

Herstellung von Holzpellets

**Einfluss von Presshilfsmitteln auf Produktion, Qualität, Lagerung,
Verbrennung sowie Energie- und Ökobilanz von Holzpellets**

ausgearbeitet durch

Philipp Hasler, Verenum, Zürich

Thomas Nussbaumer, Verenum, Zürich

unter Mitarbeit von

Josef Bürli, Bürli Pellets, Willisau

im Auftrag von

**Bundesamt für Energie
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft**

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie und des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft entstanden. Für den Inhalt sind die Autoren verantwortlich.

Bezugsquelle

ENET, Egnacherstrasse 69, CH – 9320 Arbon
Telefon: 0041 (0)71 440 02 55, Fax: 0041 (0)71 440 02 56
enet@temas.ch – www.energieforschung.ch

Herstellung von Holzpellets

**Einfluss von Presshilfsmitteln auf Produktion, Qualität, Lagerung,
Verbrennung sowie Energie- und Ökobilanz von Holzpellets**

ausgearbeitet durch

Dr. Philipp Hasler, Verenum, Langmauerstrasse 109, CH – Zürich

PD Dr. Thomas Nussbaumer, Verenum, Langmauerstrasse 109, CH – Zürich

unter Mitarbeit von

Josef Bürli, Bürli Pellets, Willisau

im Auftrag von

**Bundesamt für Energie
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft**

Inhaltsverzeichnis

1	Abstract	7
2	Kurzfassung	8
3	Ausgangslage und Zielsetzung	11
	3.1 Ausgangslage	11
	3.2 Zielsetzung.....	12
4	Vorgehen	13
	4.1 Pelletherstellung	13
	4.2 Eigenschaften der Pellets	14
	4.3 Pelletverbrennung.....	15
	4.4 Pelletlagerung	15
	4.5 Energie- und Ökobilanz	16
	4.6 Durchführung	16
5	Methoden zur Untersuchung der Pelleteigenschaften	17
	5.1 Normative Anforderungen an Holzpellets.....	17
	5.2 Pelletprobenahme	19
	5.3 Physikalische Messgrössen.....	19
	5.3.1 Sägemehl- und Pelletfeuchte	19
	5.3.2 Korngrössenverteilung des Sägemehls.....	20
	5.3.3 Abrieb	20
	5.3.4 Dichte und Abmessungen	20
	5.4 Chemische Zusammensetzung	21
	5.4.1 Pellet und Presshilfsmittel	21
	5.4.2 Asche.....	21
6	Versuchsanlagen	23
	6.1 Pelletieranlage	23
	6.2 Feuerungsanlage.....	25
7	Ergebnisse der Pelletherstellung	27
	7.1 Feuchtegehalt des Rohmaterials	27
	7.2 Korngrössenverteilung des Rohmaterials.....	28
	7.3 Produktionsdaten	31
	7.4 Pelleteigenschaften.....	34
	7.4.1 Chemische Zusammensetzung.....	34

7.4.2	Abmessungen.....	35
7.4.3	Abriebverhalten.....	36
7.5	Abriebverhalten von Pellets anderer Hersteller	40
8	Ergebnisse der Pelletlagerung	43
8.1	Kellerklima.....	43
8.2	Pelletfeuchten nach Lagerung	44
8.3	Pelletabrieb nach Lagerung	46
9	Emissionen bei der Pelletverbrennung	47
9.1	Schadstoff/ λ -Charakteristik der Pelletfeuerung	47
9.2	Emissionen im Vollast-Betriebspunkt	49
9.3	Emissionen im Teillast-Betriebspunkt.....	51
9.4	Zusammensetzung der Aschen	53
10	Energie- und Ökobilanz	55
10.1	Energiebilanz	55
10.2	Ökobilanz	56
10.3	Variantenvergleich	58
11	Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	61
11.1	Rohmaterial.....	61
11.2	Pelletherstellung	62
11.3	Presshilfsmittel	63
11.4	Pelletlagerung	64
11.5	Pelletförderung.....	65
11.6	Pelletverbrennung.....	65
11.7	Fazit und Ausblick.....	66
12	Anhang	67
12.1	Messprotokoll der SO ₂ -Messung (Dräger-Röhrchen)	67
12.2	Transferkoeffizient von Schwefel in das Abgas.....	68
12.3	SMPS-Messungen	69
13	Literaturverzeichnis	79
13.1	Normen	79
13.2	Literatur	79

1 Abstract

Production of Wood Pellets

Influence of additives on production, quality, storage, combustion, and life cycle analysis of wood pellets

Philipp Hasler, Thomas Nussbaumer, Josef Bürli

There is a growing interest in wood pellets for decentralized heat production in stoves and boilers. For the production of wood pellets, native wood such as saw dust is used as raw material. To avoid contaminants in the fuel, the use of additives is prohibited according to the existing norms for wood pellets in Switzerland and Germany, while products from primary agriculture and biomass processing industry are allowed in Austria. Since there is only limited information on the influence of additives, the aim of the present work is to investigate the influence of additives with respect to the following factors:

1. Pellet production, especially the energy consumption
2. Pellet quality, especially the mechanical strength measured as attrition
3. Storage characteristics, especially the hygroscopy
4. Combustion behaviour, especially the pollutant formation (NO_x , particulates, CO, VOC, and contaminants), and ash slagging behaviour
5. The influence on energy balance and life cycle analysis (LCA).

Results from production, storage and combustion of wood pellets with and without additives are presented and process modifications are discussed. It is shown, that with all investigated additives neither the energy consumption nor the pellet throughput was improved. Furthermore, all except one of the additives resulted in lower mechanical strength of the pellets. However, one additive from the secondary biomass processing industry enabled excellent pellet properties. Further, the combustion of wood pellets in a 15 kW pellet burner yields significantly lower emissions of NO_x and particulates than typical combustion of wood chips in automatic wood furnaces. Experiments with a wood furnace without electronic combustion controls also reveals that advanced control technology should be applied to ensure optimum combustion conditions with different pellets. A life cycle analysis of the pellet chain shows that wood pellets are ecologically more favorable than wood chips thanks to the lower emissions during combustion, although a relevant additional environmental impact arises from the pelletizing process. However, there is a relevant potential to further reduce the environmental impact of wood pellets by process modifications such as emission reduction and heat recovery in the drying process.

2 Kurzfassung

In der Schweiz fallen jährlich rund 180'000 Tonnen naturbelassenes Restholz aus Säge- und Hobelwerken an, das für eine direkte Verwertung in Feuerungen schlecht geeignet ist oder am Ort des Anfalls nicht genutzt werden kann. Zur Nutzung dieses Potenzials bietet sich die Produktion von Pellets und die Wärmeerzeugung in dezentralen Pelletfeuerungen an.

Die Herstellung von Holzpellets erfolgt aus fein gemahlenem und getrocknetem Sägemehl in Ring- oder Flachmatrizenpressen unter hohem Druck und leicht erhöhter Temperatur. Eine wichtige physikalische Eigenschaft der Holzpellets ist die dabei erzielte mechanische Festigkeit und insbesondere ein möglichst geringer Abrieb. Pellets mit ungenügender Festigkeit neigen zum Zerfallen unter Bildung von Sägemehlstaub, welcher Staubemissionen beim Handling verursacht und den Feuerungsbetrieb stören kann. Nebst der Festigkeit ist bei der Pelletherstellung darauf zu achten, dass der Fremdenergieverbrauch, die Betriebskosten und die Emissionen möglichst tief sind.

Zur Festlegung von Qualitätsstandards für Holzpellets existieren verschiedene Normen, darunter in Deutschland die DIN 51731 sowie in Österreich die ÖNORM M7135. DIN und ÖNORM unterscheiden sich vor allem darin, dass die DIN Pelletierungszusätze explizit ausschliesst und zudem maximal zulässige Schwermetallgehalte festlegt. Die ÖNORM lässt dagegen Presshilfsmittel zu und sie fordert zudem eine minimale mechanische Festigkeit der Pellets. Nach ÖNORM zulässig sind chemisch nicht veränderte Produkte aus primären land- oder forstwirtschaftlichen Biomassen wie zum Beispiel Maisstärke oder Roggenmehl. Da die DIN mit der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) besser kompatibel ist als die ÖNORM, wurde sie im Januar 2001 in der Schweiz in die SN 166000 übernommen. Daneben hat der Pelletverband Austria (PVA) Produktionskriterien für Pellets erstellt, die auf die Kundenbedürfnisse ausgerichtet sind und sowohl Anforderungen der DIN als auch der ÖNORM enthalten.

Die mechanische Festigkeit ist nebst den Rohmaterialeigenschaften (z.B. Holzart, Dauer der Zwischenlagerung) auch von Prozessparametern abhängig. Während die Rohmaterialeigenschaften meist nicht gezielt verändert werden können, besteht ein gewisses Potenzial durch Variation der Prozessparameter. Ein weiteres Potenzial zur Beeinflussung der mechanischen Festigkeit wird zudem vom Zusatz von Bindemitteln bzw. Presshilfsmitteln¹ erwartet.

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss von verschiedenen Presshilfsmitteln auf die Pelletqualität, den Energieverbrauch bei der Herstellung, das Verhalten bei der Lagerung sowie die Verbrennungseigenschaften der Pellets in einer Feuerung untersucht. Dazu werden Pellets mit und ohne Presshilfsmittel aus eigener Produktion untersucht und mit Pellets von anderen Lieferanten verglichen. Die Pelletierungsversuche erfolgten an der Anlage der Firma Bürlí Pellets in Willisau mit Sägemehl aus der Region mit einer mittleren Feuchtigkeit von 84% atro. Mit einer computergesteuerten Datenerfassung wurden die wichtigsten Produktionsdaten aufgezeichnet. Mit Ausnahme eines Presshilfsmittels wurden chemisch nicht veränderte Biomassen aus der primären Landwirtschaft eingesetzt. Im weiteren wurde ein nicht ÖNORM-konformes Presshilfsmittel eingesetzt, das aus der sekundären Biomasseverarbeitung stammt und chemisch verändert ist.

¹ In der Literatur finden sich auch Bezeichnungen wie Hilfsstoffe, Gleitmittel, Bindemittel etc., um den Verwendungszweck dieser Zuschlagstoffe herauszustreichen, indem ihnen gleitende oder klebende Eigenschaften zugeschrieben werden. In diesem Bericht umfasst der Begriff „Presshilfsmittel“ jede Art von Zusätzen oder Zuschlagstoffen ausser Wasserdampf.

Die Resultate zeigen, dass der Fremdenergieaufwand in Form von elektrischer Hilfsenergie zur Herstellung von Pellets mit einem mittleren Durchmesser von 7 mm rund 1.5% bezogen auf den Heizwert der Pellets beträgt. Dies ist gering im Vergleich zu Daten von einem schwedischen Pelletwerk. Der Fremdenergieanteil in Form von Heizöl für die Sägemehltrocknung beträgt rund 12.8% und der gesamte Fremdenergieanteil beträgt rund 14.4%.

Zwischen den physikalischen Pelleteigenschaften, insbesondere dem Abrieb, und den Schwankungen im Feuchtegehalt und der Pelletproduktionsleistung lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang ermitteln. Keines der eingesetzten Presshilfsmittel führte zu einer signifikanten Steigerung der Produktionsleistung oder zu einer Minderung des Fremdenergieverbrauchs.

Zur Beurteilung der Pelletqualität wurden eine Reihe von Holzpellets von in- und ausländischen Produzenten untersucht, darunter auch ein Pelletmuster aus Kaffeehaurückständen. Die verschiedenen Pellets zeigen deutliche Unterschiede in den Eigenschaften. Die eigenen Pellets ohne Presshilfsmittel bewegen sich in Bezug auf den Abrieb im mittleren Bereich und unterschreiten den maximal zulässigen Wert von 2.3% gemäss ÖNORM nur knapp. Die übrigen Pelleteigenschaften liegen innerhalb der Vorgaben der ÖNORM.

