinclair H., Dockery D.: Effect of air-pollution control on death rates in Dublin, Ireland: An intervention study. The Lancet, Vol. 360, 2002, 1210-1214
- [Dockery et al. 1993] Dockery D., Pope C., Xu X., Spengler J., Ware J., Fay M., Ferris B., Speizer F.: An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. The New England Journal of Medicine 24, Vol. 329, 1753-1759
- [Donaldson et al. 2002] Donaldson K., Brown D., Clouter A., Duffin R., MacNee W., Renwick L., Tran L., Stone V.: The pulmonary toxicology of ultrafine particles. J. Aerosol Med. 15(2), 2002, 213-220
- [Friedlander 2000] Friedlander S.: Smoke, Dust, and Haze: Fundamentals of Aerosol Dynamics. 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York 2000
- [Good und Nussbaumer 1992] Good J. und Nussbaumer Th.: Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeuerungen. Bundesamt für Energiewirtschaft, ENET, Bern 1992
- [Hasler et al. 2000] Hasler Ph., Nussbaumer Th., Jenni A.: Praxiserhebung über Stickoxid- und Partikelemissionen automatischer Holzfeuerungen. Bundesamt für Energie, Bern 2000
- [Hasler und Nussbaumer 1998] Hasler Ph., Nussbaumer Th.: Particle Size Distribution of the Fly Ash from Biomass Combustion. Biomass for Energy and Industry – 10th European Conference and Technology Exhibition, Würzburg 1998, 1623-1625
- [Hasler und Nussbaumer 2001] Hasler Ph., Nussbaumer Th.: Herstellung von Holzpellets: Einfluss von Presshilfsmitteln auf Produktion, Qualität, Lagerung, Verbrennung sowie Energie- und Ökobilanz von Holzpellets. Bundesamt für Energie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, ENET, Bern 2001
- [Hinds 1998] Hinds W.: Aerosol Technology. Properties, Behavior, and Measurements of Airborne Particles. 2nd Edition., John Wiley & Sons, New York 1998
- [Hoek et al. 2002] Hoek G., Brunekreef B., Goldbohm S., Fischer P., van den Brandt P.: Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. The Lancet, Vol. 360, 2002, 1203-1209
- [Johansson et al. 2003] Johansson L., Tullin C., Leckner B., Sjövall P.: Particle Emissions from Biomass Combustion in Small Combustors. Biomass & Bioenergy, 25, 2003, 435-446
- [Kessler et al. 2000] Kessler F., Knechtle N., Frischknecht R.: Heizenergie aus Heizöl, Erdgas oder Holz. BUWAL-Bericht, Schriftenreihe Umwelt Nr. 315, Bern 2000



- [Knudsen et al. 2004] Knudsen J., Jensen P., Dam-Johansen K.: Quantification of the Release of Cl, K and S to the Gas Phase from Combustion of Annual Biomass. 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Rome 2004 (in press)
- [Livbjerg 2001] Livbjerg H.: Aerosol formation from straw combustion – Danish experiences. Aerosols from biomass combustion, international seminar, International Energy Agency (IEA) and Swiss Federal Office of Energy, ISBN 3-908705-00-2, Zurich 2001, 29-30
- [Nussbaumer 2002] Nussbaumer Th.: Holzenergie, Teil 2b: Holzpellets und Pelletheizungen, Baudoc (56) 101, Schweizer Baudokumentation, Blauen 2002
- [Nussbaumer 2003] Nussbaumer Th.: Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. Energy & Fuels, Vol. 17, No 6, 2003, 1510-1521
- [Nussbaumer und Hasler 1999] Bildung und Eigenschaften von Aerosolen aus Holzfeuerungen. Holz als Roh- und Werkstoff, 57, 1999, 13-22
- [Oser et al. 2000] Oser M., Nussbaumer Th., Schweizer B., Mohr M., Figi R.: Untersuchung der Einflüsse auf die Partikelemissionen in einer Unterschubfeuerung. 6. Holzenergie-Symposium, 20. Oktober 2000, ETH Zürich, Bundesamt für Energie, Bern 2000, 51-68
- [Oser et al. 2003] Oser M., Nussbaumer Th., Müller P., Mohr M., Figi R.: Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen: Beeinflussung der Partikelemissionen durch Primärmassnahmen und Konzept für eine partikelarme automatische Holzfeuerung (Low-Particle-Feuerung). Bundesamt für Energie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, ISBN 3-908705-02-9, Bern 2003
- [Oser et al. 2004] Oser M., Nussbaumer Th., Müller P., Mohr M., Figi R.: Mechanisms of Particle Formation in Biomass Combustion, 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry, and Climate Protection, Rome 2004
- [Pope et al. 1995] Pope C., Thun M., Namboodiri M., Dockery D., Evans J., Speizer F.: Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US adults. Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 151, 1995, 669-674
- [Rutschmann und Vock 2004] Rutschmann C. und Vock W.: Holzenergie Schweiz: Qualitätssiegel für Klein-Holzfeuerungen, 26.4.04, Download: [www.holzenergie.ch](http://www.holzenergie.ch), MuttENZ 2004
- [Schwartz 1997] Schwartz J.: Air pollution and hospital admissions for cardiovascular disease in Tucson. Epidemiology, Vol. 8, 371-377, 1997
- [van Loo und Koppejan 2002] van Loo S. und Koppejan J.: Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing. International Energy Agency, Twente University Press, Twente 2002
- [Wolf et al. 2004] Wolf K., Müller M., Smeda A., Hilpert K., Sander B.: Influence of the Combustion Chemistry on the SO<sub>2</sub> Emission of Biomass Fired Power Plants. 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Rome 2004 (in press)