Mit Ausnahme des nach ÖNORM nicht zulässigen Presshilfsmittels führen sämtliche der untersuchten Presshilfsmittel zu einer Verschlechterung der mechanischen Festigkeit, d.h. einer Erhöhung des Abriebs. Die mittleren Abriebswerte der untersuchten Holzpelletmuster schwanken im Bereich zwischen 1% und 4%, die Pellets aus den Kaffeehaurückständen weisen einen Abriebswert von über 9% auf. Mit Ausnahme der Pelletmuster aus Österreich und Dänemark sowie der eigenen Pellets mit Zusatz des nicht ÖNORM-konformen Presshilfsmittels weisen die übrigen Muster mittlere Abriebswerte auf, die über dem zulässigen Maximalwert gemäss ÖNORM liegen.

Von insgesamt vier verschiedenen Holzpellets und den Pellets aus Kaffeehaurückständen wurden die chemischen Inhaltsstoffe nach DIN bestimmt. Die vier Holzpellet-Sortimente unterschreiten sämtliche Grenzwerte und erfüllen damit die DIN-Anforderungen. Die Holzpellets zeigen untereinander keine signifikanten Unterschiede und sind aufgrund der chemischen Zusammensetzung nicht unterscheidbar. Die aus Kaffeehaurückständen hergestellten Pellets überschreiten einige der Holzpellet-Grenzwerte, nämlich den Aschegehalt und die Gehalte an Stickstoff und Kupfer.

Die in den verschlossenen Papiersäcken verpackten Pellets nahmen während der insgesamt 66 Tage dauernden Lagerung im Mittel rund 3.6% Wasser auf, was zu einer mittleren Pelletfeuchte von 10.1% führte. Das Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten war unabhängig von der Holzzusammensetzung und der Zugabe von Presshilfsmitteln. Dagegen zeigten die in den Säcken aus Polyethylen (PE) verpackten Pellets nach 35 Tagen Lagerung keinerlei Änderung der Pelletfeuchte. Die anschliessende offene Pelletlagerung während 80 Tagen im Kellerklima verursachte nur noch eine geringe zusätzliche Feuchtigkeitsaufnahme. Pellets verschiedener Hersteller oder Pellets mit Zusatz von verschiedenen Hilfsstoffen zeigten bei der offenen Lagerung dasselbe Aufnahmeverhalten von Feuchtigkeit.

Im Vergleich zu naturbelassenen Holzschnitteln sind die Emissionen, insbesondere NO_x und PM₁₀, bei der Pelletverbrennung deutlich geringer, sofern ein geeigneter Anlagenbetrieb gewährleistet wird. Die untersuchte Pelletfeuerung zeigt eine ausgeprägte Abhängigkeit einzelner Schadstoffe von der Luftüberschusszahl. Im Vollast-Betriebspunkt werden zum Teil deutlich unterschiedliche Emissionen an CO, Kohlenwasserstoffen und Staub beobachtet, die jedoch nicht den Pelleteigenschaften zuzuordnen sind, sondern dem unregelmässigen Anlagenbetrieb, der bei einigen Pellets zu Betrieb unter Luftmangel führte. Bei zwei Presshilfsmitteln wurden im Teillast-Betriebspunkt erhöhte NO_x-Emis-

sionen auf Grund der Inhaltsstoffe gefunden. Ein Hilfsmittel führt zu einem Anstieg der SO₂-Emissionen, der jedoch wegen Unsicherheiten bei der Messung nicht sicher quantifiziert werden konnte.

Anhand von gemessenen Stoff- und Energieströmen im Pelletwerk und der Emissionen bei der Verbrennung wurde eine Ökobilanz für die Pelletkette auf Basis der BUWAL-Studie Nr. 315 durchgeführt. Die Daten der BUWAL-Studie wurden dazu mit Emissionen für die Pelletherstellung und -verbrennung ergänzt, was einen Vergleich von Pellets mit Heizöl, Erdgas, Holzschnitzeln und Stückholz erlaubt. Die Ökobilanz beruht auf der Standardvariante für die Bedeutung des Treibhauseffekts gemäss BUWAL und sie basiert auf der Methode der ökologischen Knappheit. Die Ermittlung der Umweltbelastung für die Verbrennung von Holzpellets beruht auf drei Fallbeispielen:

- a) Emissionen gemäss eigenen Messungen
- b) Emissionen gemäss Prüfstandsmessungen (Literaturwerte)
- c) Emissionen wie Verbrennung von Holzschnitzel

Der Vergleich zeigt, dass die Verbrennung von Holzpellets basierend auf den eigenen Messwerten ökologisch vorteilhafter ist als von Holzschnitzeln, Stückholz und auch von Heizöl. Verantwortlich für den Vorteil der Pellets sind die im Vergleich zu Holzschnitzeln signifikant geringeren NO_x- und Staub-Emissionen bei der Verbrennung, was die zusätzlichen Emissionen durch die Pelletherstellung mehr als aufwiegt. Dennoch ist bei der Pelletherstellung noch ein Verbesserungspotenzial vorhanden, durch das die Umweltbelastung der Pelletkette noch um rund 30% vermindert werden kann. Dies bedingt allerdings erhebliche Prozessmodifikationen und Mehrkosten, nämlich einen Trockner mit Abwärmenutzung, Gewebefilter und Holzbefeuern.

Aus der Literatur ist bekannt, dass Pilze zu einer Delignifizierung und zu einer drastischen Verminderung der Scherfestigkeit des Holzes führen können. Das im untersuchten Pelletwerk verwendete Rohmaterial wurde meist während längerer Dauer (Tage bis Wochen) im Freien gelagert, so dass eine ligninabbauende Pilzinfektion nicht auszuschliessen ist. Als mögliche Anwendung ist deshalb denkbar, dass durch Verwendung von geeigneten Presshilfsmitteln ein durch Fäulnis verminderter Ligningehalt ausgeglichen werden könnte.

Hohe Qualitätsanforderungen an das Rohmaterial (z.B. sortenreine und rindenfreie Holzsägespäne aus frischem Fichtenholz) führen zu hohen Beschaffungskosten, einem reduzierten Marktangebot und ungünstigen Lieferbedingungen (z.B. längere Transportdistanzen, evtl. saisonale Zwischenlager). In einer Gesamtbetrachtung ist zu berücksichtigen, dass Holzpellets vor allem aus regionaler Produktion stammen sollten, da die Ökobilanz von Holzpellets mit langem Transportweg (z.B. Import aus Kanada oder Osteuropa) deutlich schlechter ausfällt. In naher Zukunft ist aber ein verstärkter Import von Pellets zu erwarten. Da der Einsatz von Presshilfsmitteln die Verwendung von qualitativ weniger hochwertigem Rohmaterial verbessern kann, sind die Umweltauswirkungen von Presshilfsmitteln, sofern sie die Verwendung von regionalem Rohmaterial ermöglichen, gegen die langen Transportwege abzuwägen. Der Einsatz von Presshilfsmitteln – und zwar auch von solchen, die nicht ÖNORM-konform sind oder in zu hoher Dosierung eingesetzt werden müssen, – kann deshalb gesamthaft betrachtet unter Umständen vorteilhaft sein.

3 Ausgangslage und Zielsetzung

3.1 Ausgangslage

In der Schweiz fallen in Säge- oder Hobelwerken grössere Mengen an naturbelassenem Restholz an, welche für eine direkte energetische Verwertung in Feuerungen schlecht geeignet sind oder am Ort des Anfalls nicht genutzt werden können. Der gesamte Jahresanfall an Sägemehl und Hobelspänen wird in der Schweiz auf ca. 275'000 m³ beziehungsweise rund 180'000 Tonnen geschätzt [Völlmin 2001]. Zur Nutzung dieses Potenzials an naturbelassenem Sägemehl und Sägespänen bietet sich die Herstellung von Holzpellets und die nachfolgende Verbrennung zur Wärmeerzeugung an, sofern eine geeignete regionale Infrastruktur zur Pelletherstellung und eine ausreichend hohe Anzahl von dezentralen Pelletfeuerungen zur Gebäudeheizung vorhanden sind.

Die Herstellung von Holzpellets erfolgt aus fein gemahlenem und getrocknetem Sägemehl in speziellen Pressmaschinen unter hohem Druck und leicht erhöhter Temperatur. Holzpellets mit Durchmesser von 6 bis 10 mm und Längen von rund 30 mm weisen folgende Eigenschaften auf:

- hohe Energiedichte im Vergleich zu Holzschnitzeln (rund 11.2 GJ/m³ Schüttvolumen gegenüber rund 2.8 GJ/m³)
- geringer und konstanter Wassergehalt (unter 10%), somit auch für Kleinanlagen geeignet
- vergleichsweise konstante Eigenschaften auch in Bezug auf Schüttdichte und Korngrösse
- einfaches Handling (riesel- und blasfähig für pneumatische Förderung, gute Dosierbarkeit)
- hoher Bedienungskomfort für den Verbraucher

Pelletfeuerungen bieten heute die Möglichkeit zur Nutzung des erneuerbaren Energieträgers Holz in kleinen, dezentralen Anlagen mit hohem Automatisierungsgrad und hohem Bedienungskomfort [Völlmin 2000, Gschwind 1998]. Durch die Homogenisierung des Brennstoffs zu einem Granulat mit konstantem Heizwert erzielen Pelletfeuerungen eine hohe Verbrennungsqualität mit geringen Emissionen. Im Vergleich zu einer grösseren Holzschnitzelheizung mit Wärmeverbund entfallen bei dezentralen Pelletfeuerungen die Kosten und Verluste für die Wärmeverteilung. Im Vergleich zu Holzschnitzeln weisen Pellets zudem eine wesentlich höhere Energiedichte auf, was entsprechend kleinere Lagervolumen ergibt. Dank dieser Vorteile gewinnt der Einsatz von Pellets in Öfen (Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion) und Zentralheizungskesseln (mit Wärmeverteilung über Wasser) zunehmend an Bedeutung. Während die Herstellung von Pellets sowie der Einsatz von Pelletfeuerungen in einigen skandinavischen Ländern und in Österreich bereits weit verbreitet sind, haben Pelletfeuerungen in der Schweiz erst einen marginalen Anteil. Zur Förderung von Pelletfeuerungen bedarf es einer gesicherten Infrastruktur zur Versorgung mit Pellets von definierter Qualität und zu konkurrenzfähigen Preisen.

Für die Förderwürdigkeit von Pelletfeuerungen und Anlagen zur Pelletherstellung ist zu beachten, dass durch eine geeignete Qualitätssicherung und Überwachung des Vertriebs sichergestellt wird, dass keine unzulässigen Inhaltsstoffe zur Herstellung der Pellets verwendet werden. Gleichzeitig gilt es auch, durch geeignetes Know how die mechanische Qualität sowie die Verbrennungseigenschaften der Pellets zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang existieren bei der Produktion und Verwertung von Pellets verschiedene offene Fragen und Probleme, insbesondere:

- Gewährleistung der mechanischen Qualität
- Gewährleistung der Langzeitstabilität und Verhinderung der Einwirkung von Feuchtigkeit
- Verhinderung der Zugabe unzulässiger Inhaltsstoffe, welche zu erhöhten Emissionen im Abgas, zu einer Kontamination der Asche oder zu einer Beeinträchtigung des Anlagenbetriebs führen können.
- Minimierung des Energieverbrauchs, Maschinenverschleisses und der Emissionen bei der Pelletherstellung
- Verhinderung der unerwünschten Staubbildung beim Pellethandling

Zur Sicherung der Qualität existieren europäische Anstrengungen zur Normierung. Die vorliegenden Pelletnormen werden sich in den kommenden Jahren in der Praxis bewähren müssen. In der Schweiz bestehen bei der Umsetzung der Pelletnormen und der Interpretation Luftreinhalte-Verordnung (LRV) noch offene Fragen, weshalb die vorliegende Untersuchung zum Beispiel im Zusammenhang mit der Zugabe von Presshilfsmitteln zusätzliche Informationen liefern soll.

3.2 Zielsetzung

In der vorliegenden Studie sollen im Zusammenhang mit der Herstellung und Verwendung von Pellets folgende Fragen abgeklärt werden:

- Energieaufwand zur Herstellung von Pellets aus naturbelassenem Holzsägemehl mit und ohne Presshilfsmittel wie Mais, Kartoffelmehl, Raps und ähnliche biogenen Stoffe
- Vergleich der Eigenschaften mit und ohne Presshilfsmittel in Bezug auf
 - a) mechanischen Abrieb
 - b) Lagerfähigkeit (zeitliches Verhalten sowie Beständigkeit gegen Feuchtigkeit)
 - c) Zusammensetzung (problematische Inhaltsstoffe)
 - d) Verbrennungsverhalten (Emissionen, Verschlackung)
- Sensitivität des Herstellungsverfahrens auf die Energie- und Ökobilanz der Pelletkette im Vergleich zu Heizöl, Erdgas, Holzschnitzeln und Stückholz
- Beurteilung der Herstellungsverfahren, der Ausgangsmaterialien und der Hilfsstoffe betreffend Umweltverträglichkeit und Zulässigkeit in Bezug auf LRV und Pelletnormen sowie Erarbeitung von Empfehlungen zur Handhabung der Pelletherstellung und -verwendung

Zu Vergleichszwecken werden nach Möglichkeit auch Pellets, die aus anderen Ausgangsstoffen als Holz bestehen, in die Untersuchungen mit einbezogen. Als mögliche Ausgangsstoffe kommen in erster Linie Rinde, Miscanthus, Stroh oder Rückstände aus der Lebensmittelverarbeitung in Frage.

4 Vorgehen

4.1 Pelletherstellung

Die vorliegende Untersuchung befasst sich in einem ersten Teil mit der Messung, Ermittlung und Beurteilung von Prozessparametern bei der Pelletherstellung aus naturbelassenem Sägemehl und deren Einfluss auf die Eigenschaften der Pellets. Die wichtigste Eigenschaft ist die mechanische Festigkeit. Pellets mit ungenügender Festigkeit neigen zum Zerfallen unter Bildung von Sägemehlstaub. Dieser verursacht unerwünschte Staubemissionen beim Handling der Pellets (z.B. während der Silobefüllung oder der Austragung) und er verunmöglicht oftmals einen zufriedenstellenden Anlagenbetrieb (Brückenbildung im Silo, Verstopfen von Fördereinrichtungen, schlechte Verbrennungswerte etc.). Hohe Staubemissionen beim Handling von Holzpellets schaden dem Image von Holzpellets. Die Gewährleistung eines minimalen Pelletabtriebs ist daher sowohl für den Pelletproduzenten als auch für den Endverbraucher entscheidend.

Als Mass für die mechanische Festigkeit dient das Abriebverhalten der Pellets nach einem normierten Messverfahren (siehe Kapitel 5.3.3). Die Abriebfestigkeit von Holzpellets ist insbesondere von folgenden Faktoren abhängig:

- a) Rohmaterial
- b) Pelletier-Technologie, angewandte Verfahren und Anlagenkonzept
- c) Art und Dauer der Lagerung (Aufnahme von Feuchtigkeit)
- d) Pelletierzusatzstoffe (Presshilfsmittel)

Alle diese Faktoren lassen sich in weitere Unterfaktoren aufschlüsseln.

Für das Rohmaterial sind dies z.B.:

- Holzart (z.B. Fichte, Tanne, Buche; mit/ohne Rindenanteilen)
- Form/Stückigkeit des Ausgangsmaterials (Sägemehl; Hobelspäne)
- Art und Dauer der Zwischenlagerung
- Korngrößenverteilung des Sägemehls
- Feuchtegehalt des Sägemehls

Für das im Rahmen dieses Projekts untersuchte Pelletierwerk bestehen nur geringe Einflussmöglichkeiten auf die Holzart sowie die Form und Lagerung des Ausgangsmaterials. Es gelangt in der Regel ausschliesslich Sägemehl aus umliegenden Sägereien und zum Teil mit hoher Rohfeuchte zum Einsatz. Dieses wird auf Abruf bestellt und je nach Jahreszeit unterschiedlich lange zwischengelagert. Das Sägemehl stammt ausschliesslich von Nadelholz und weist einen geringen Rindenanteil auf. Ebenso sind die Pelletiertechnologie und das Verfahrenskonzept gegeben.

Auf die Art und Dauer der Pelletlagerung wird in Kapitel 4.4 eingegangen.

Zu Vergleichszwecken konnten für die vorliegende Untersuchung Kaffeehaurückständen beschafft werden, während Pellets aus Rinde, Miscanthus oder Stroh auf dem Markt nicht beschafft werden konnten.

Ein vieldiskutierter und höchst kontroverser Aspekt bei der Herstellung von Holzpellets ist der Zusatz von Bindemitteln bzw. Presshilfsmitteln. Während die DIN 51731 den Einsatz von „Bindemitteln“ explizit ausschliesst, erlaubt die neue Fassung der ÖNORM M 7135 (Ausgabe November 2000) mit Einschränkungen den Zusatz von „Presshilfsmitteln“. Als zulässige Presshilfsmittel gelten dabei chemisch nicht veränderte Produkte aus der primären Land- und Forstwirtschaft wie z.B. Roggenmehl

oder Maisstärke. Zudem darf die zugesetzte Menge 2 Gew.-% nicht überschreiten. Das Verbot des Zusatzes von Presshilfsmitteln gemäss DIN ist allerdings auch in Deutschland teilweise sehr umstritten, da aus ökologischen Überlegungen kaum offensichtliche Gründe gegen den Einsatz von naturbelassenen, chemisch nicht veränderten biogenen Presshilfsmitteln wie etwa Getreidemehl sprechen (siehe z.B. <http://www.rhoen-hessen-forstconsulting.de>).

Nebst chemisch nicht veränderten Presshilfsmitteln aus der primären Land- und Forstwirtschaft gibt es eine grosse Zahl von nicht biogenen Presshilfsmitteln (z.B. Glycerin) oder von chemisch veränderten Presshilfsmitteln aus der sekundären Biomasseverarbeitung (z.B. wasserlösliche Cellulosederivate², Lignin), die z.B. zur Pelletierung von Viehfutterwürfeln in grossen Mengen eingesetzt werden.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist deshalb die Untersuchung von verschiedenen Presshilfsmitteln bei der Herstellung von Pellets sowie deren Auswirkungen auf die Pelletqualität und auf das Verhalten während der Verbrennung in einer Feuerung. Bei der Pelletherstellung werden folgende Produktionsfaktoren ermittelt:

- Energieaufwand für die Trocknung des Rohmaterials (Wärme)
- Energieaufwand für die Pelletierung (Strom)
- Durchsatzleistung der Pelletpresse
- Mechanische Festigkeit der Pellets.

Für die Pelletierungsversuche werden mit Ausnahme eines Presshilfsmittel nur chemisch nicht veränderte Presshilfsmittel aus der primären Landwirtschaft eingesetzt. Die Pelletierungsversuche erfolgen bei der Firma Bürlü Pellets in Willisau. Die Versuche werden hierzu mit betriebsüblichem Sägemehl aus Sägereien der umliegenden Region mit und ohne Zugabe von Presshilfsmitteln durchgeführt.

Vorgesehen ist die Produktion von mindestens sechs verschiedenen Pelletsorten mit und ohne Zusatzstoffen in unterschiedlicher Dosierung. Zusammen mit Pellets von konkurrenzierenden Unternehmen und mit Pellets aus anderen Rohmaterialien stehen für die weiteren Untersuchungen insgesamt 12 verschiedene Pelletsorten zur Verfügung.

4.2 Eigenschaften der Pellets

Zur Beurteilung der Pelleteigenschaften ist eine Reihe von Untersuchungen vorgesehen, welche im Überblick folgende Aspekte behandeln:

- Analyse der chemischen und physikalischen Eigenschaften der Pellets (bzw. der Rohmaterialien) gemäss ÖNORM und DIN (siehe Zusammenstellung in Kapitel 5.1).
- Versuche zur Abriebfestigkeit nach standardisiertem Messverfahren (Kapitel 5.3.3).
- Emissionen bei der Verbrennung von Pellets und Eigenschaften der Aschen.
- Versuche zur Lagerung und Alterung bei bekannten Bedingungen (Feuchte und Temperatur) und anschliessende erneute Ermittlung der Abriebfestigkeit und des Wassergehalts.

² Ein derartiges Produkt ist unter dem Namen „Pellan“ in der Mischfutterherstellung bekannt.

4.3 Pelletverbrennung

Das Verbrennungsverhalten ist insbesondere zur Beurteilung der mit Presshilfsmitteln versetzten Pellets von grosser Bedeutung. Die Verbrennungsversuche erfolgen in einer Pelletfeuerung einfacher Bauart (Beschreibung in Kapitel 6.2). Das Messprogramm beinhaltet folgende Messgrössen:

- Brennstoffdurchsatz (kontinuierlich)
- Abgastemperatur (kontinuierlich)
- CO₂, O₂, CO, NO, VOC (kontinuierlich)
- SO₂ (diskontinuierlich mit nasschemischer Methode; drei ausgewählte Brennstoffe)
- Gesamtstaub (diskontinuierlich; 3 Messzyklen pro Leistungsstufe)
- Anzahlverteilung der Partikelgrössen mittels SMPS³ (mehrere Messzyklen pro Leistungsstufe)
- Aschemenge und -eigenschaften

Die Emissionsmessdaten werden mit einem PC in 30 s-Intervallen erfasst und abgespeichert. Nebst den Emissionen bei der Verbrennung interessieren auch die Ascheeigenschaften, insbesondere allfällige Unterschiede beim Zusatz von Presshilfsmitteln. Nach den Verbrennungsversuchen werden daher repräsentative Ascheproben gezogen und im Hinblick auf den Restkohlenstoffgehalt sowie das Ascheschmelzverhalten analysiert.

4.4 Pelletlagerung

Zwischen der Produktion und dem Einsatz beim Endverbraucher müssen die Pellets in geeigneter Form gelagert werden. Die Lagerdauer beträgt typischerweise einige Monate. In dieser Zeitperiode können die Pellets bei unsachgemässer Lagerung Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen, wodurch ihre mechanische Festigkeit abnehmen und dadurch den Feuerungsbetrieb beeinträchtigen kann.

Bei der Pelletlagerung ist zwischen der Lagerung beim Produzenten, beim Grosshändler und beim Endverbraucher zu unterscheiden. Beim Produzenten oder Grosshändler ist davon auszugehen, dass diese aus wirtschaftlichen Gründen ein Eigeninteresse haben, die Pelletqualität durch sachgemässe Lagerung beizubehalten. Im Rahmen dieser Untersuchung interessiert daher vor allem das Lagerungsverhalten von Pellets beim Endverbraucher. Hierzu sind zwei Versuchsreihen vorgesehen. Einerseits werden verschiedene Pelletmuster in den originalen Verpackungen des Produzenten während rund 70 Tagen in einem typischen Kellerklima gelagert und anschliessend auf ihre mechanische Festigkeit hin untersucht und mit den ursprünglichen Werten verglichen. Andererseits werden verschiedene Pelletmuster auf einem Gitterrost in einem typischen Kellerklima bei bekannter Luftfeuchtigkeit und Temperatur offen gelagert und nach Erreichen der Endfeuchte wiederum auf ihre Festigkeit hin untersucht werden. Parallel dazu erfolgt die Ermittlung der zeitlichen Feuchtigkeitsaufnahme von diversen, getrockneten Pelletmustern.

³ SMPS = Scanning Mobility Particle Sizer.

4.5 Energie- und Ökobilanz

Als Basis zur Beurteilung des gesamten Lebenszyklus von Pellets im Vergleich zu anderen Brennstoffen dient eine Bilanz der Energie- und Umweltbelastung. Dabei fließen insbesondere folgende Grössen ein:

- Energieverbrauch und Emissionen bei der Trocknung des Ausgangsmaterials
- Energieverbrauch und Emissionen bei der Pelletherstellung
- Wirkungsgrad und Emissionen bei der Pelletverbrennung

Um eine Abschätzung der Ökobilanz mit vertretbarem Aufwand zu ermöglichen, dient die BUWAL-Studie Nr. 315 als Datenbasis. Diese wird mit den Emissionen der Pelletherstellung und -verbrennung ergänzt und ermöglicht so einen Vergleich zwischen Pellets, Heizöl, Erdgas, Holzschnitzeln und Stückholz bei der Anwendung für Heizzwecke.

4.6 Durchführung

Nebst der eigentlichen Pelletherstellung sind eine Reihe von Analysen sowie Emissionsmessungen vorgesehen. Im experimentellen Teil dieses Projektes sind folgende Firmen und Laboratorien beteiligt:

Wer	Was
Verenum, Zürich	Datenerfassung bei der Pelletherstellung Physikalische Analysen (Feuchte, Abrieb, Abmessungen) Versuche zur Pelletlagerung
J. Bürli, Willisau	Durchführung der Pelletierungsversuche Beschaffung von Brennstoff- und Presshilfsmittel
Ch. Völlmin, Sopra, Ormalingen	Fachliche Begleitung Bereitstellung der Pelletfeuerung.
Ökozentrum Langenbruck	Verbrennungsversuche auf Prüfstand
EMPA Dübendorf (Abteilung 131)	Chemische Analysen (Inhaltsstoffe in Pellets und Presshilfsmitteln; Restkohlenstoff; Ascheschmelzverhalten)
Consultest AG, Ohringen	Siebanalysen von Sägemehl

Die Belieferung mit Pelletmustern für die Abrieb- und Verbrennungsversuche (A bzw. V) erfolgte in verdankenswerter Weise von folgenden Firmen (in alphabetischer Reihenfolge):

- Getreide AG, 9400 Rorschach A
- Konrad Keller AG, 8476 Unterstammheim A
- Union-Brikett Verkauf AG, 8606 Nänikon V, A
- WF Engineering und Consulting GmbH, 4460 Gelterkinden V, A

5 Methoden zur Untersuchung der Pelleteigenschaften

5.1 Normative Anforderungen an Holzpellets

Normative Anforderungen dienen der Sicherstellung eines Qualitätsstandards. Die Qualität kann sich sowohl auf chemische Inhaltsstoffe als auch auf physikalischen Eigenschaften beziehen. Für Holzpellets gibt es sowohl in Deutschland als auch in Österreich eine Norm (DIN bzw. ÖNORM). Die Schweiz hat im Januar 2001 die DIN übernommen, da diese mit der schweizerischen Luftreinhalteverordnung (LRV) besser kompatibel ist. Bei der Verwendung von Holzpellets sind die Definitionen für Holzbrennstoffe gemäss LRV (Stand vom 12. Oktober 1999; Anhang 5, Ziffer 3) zu beachten:

- a) naturbelassenes stückiges Holz einschliesslich anhaftender Rinde, z.B. in Form von Scheitholz oder bindemittelfreien Holzbriketts, sowie Reisig und Zapfen.
- b) naturbelassenes nicht stückiges Holz, beispielsweise in Form von Hackschnitzeln, Spänen, Sägemehl, Schleifstaub oder Rinde.

Obwohl Holzpellets in der LRV nicht explizit erwähnt sind, fallen sie (analog den Briketts in der Kategorie a) in die Kategorie b).

Sowohl die DIN 51731 (Ausgabe Oktober 1996) als auch die aktuelle ÖNORM M 7135 (Fassung Juli 2000) enthalten eine Reihe von brennstofftechnischen Anforderungen an Holzpresslinge, die in einen Bereich mit physikalischen und in einen mit chemischen Eigenschaften unterteilt werden können. Beide Normen unterscheiden zwischen Klassen von Holzpresslingen verschiedener Abmessungen, die sowohl Holzpellets als auch Holzbriketts umfassen. Presslinge mit einem Durchmesser <10 mm werden üblicherweise als Holzpellets bezeichnet. Die ÖNORM führt zudem noch Presslingklassen aus Rinde auf. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf die Anforderungen an Holzpellets. Daneben hat der Pelletverband Austria (PVA) Produktionskriterien für Pellets erstellt, die für sämtliche Pellets mit dem PVA-Gütezeichen Gültigkeit haben. Zudem verlangen die meisten österreichischen Pelletheizkesselhersteller die Einhaltung dieser PVA-Kriterien [PVA 2001].

Die beiden Normen unterscheiden sich in den physikalischen Eigenschaften vor allem darin, dass die ÖNORM eine minimale Abriebfestigkeit fordert, dafür jedoch gewisse Presshilfsmittel zulässt (Tabelle 5.1). Als zulässige Hilfsstoffe gelten chemisch nicht veränderte Produkte aus primären land- oder forstwirtschaftlichen Biomassen wie Maisstärke oder Roggenmehl.

Die wesentlichsten Unterschiede zwischen der DIN und der ÖNORM in den chemischen Anforderungen bestehen darin, dass die DIN-Norm für eine Reihe von Spurenstoffen Grenzwerte festsetzt, während die ÖNORM lediglich Werte für Stickstoff, Schwefel und Chlor verlangt, die jedoch etwas tiefer festgelegt wurden (Tabelle 5.1). Im weiteren toleriert die DIN einen rund 3mal höheren Aschegehalt in den Pellets als die ÖNORM. Der Pelletverband Austria hat in den Produktionskriterien für die Pellethersteller mit Ausnahme des EOX-Wertes sowohl die Werte der DIN als auch diejenigen der ÖNORM übernommen.

Die PVA-Kriterien beinhalten nebst den teilweise leicht modifizierten Anforderungen nach der ÖNORM und der DIN noch zusätzlich eine Anforderung bezüglich dem maximal zulässigen Feinanteil bei der Pelletverladung. Dieses Kriterium soll eine minimale Staubemission bei der Befüllung von Silos mittels Pumpwagen bei den Kunden gewährleisten. Die PVA-Kriterien sind stark auf die Kundenbedürfnisse ausgerichtet und stellen ein Maximum an Qualität dar.

5 Methoden zur Untersuchung der Pelleteigenschaften

Parameter	Einheit	DIN	ÖNORM	PVA-Kriterium
Durchmesser D	mm	$4 < D < 10$	$4 < D < 10$ ¹⁾	6 ¹⁾
Länge	mm	< 50	$< 5 D$ ²⁾	$< 5 D$ ²⁾
Rohdichte ρ	kg/m ³	$1.0 < \rho < 1.4$	> 1.12	> 1.15
Abrieb	%			
Bindemittel (DIN) / Presshilfsmittel (ÖNORM)	%	0.0	< 2.0 ³⁾	< 2.0 ³⁾
Feinanteil bei Verladung	%			< 1

Tabelle 5.1: Physikalische Anforderungen an Holzpellets gemäss DIN 51731 und ÖNORM M 7135 sowie Produktionskriterien gemäss PVA

Anmerkungen: Leere Felder = keine Anforderung definiert; ¹⁾ Toleranz +/-10%; ²⁾ max. 20 Massen% der Pellets dürfen Längen von bis zu 7.5 D aufweisen; ³⁾ Chemisch nicht veränderte Produkte aus primären land- und forstwirtschaftlichen Biomassen.

Parameter	Einheit	DIN	ÖNORM	PVA-Kriterium
Heizwert (atro)	MJ/kg	$17.5 < H_u < 19.5$	> 18.0	> 18.0
Wassergehalt w	%	< 12	< 10	< 10
Feuchtegehalt u	%	< 13.6	< 11.1	< 11.1
Aschegehalt	%	< 1.5	< 0.5	< 0.5
Stickstoffgehalt	mg/kg	< 3000	< 3000	< 3000
Schwefelgehalt	mg/kg	< 800	< 400	< 400
Chlorgehalt	mg/kg	< 300	< 200	< 200
Arsen	mg/kg	< 0.8		< 0.8
Cadmium	mg/kg	< 0.5		< 0.5
Chrom	mg/kg	< 8		< 8
Kupfer	mg/kg	< 5		< 5
Quecksilber	mg/kg	< 0.05		< 0.05
Blei	mg/kg	< 10		< 10
Zink	mg/kg	< 100		< 100
EOX	mg/kg	< 3		

Tabelle 5.2: Chemische Anforderungen an Holzpellets gemäss DIN 51731 und ÖNORM M 7135 sowie Produktionskriterien gemäss PVA

Bemerkungen: Sämtliche Grössen (Ausnahme: Wassergehalt w) im wasserfreien Zustand; Feuchtegehalt in Normen nicht aufgeführt; Leere Felder = keine Anforderung definiert; EOX = extrahierbare organische Halogene.

5.2 Pelletprobenahme

Für die Pelletversuche ist eine repräsentative Probenahme von Pelletmustern wichtig, insbesondere wenn die Betriebsparameter verändert oder Presshilfsmittel zugesetzt werden. Ein typischer Pelletierungsversuch dauert rund 50 Minuten, wovon in den ersten 10-15 Minuten nach Änderungen der Produktionsbedingungen keine Pelletbeprobung erfolgt. Anschliessend werden Pelletmuster à ca. 20 kg in gleichmässigen Abständen von jeweils 2 Minuten in Säcke abgefüllt. Bei einer stündlichen Produktionsleistung von 3500 kg/h werden somit knapp 20% der momentan erzeugten Pelletmenge als Muster gezogen. Pro Versuch fallen rund 12 Säcke für die weiteren Untersuchungen an, wovon der Hauptteil der Pellets für die Verbrennungsversuche verwendet wird. Für die Lagerungsversuche und die chemischen Analysen wird aus den 12 einzelnen Produktionsmustern ein repräsentatives Mischmuster von ca. 15 kg erzeugt. Für die weitergehenden Untersuchungen steht aus jedem Pelletversuch ein derartiges Mischmuster zur Verfügung. Die Untersuchung der physikalischen und chemischen Messgrössen erfolgt gemäss nachfolgendem Schema:

Messgrösse	Messzeitpunkt	Probemusterart
Abrieb	nach Produktion	12 einzelne Produktionsmuster
Pelletfeuchte	nach Produktion	4 ausgewählte Produktionseinzelmuster
Abmessungen, Dichte	nach Produktion	Mischmuster
Chemische Analyse	nach Produktion	Mischmuster
Abrieb	nach Lagerung	Mischmuster
Pelletfeuchte	nach Lagerung	Mischmuster
Feuchtigkeitsaufnahme	während Lagerung	Mischmuster

5.3 Physikalische Messgrössen

5.3.1 Sägemehl- und Pelletfeuchte

Die Sägemehl-Feuchten werden durch Trocknung bei 105°C während mindestens 4 Stunden ermittelt. Die Feuchten des Rohsägemehls wurde 3-fach bestimmt, diejenige des getrockneten Sägemehls als Einzelwert. Die eingewogenen feuchten Sägemehlmassen liegen jeweils im Bereich von rund 50-80 Gramm.

Von sämtlichen Pellets werden mehrmals nebst dem Abriebverhalten auch die Feuchtegehalte ermittelt. Die Feuchtebestimmung aus den Pelletierungsversuchen auf der untersuchten Anlage sowie die Originalfeuchten der Pellets von Konkurrenzbetrieben erfolgt als 4-fach Bestimmung. Die übrigen Feuchtwerte aus den Pellet-Lagerungsversuchen werden aus Doppelbestimmungen ermittelt. Die Bestimmung der Pelletfeuchten erfolgt mit Pelletmassen von jeweils rund 120 Gramm in einem Trocknungsofen bei 105°C während einer Zeit von mindestens 4 Stunden. Vorversuche haben gezeigt, dass eine Trocknungsdauer von 4 Stunden ausreicht, um sämtliche Restfeuchtigkeit aus den Pellets auszutreiben.

5.3.2 Korngrößenverteilung des Sägemehls

Von einzelnen Sägemehlmustern wird die Korngrößenverteilung mittels Siebung auf einer Vibrationsmaschine nach VSS SN-670 808A ermittelt.

Die Sägemehlmuster stammen entweder direkt aus dem Produktionsprozess oder werden durch Auflösen von Pellets in Wasser mit anschließender Trocknung hergestellt. Die Sägemehlmuster aus dem Produktionsprozess werden unmittelbar am Eingang der Pelletpresse entnommen (s.a. Abbildung 6.1).

5.3.3 Abrieb

Die wichtigste physikalische Eigenschaft von Pellets die mechanische Festigkeit bzw. die hier verwendete Abriebfestigkeit (s.a. Ausführungen in Kapitel 4.1). Holzpellets mit geringem Abrieb produzieren beim Transport und während der Befüllung geringere Staubemissionen, neigen weniger zu Brückenbildung in Silos und erlauben einen störungsfreien Anlagenbetrieb. Für den Pelletverbraucher sind die Staubemissionen während der Befüllung des Silos und der störungsfreie Feuerungsbetrieb entscheidend.

Im praktischen Alltag sind die Staubemissionen beziehungsweise der effektive Pelletabrieb beim Handling von vielen Faktoren abhängig. Zur Ermittlung von reproduzier- und vergleichbaren Abriebswerten ist daher ein standardisiertes Verfahren einzusetzen, wie es die ÖNORM M 7135 vorsieht. Im Rahmen dieses Projektes wurde dazu ein Messgerät vom Typ Lignotester II der Firma Booregaard Lignotech eingesetzt. Das Messprinzip beruht darauf, dass eine vorgängig eingewogene Pelletmenge (100 g) in einem Luftstrom bei gleichen und konstanten Bedingungen in einem Behältnis aufgewirbelt wird und dabei einer mechanischen Belastung ausgesetzt wird, die sich als Abrieb äussert. Der Pelletabrieb AR ist definiert als

$$AR = \frac{m_E - m_A}{m_E} \cdot 100$$

wobei AR = Abrieb in %

m_E = eingewogene Pelletmasse in [g]

m_A = ausgewogene Pelletmasse in [g]

Sämtliche Abriebsversuche mit Pellets werden mit diesem Verfahren durchgeführt. Die Ermittlung der Abriebfestigkeit erfolgt immer als Mehrfachbestimmung.

5.3.4 Dichte und Abmessungen

Als weitere physikalische Grössen werden die Pelletdichte sowie deren Abmessungen erhoben. Die Dichtebestimmung erfolgt entsprechend den Vorgaben der ÖNORM M7135 durch Ermittlung der geometrischen Abmessungen (mittlerer Durchmesser und Länge) und der Masse von je 10 einzelnen Pellets mittels Digital-Schieblehre (Auflösung 0.01 mm) und Analysenwaage (0.1 mg Präzision).

Daneben werden die Verteilungen der Pelletlängen und der Pelletdurchmesser durch manuelles Ausmessen von repräsentativen Mustern ermittelt. Für die Verteilung der Pelletlängen werden insgesamt jeweils 140 einzelne Pellets aus den jeweiligen Mischmustern vermessen, für die Verteilung der Pelletdurchmesser werden 35 Einzelpellets aus den Mischmustern gezogen.

5.4 Chemische Zusammensetzung

5.4.1 Pellet und Presshilfsmittel

Von einigen ausgesuchten Holzpellets und Presshilfsmitteln werden die gemäss DIN 51731 (siehe Tabelle 5.2) geforderten Inhaltsstoffe analysiert:

- Brenn-/Heizwert
- Aschegehalt
- Gesamt-Stickstoff
- Gesamt-Schwefel
- Gesamt-Chlor
- EOX
- Schwermetalle (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn)

Die Resultate sind in Tabelle 7.3 aufgeführt.

5.4.2 Asche

Bei den Aschen aus den Verbrennungsversuchen interessieren das Ascheschmelzverhalten nach DIN 53170 sowie die Restgehalte an organischem Kohlenstoff. Die Bestimmung des Ascheschmelzverhalten dient der Beurteilung der Pellets bzw. der zugesetzten Hilfsstoffe, während der Restkohlenstoffgehalt ein Mass zur Charakterisierung der Ausbrandqualität darstellt. Der Ascheausbrand ist nebst der eingesetzten Feuerungstechnik auch durch den Anlagenbetrieb beeinflusst.

6 Versuchsanlagen

6.1 Pelletieranlage

Die im Rahmen dieses Projektes untersuchte Pelletieranlage ist in Abbildung 6.1 schematisch dargestellt. Die Jahresproduktion der Anlage beträgt derzeit rund 3000 Tonnen und könnte bei Bedarf auf rund 15'000 Jahrestonnen gesteigert werden.

Die Herstellung von Holzpellets erfordert getrocknetes und zerkleinertes Sägemehl. Das Rohsägemehl wird hierzu in einem direktbefeuerten Trommelrockner auf die erforderliche Restfeuchte getrocknet. Die Trocknerabgase weisen eine Austrittstemperatur von rund 70°C auf und sind annähernd mit Wasserdampf gesättigt.

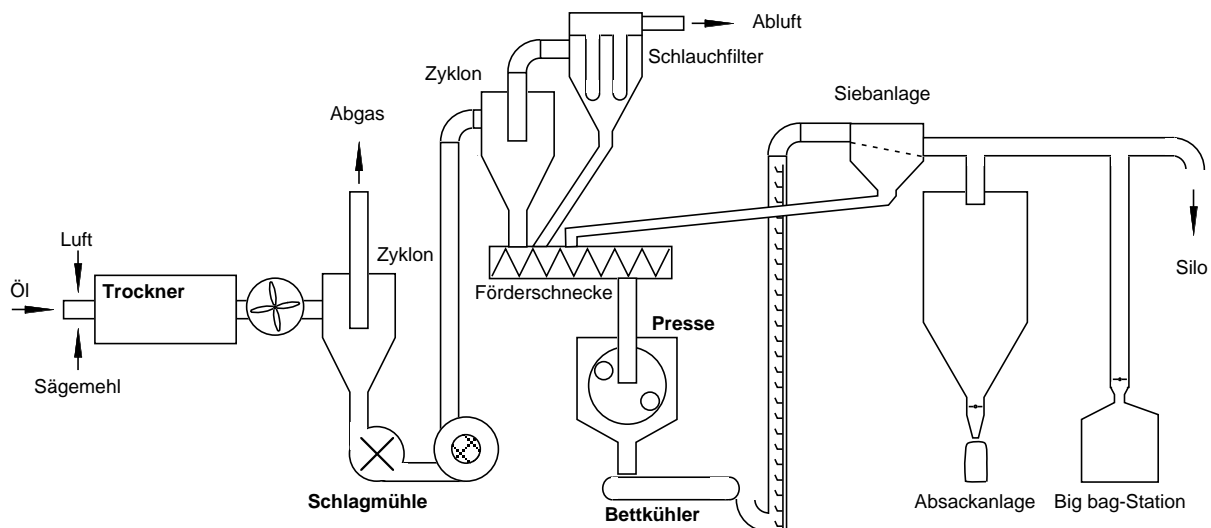


Abbildung 6.1: Verfahrensfliessbild der untersuchten Holzpelletieranlage

Nach der Abscheidung in einem Zyklon gelangt das getrocknete Sägemehl in eine Schlammühle, in welcher das Sägemehl auf eine einheitliche Körnung gemahlen wird. Ein Saugzuggebläse fördert das zerkleinerte Sägemehl zur Abscheidung und Zwischenspeicherung in einen Zyklon. Die Förderluft wird in einem Schlauchfilter entstaubt und über Dach nach aussen geführt. Der Filterstaub gelangt in die Förderschnecke der Pelletpresse.

Die Verpressung des Sägemehls kann entweder in Ring- oder Flachmatrizenpressen erfolgen. Im vorliegenden Fall kommt eine Ringmatrizenpresse zum Einsatz (Abbildung 6.2). Das Sägemehl wird im Zentrum der Ringmatrize eingebracht und zwei innenliegende Lager (Abbildung 6.3) verpressen das Sägemehl zu Pellets.

Bei der Verpressung des getrockneten Holzsägemehls in der Presse wird durch Reibung Wärme freigesetzt, so dass die Pellets die Presse bei einer Temperatur von rund 70°C verlassen. Die erhöhte Temperatur und die Gegenwart von Wasserdampf setzen einen Teil des im Sägemehl vorhandenen Lignins frei, so dass dieses als natürliches Bindemittel wirkt und den Pellets mechanische Festigkeit verleiht.

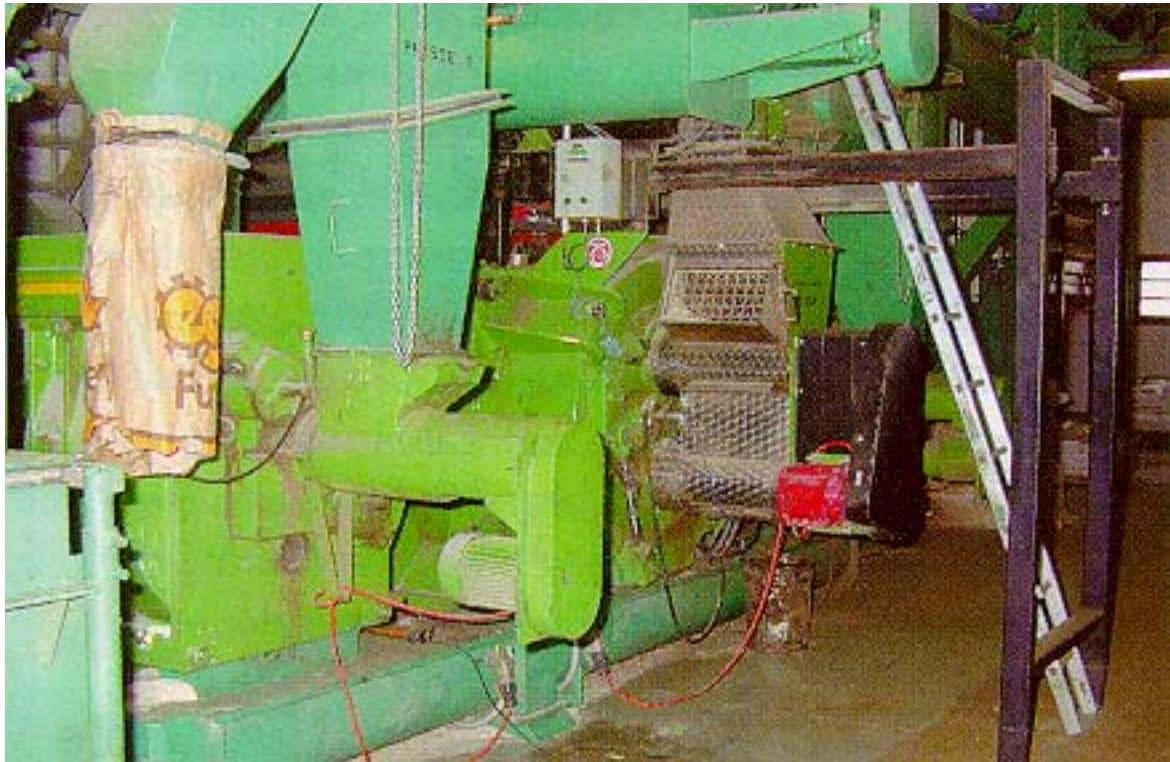


Abbildung 6.2: Ringmatrizenpresse mit einer Leistung von rund 3500 kg/h zur Herstellung von Holzpellets.
Bild: [Läng 2001]

Nach dem Pressvorgang gelangen die Pellets in einen Fließbettkühler, danach über eine Fördereinrichtung zu einer Prozesswaage und anschliessend zur Siebanlage. In der Siebanlage wird das während der Förderung durch Abrieb entstandene Sägemehl zurück in die Pelletierpresse geführt. Nach der Siebung gelangen die Pellets in die Abfüllstation, in welcher die Pellets entweder in 20 kg Säcke, in Big Bags oder in ein offenes Silo abgefüllt werden.



Abbildung 6.3: Ausgebaute Lager aus der Matrizenpresse. Bild: [Läng 2001]

6.2 Feuerungsanlage

Zur Verbrennung von Holzpellets ist eine grosse Anzahl von Feuerungstypen und -modellen erhältlich [Völlmin 2000]. Nebst einfachen Anlagen existiert auch eine Grosszahl von qualitativ hochwertigen Feuerungen, die zum Teil mit moderner Regelungs- und Steuerungstechnik ausgerüstet sind. Solche Pelletfeuerungen können sehr gute Verbrennungswerte erzielen. Bei Kesselwirkungsgraden im Bereich von 90% werden gleichzeitig sehr tiefe CO-Werte und Staubemissionen erreicht. Berichte von Prüfstandsmessungen sind zum Beispiel abrufbar unter http://www.bit.bmlf.gv.at/deutsch/bio_nawa/pruef/pruefl.htm.

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein Feuerungssystem ausgewählt, welches über eine verhältnismässig einfache Technik verfügt. Bei derartigen Systemen sind eher Betriebsprobleme wie Beschickungsstörungen, erhöhte Emissionen oder schlechter Ascheausbrand zu erwarten, wenn der Pelletbrennstoff keine optimalen Eigenschaften aufweist.

Die Abbildung 6.4 zeigt die verwendete Pelletfeuerung vom Typ Pelletino mit einer Nennwärmeleistung von rund 15 kW. Die Feuerung ist eine Kombination von Heizkessel und Ofen. Die Leistungsabgabe erfolgt mit rund 9 kW über den Wärmeübertrager an das Wasser, während die restlichen 6 kW durch Strahlung und Konvektion an die umgebende Raumluft abgegeben werden.

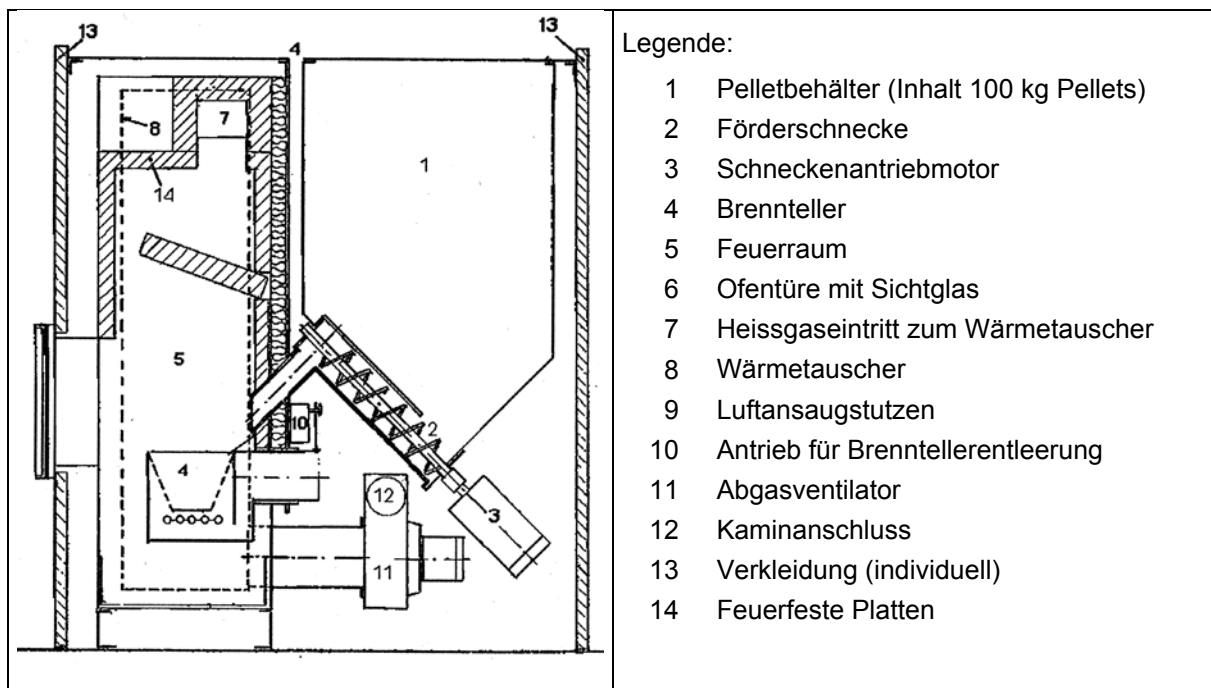


Abbildung 6.4: Pelletfeuerung Typ Pelletino mit 15 kW Wärmeleistung.
Bildquelle: Chiquet Energietechnik AG, Ormalingen.

Die Pellets werden je nach Leistungsbedarf aus dem Vorratsbehälter über eine aufsteigende Schnecke in den Fallschacht gefördert. Von hier rutschen die Pellets in den Brennteller und verbrennen unter Luftzufuhr und Wärmeabgabe. Die gesamte Verbrennungsluft strömt von unten in den Brennteller, d.h. die Feuerung verfügt nicht über eine gestufte Verbrennung mit Primär- und Sekundärluft. Sie ist hingegen mit einer automatischen Zündvorrichtung sowie mit einer automatischen Brenntellerentlastung ausgestattet. Die heissen Verbrennungsabgase gelangen nach dem Feuerraum in einen Wärmetauscher und anschliessend in den Kamin.

7 Ergebnisse der Pelletherstellung

7.1 Feuchtegehalt des Rohmaterials

Das angelieferte Sägemehl weist saisonal und witterungsbedingt Schwankungen im Feuchtegehalt auf. Zudem kann es durch unterschiedliche Produktivitätsauslastung der Lieferanten oder des Pelletwerkes über längere Zeit im Freien zwischengelagert werden. Das Pelletierwerk selbst hat nur ein geringes Lagervolumen, weshalb das Sägemehl just-in-time angeliefert wird.

Das in der Versuchsperiode (April 2001) angelieferte Rohsägemehl weist eine Feuchtigkeit zwischen 67 und 104 % atro mit einem mittleren Gehalt von 84% atro auf (Abbildung 7.1; Tabelle 7.2).

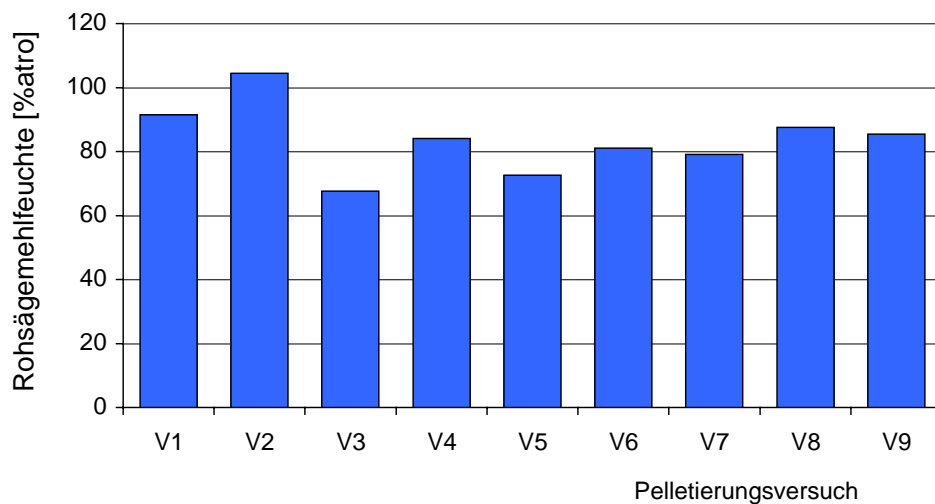


Abbildung 7.1: Feuchtegehalte des Rohsägemehls nach Anlieferung

7.2 Korngrößenverteilung des Rohmaterials

Das getrocknete Sägemehl gelangt in eine Schlagmühle, in welcher das Sägemehl vor der Pelletierung auf eine einheitliche Körnigkeit gemahlen wird. Von insgesamt sechs Sägemehlmustern wurde die Korngrößenverteilung mittels Siebanalyse ermittelt.

Während der Versuchsperiode zur Pelletherstellung kamen in der Schlagmühle zwei verschiedene Siebe mit einem Lochdurchmesser von 4 mm bzw. 5 mm zum Einsatz. Die Korngrößenverteilungen von zwei Sägemehlmustern beim 4 mm Sieb sind praktisch deckungsgleich (Abbildung 7.2, oberes Bild). Beim 5 mm Sieb sind geringfügige Unterschiede zwischen den zwei Sägemehlmustern erkennbar, die sich möglicherweise auch auf die Messungengenauigkeit zurückführen lassen.

Beim Vergleich der vier Sägemehlmuster mit dem 4 mm und dem 5 mm Siebeinsatz fällt auf, dass die Korngrößenverteilungen beim Einsatz des grösseren Sieb nicht wesentlich von derjenigen vom kleineren Sieb abweichen. Bei beiden Sieben ergeben sich Kornklassenmaxima im Bereich zwischen 1 mm und 2 mm, die im übrigen deutlich unterhalb der eingesetzten Siebdurchmesser liegen.

Korngrößenverteilungen sind jedoch vor allem zum Vergleich von Sägemehlmustern von anderen Unternehmen interessant. Dabei ergibt sich die Schwierigkeit, dass von anderen Unternehmen kaum Sägemehlmuster erhältlich sind. Dieses Problem lässt sich dadurch lösen, indem Pellets in Wasser aufgelöst und das dabei entstehende Sägemehl getrocknet und anschliessend im Hinblick auf die Korngrößenverteilung analysiert wird. Wie die Abbildung 7.3 zeigt, ergibt dies zwar keine absolut deckungsgleiche Verteilung mit derjenigen des originalen Sägemehls vor der Verpressung. Im untersuchten Fall weist das durch Auflösen von Pellets erzeugte Sägemehl einen rund 7% höheren Anteil an Sägemehlkörnern im Bereich zwischen 2 mm und 3 mm auf, während die Klassen zwischen 0.5–1 mm und 1–2 mm etwas geringere Anteile ergeben. Dennoch kann aus dem Vergleich gefolgert werden, dass das Auflösen von Pellets in Wasser zu einem Sägemehl mit einer Korngrößenverteilung führt, die mit derjenigen des originalen Sägemehls einigermaßen vergleichbar ist.

Die Korngrößenverteilungen von zwei durch Auflösen von Pellets hergestellten Sägemehlmustern zeigt, dass die beiden Pellethersteller ein Sägemehl mit annähernd demselben Korngrössenspektrum einsetzen (Abbildung 7.4). Demzufolge lassen sich allfällige Unterschiede in den Pelleteigenschaften dieser beiden Unternehmen (siehe Kapitel 7.4) nicht auf unterschiedliche Korngrößenverteilungen des Sägemehl zurückführen.

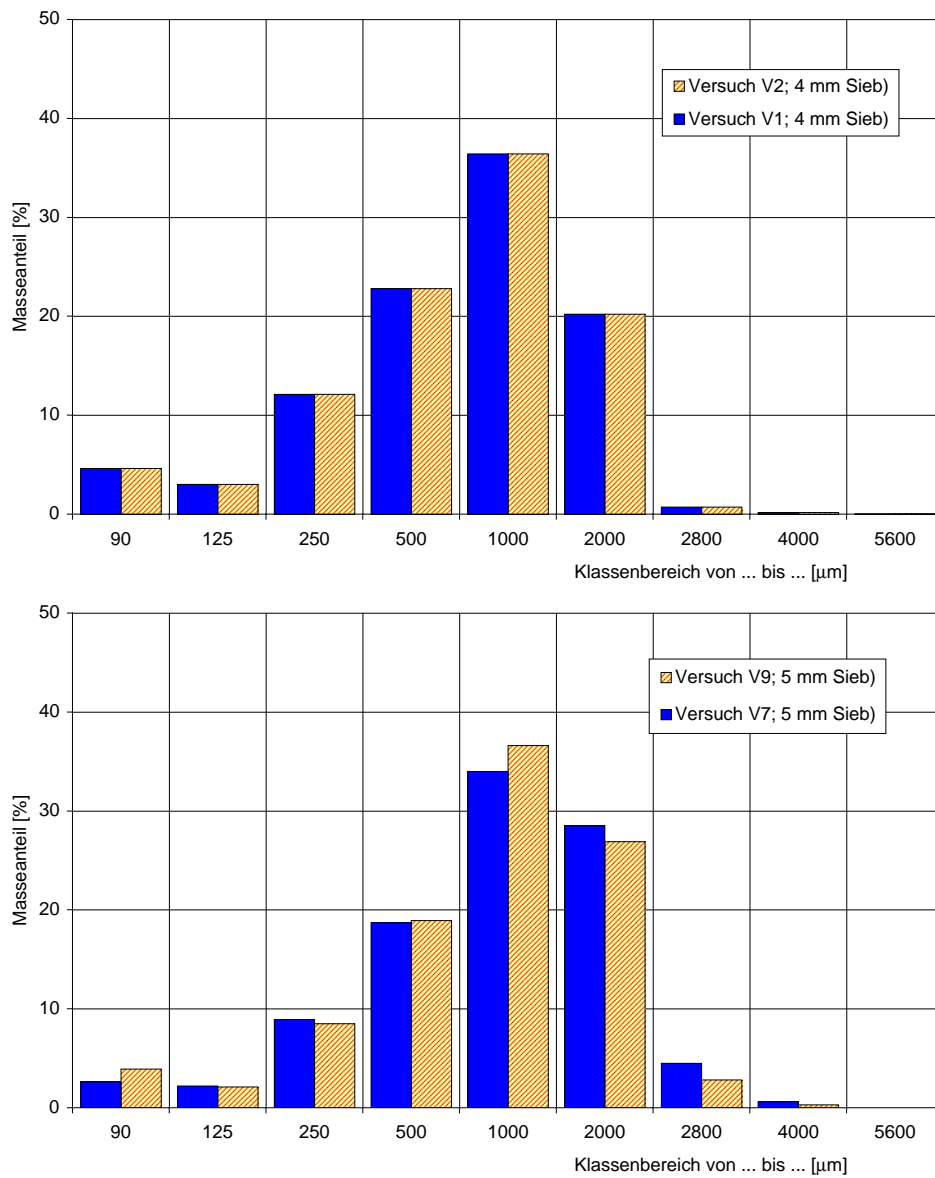


Abbildung 7.2: Korngrößenverteilung des getrockneten und gemahlene Sägemehls in einer Schlagmühle mit einem 4 mm Siebeinsatz (Bild oben) und mit einem 5 mm Siebeinsatz (Bild unten)

7 Ergebnisse der Pelletherstellung

Korngrößenverteilung des Sägemehls (Versuch 9; Schlagmühle mit 5 mm Sieb)

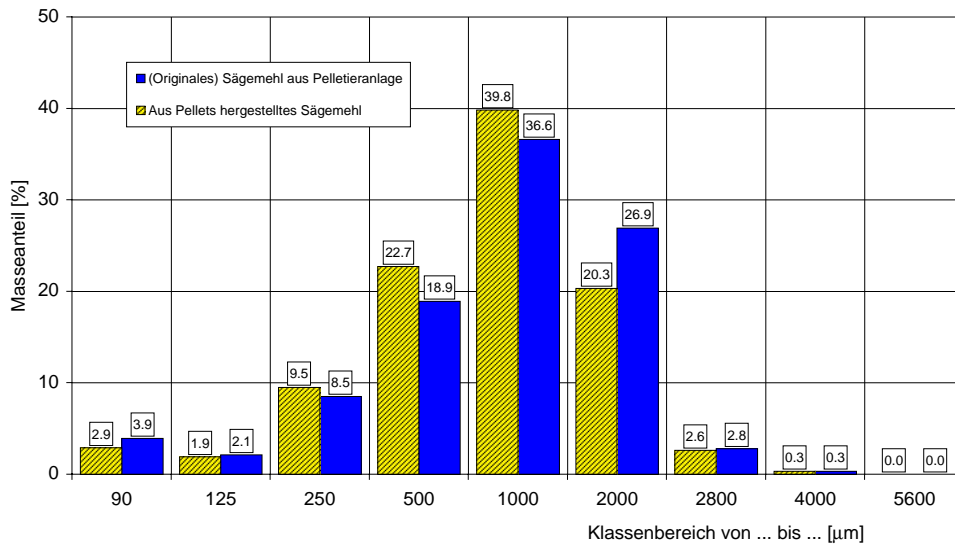


Abbildung 7.3: Vergleich der Korngrößenverteilungen von getrocknetem und gemahlenem Sägemehl und von getrocknetem Sägemehl, welches durch Auflösen von Pellets erzeugt wurde

Bemerkungen: Das Sägemehl und die Pellets wurden während des Versuches 9 beprobt; Das Auflösen der Pellets erfolgt in Wasser während einigen Stunden und anschliessendem, mehrmaligen Trocknen des Sägemehlbreis im Ofen bei 105 °C während insgesamt rund 15 Stunden.

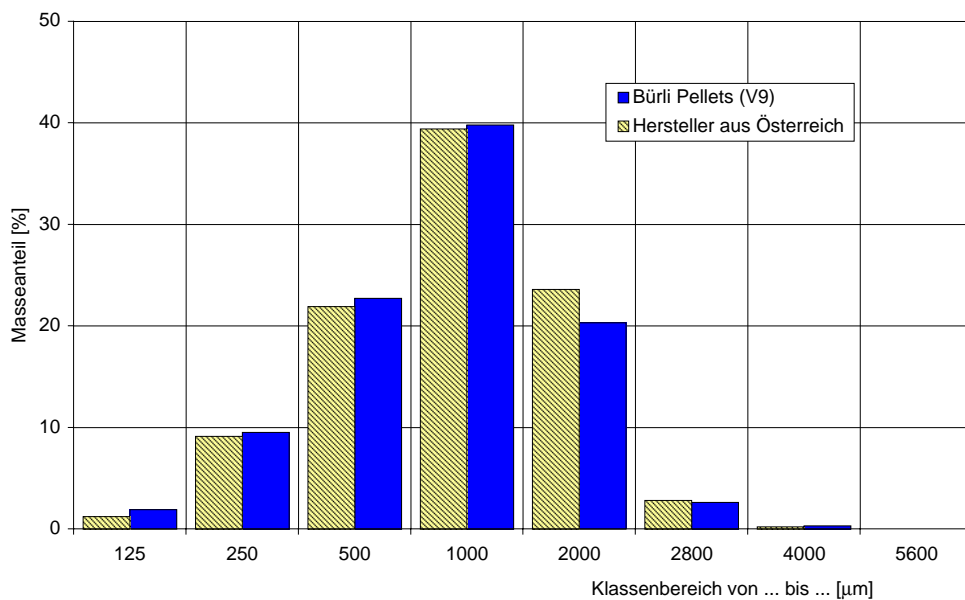


Abbildung 7.4: Konkurrenzvergleich von aus Pellets hergestellten Sägemehl-Korngrößenverteilungen

7.3 Produktionsdaten

Während der Pelletierungsversuche wurden die wichtigsten Produktionsdaten mit Hilfe einer computergesteuerten Datenerfassung aufgezeichnet. Aus den Daten werden anschliessend prozessspezifische Kennzahlen ermittelt. Die Abbildung 7.5 zeigt einige während eines Pelletierungsversuches aufgezeichneten Daten.

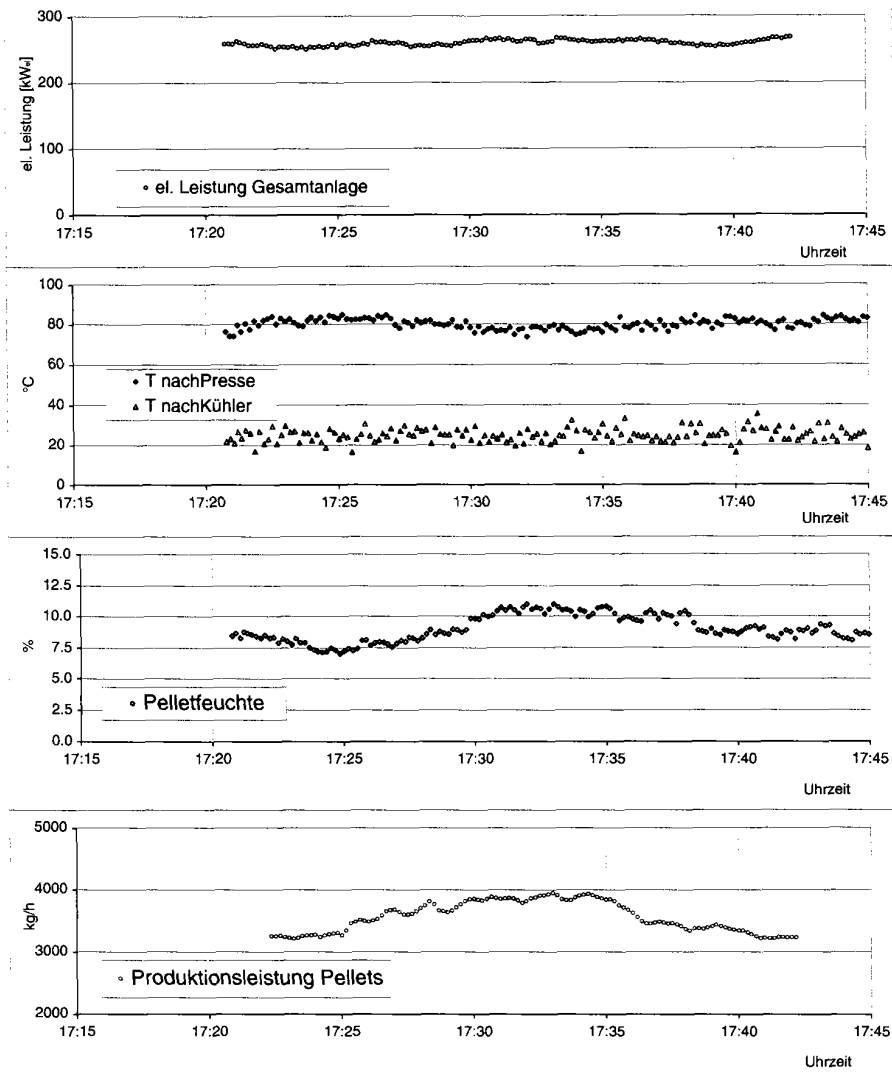


Abbildung 7.5: Zeitlicher Verlauf von Produktionsparametern während dem Pelletierungsversuch 1 (Standardproduktion)

Während der Gesamtstromverbrauch und die Pellettemperaturen nach der Presse und nach dem Fließbettkühler über die Versuchsdauer nur geringfügig variieren, weisen die Pelletfeuchte nach der Presse sowie die Pelletproduktionsleistung Schwankungen von 12% bzw. 17% in Bezug auf die Mittelwerte auf. Die Pelletproduktionsleistung verläuft parallel zur Pelletfeuchte, so dass höhere Pelletfeuchten bei konstantem Gesamtstromverbrauch eine höhere Produktionsleistung ermöglichen.

Zwischen den physikalischen Pelleteigenschaften (insbesondere dem Abrieb) und den Schwankungen im Feuchtegehalt und der Pelletproduktionsleistung lässt sich hingegen kein eindeutiger Zusammenhang ermitteln. Die über die gesamte jeweilige Versuchsdauer gemittelten Produktionsdaten sind in der Tabelle 7.1 zusammengestellt. Die einzelnen Messgrößen unterliegen prozessbedingten Schwankungen. So ist z.B. die Trocknerleistung vom Feuchtegehalt des Rohsägemehls, der Austrittsfeuchte und vom Durchsatz der Pelletierpresse bestimmt. Werden die Produktionsdaten auf die produzierte Pelletmenge (bzw. den Heizwert in den Pellets) bezogen, ergeben sich für sämtliche Versuche mehrheitlich vergleichbare Kenngrößen. Diese Kenngrößen sind mit einigen energetischen und kostenbezogenen Werten in der Tabelle 7.2 aufgeführt.

	Versuch	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
Versuchsbeginn	hh:mm	17:21	10:46	14:20	14:43	9:54	14:31	10:06	14:30	9:56
Versuchsende	hh:mm	17:42	11:10	14:42	15:08	10:15	14:53	10:29	14:52	10:21
Mittlere Pelletproduktionsrate (aus DAQ)	kg/h	3530	3260	3200	3640	3950	3420	3370	3560	3590
Mittlere Pelletproduktionsrate (Handablesung)	kg/h	3430	3270	3270	3750	3820	3450	3540	3540	3410
Presshilfsmittelverbrauch	kg /h	0.0	37.0	36.1	36.6	50.2	20.5	36.2	0.0	68.5
Mittlere Trocknerleistung	MW	1.85	1.97	1.96	2.13	2.35	2.25	2.15	2.16	2.25
Mittlerer Ölverbrauch für Trockner	l/h	186	198	196	213	236	225	216	217	225
Mittlere Trockneraustrittstemperatur	°C	66	71	70	72	80	72	85	82	82
Mittlerer Gesamtstromverbrauch	kW	260	257	241	255	262	244	252	255	250
Mittlerer Stromverbrauch in Schlagmühle	kW	30	35	28	23	21	20	23	19	19
Mittlerer Stromverbrauch in Presse	kW	156	147	137	157	164	148	153	160	156
Mittlere Pellettemperatur nach Presse	°C	79.9	77.7	78.3	79.4	81.2	81.9	82.4	84.6	83.6
Mittlere Pellettemperatur nach Kühlbett	°C	24.8	22.8	23.5	25.8	23.5	21.5	22.0	21.3	23.9
Mittlere Pelletfeuchte (MESA online Gerät)	%	9.0	9.5	9.3	9.4	9.3	8.8	8.3	7.7	7.8

Tabelle 7.1: Produktionsdaten aus den Pelletierungsversuchen no. 1 bis 9

Der Fremdenergieaufwand in Form von elektrischer Hilfsenergie zur Herstellung von Pellets mit einem mittleren Durchmesser von 7 mm beträgt rund 1.5% (ohne Gewichtung) des produzierten Heizwertes in den Pellets. Bei einer Gewichtung der elektrischen Energie mit einem Faktor 2.5 sind rund 3.8% elektrische Energieäquivalente zur Pelletherstellung erforderlich. Der elektrische Fremdenergieanteil ist im Vergleich zu anderen Holzpelletierwerken vermutlich gering. Von einem Werk in Schweden ist bekannt, dass der Anteil an elektrischer Energie zur Herstellung von Pellets mit 8 mm Durchmesser rund 3.8% des Energieinhaltes in den Pellets entspricht (ohne Gewichtung; [sabi 2001]). Hierbei gilt zusätzlich zu berücksichtigen, dass der elektrische Energieverbrauch mit zunehmendem Pelletdurchmesser abnimmt. Das untersuchte Pelletwerk schneidet daher deutlich besser ab als das schwedische, weil der mittlere Pelletdurchmesser hier rund 7 mm beträgt, während im schwedischen Werk Pellets mit einem Durchmesser von 8 mm produziert werden.

Für eine Pelletierpresse mit einer Durchsatzleistung von 6 bis 7.5 t/h (keine Angabe zu Pelletdurchmesser) wird ein Motorleistungsbedarf von 250 kW_{el} angegeben [Niemann 2001], was als Benchmark-Wert bezeichnet wird.

Obwohl durch Zugabe der verschiedenen Presshilfsmittel die Pelleteigenschaften zum Teil verändert werden konnten, konnte der Stromverbrauch für die Pelletierung nicht massgeblich beeinflusst werden. Der Stromverbrauch ist im untersuchten Bereich zudem praktisch unabhängig vom Feuchtegehalt des Ausgangsmaterials.

Der Fremdenergieaufwand in Form von Öl zur Trocknung des Rohmaterials beträgt im Mittel 12,8% des produzierten Heizwertes in den Pellets für einen Feuchtegehalt des Ausgangsmaterials von durchschnittlich 75%. Der Energieaufwand für die Trocknung ist direkt vom Wassergehalt des Rohmaterials abhängig und er kann somit durch Verwendung von trockenerem Ausgangsmaterial verringert werden. Der gesamte Fremdenergieanteil beträgt im Mittel für alle Versuche 14,4%.

	Mittlere Trockneraustrittstemperatur	Feuchtegehalt u des Rohsägeurns vor Trockner	Feuchtegehalt u des Rohsägeurns nach Trockner	(originale) Pelletfeuchte u [% atro]	Mittlere Pelletproduktionsrate (aus DAQ)	Dosierte Presshilfsmittelmenge	Heizwert-Produktion in Pellets	Mittlere Trocknerleistung	Mittlerer Gesamtstromverbrauch	Energieanteil Strom in Pellets (ohne Gewichtung)	Anteil Energieäquivalente Strom in Pellets (mit Gewichtung)	Energieanteil Öl in Pellets	Fremdenergieanteil (total) in Pellets (ohne Gewichtung)	Gesamtanteil von Fremdenergieäquivalenten in Pellets (mit Gewichtung)
Versuchsbezeichnung	°C	%atro	%atro	% atro	kg/h	kg/h	MW	MW	kW	%	%	%	%	%
Bürli Pellets ohne Presshilfsmittel (V1; Standard)	66.1	91.5	13.2	6.9	3530	0.0	16.6	1.85	260	1.6	3.9	11.1	12.7	15.0
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 1 (V2)	71.4	104.4	13.0	7.5	3260	37.0	15.3	1.97	257	1.7	4.2	12.9	14.6	17.1
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 2 (V3)	69.7	67.6	13.7	7.2	3200	36.1	15.0	1.96	241	1.6	4.0	13.0	14.6	17.0
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 3 (V4)	72.2	84.0	13.6	7.0	3640	36.6	17.1	2.13	255	1.5	3.7	12.4	13.9	16.1
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 4 (V5)	79.9	72.6	11.2	6.6	3950	50.2	18.7	2.35	262	1.4	3.5	12.6	14.0	16.1
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 5 (V6)	72.4	81.0	11.9	6.8	3420	20.5	16.1	2.25	244	1.5	3.8	13.9	15.4	17.7
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 1 (V7)	85.1	79.1	13.2	6.7	3370	36.2	15.9	2.15	252	1.6	4.0	13.5	15.1	17.5
Bürli Pellets ohne Presshilfsmittel (mehr Rinde; V8)	82.1	87.5	13.3	6.0	3560	0.0	16.9	2.16	255	1.5	3.8	12.8	14.3	16.5
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 4 (V9)	82.5	85.4	11.5	6.1	3590	68.5	17.1	2.25	250	1.5	3.7	13.2	14.6	16.8
Mittelwerte	75.7	83.7	12.7	6.8	3502	31.7	16.5	2.1	253	1.5	3.8	12.8	14.4	16.7

Tabelle 7.2: Produktionsdaten aus den Pelletierungsversuchen 1 bis 9 und Mittelwerte.

Bemerkungen: Die Bestimmung der produzierten Heizwertmenge in den Pellets basiert auf der Annahme, dass der Heizwert der Pellets 18.3 MJ/kg atro beträgt. In einigen Kenndaten wird eine Gewichtung des elektrischen Stromes mit einem Faktor 2.5 vorgenommen (d.h. 1 kWh_{el} entsprechen 2.5 kWh thermischer Energie; Bsp. V1: 1.6% Stromanteil entspricht einem Anteil von 3.9% Stromenergieäquivalenten). Der Mittelwert für den gesamten Fremdenergieanteil wurde aus den Einzelwerten der Totalwerte bestimmt. In der Tabelle führt dies zu einer Rundungsdifferenz von 0,1% (1,5% für Strom + 12,8% für Öl entsprechen einem Mittel von total 14,4%)

7.4 Pelleteigenschaften

7.4.1 Chemische Zusammensetzung

Von vier verschiedenen Holzpellets und den Pellets aus Kaffeehaurückständen wurden die chemischen Inhaltsstoffe nach DIN 51731 bestimmt (Tabelle 7.3).

	Grenzwert nach DIN 51731	Büri Pellets ohne Hilfsmittel (Standard)	Büri Pellets mit Presshilfsmittel 1 und mehr Rinde	Pellets aus Österreich	Pellets aus der Schweiz	Pellets aus Kaffeehaurückständen
Versuchsdatum		02.04.01	09.04.01	08.05.01	09.05.01	28.05.01
Pelletbezeichnung		P1	P8	R1	R10	S1
Feuchtegehalt u %	13.6	9.5	8.4	7.3	5.7	9.4
Asche %	1.5	0.4	0.6	0.3	0.5	6.9
Heizwert (waf) MJ/kg	17.5-19.5	19.3	19.3	19.0	18.8	19.7
Brennwert (waf) MJ/kg		20.6	20.6	20.3	20.1	21.1
Schwefel %	0.08	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005
Chlor %	0.03	0.0024	< 0.0023	< 0.0023	0.0064	0.044
Stickstoff %	0.3	0.21	0.14	0.08	0.1	2.5
Arsen mg/kg	0.8	< 0.2	< 0.2		< 0.2	< 0.2
Cadmium mg/kg	0.5	0.07	0.15		0.15	0.09
Chrom mg/kg	8	0.3	0.5		0.9	0.8
Kupfer mg/kg	5	0.9	2		0.8	100
Quecksilber mg/kg	0.05	< 0.05	< 0.05		< 0.05	< 0.05
Blei mg/kg	10	0.5	1.1		0.5	0.7
Zink mg/kg	100	< 20	< 20		< 20	38
EOX mg/kg	3	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1

Tabelle 7.3: Chemische Inhaltsstoffe und Zusammensetzung nach DIN 51731 von verschiedenen Pellets

Bemerkungen: waf = wasser- und aschefrei

Die vier Holzpellet-Sortimente unterschreiten sämtliche Grenzwerte und erfüllen die Anforderungen nach DIN 51731. Die Holzpellets untereinander zeigen keine signifikanten Unterschiede und sind aufgrund der chemischen Zusammensetzung nicht unterscheidbar. Dies trifft insbesondere auch für die Holzpellets mit dem erhöhten Rindenanteil (Pellets P8) zu.

Die aus Kaffeehaurückständen hergestellten Pellets überschreiten einige der Holzpellet-Grenzwerte, und zwar den Aschegehalt und die Gehalte an Stickstoff und Kupfer. Die erhöhten Kupfergehalte sind möglicherweise auf den Einsatz von Spritzmitteln beim Kaffeeanbau zurückzuführen.

Die eingesetzten Presshilfsmittel weisen zum Teil deutlich höhere Stickstoff- oder Schwefelgehalte auf als naturbelassenes Holz oder Holzpellets ohne Presshilfsmittel, die Schwermetallgehalte⁴ liegen hingegen unter den Grenzwerten. Zur Einhaltung der Grenzwerte nach DIN 51731 darf der Presshilfsmittelanteil in den Pellets in diesen Fällen 1 Gew.-% nicht überschreiten.

7.4.2 Abmessungen

Die Pelletabmessungen sind wichtig, da zum Beispiel bei der Förderung und Beschickung Störungen auftreten können, wenn die Pellets zu lang sind. Der Pelletdurchmesser ist hingegen aus fördertechnischen Gründen weniger kritisch.

Während bei Stokerschnecken kaum Förderprobleme zu erwarten sind, können überlange Pellets in pneumatischen Fördereinrichtungen oder in Rieseln zu Verstopfungen führen. Anzustreben sind daher kurze Pellets. Sowohl die DIN 51731 als auch die ÖNORM M 7135 und die PVA-Richtlinien enthalten Angaben zur maximalen Länge von Holzpellets, wobei die österreichischen Anforderungen deutlich weitergehen und höhere Ansprüche an die Pelletherstellung stellen.

Die Abbildung 7.6 zeigt die Verteilung der Pelletlängen während eines Versuches auf der untersuchten Pelletierungsanlage. Die mittleren Pelletabmessungen von sämtlichen Versuchen sind in der Tabelle 7.4 und Tabelle 7.5 aufgeführt.

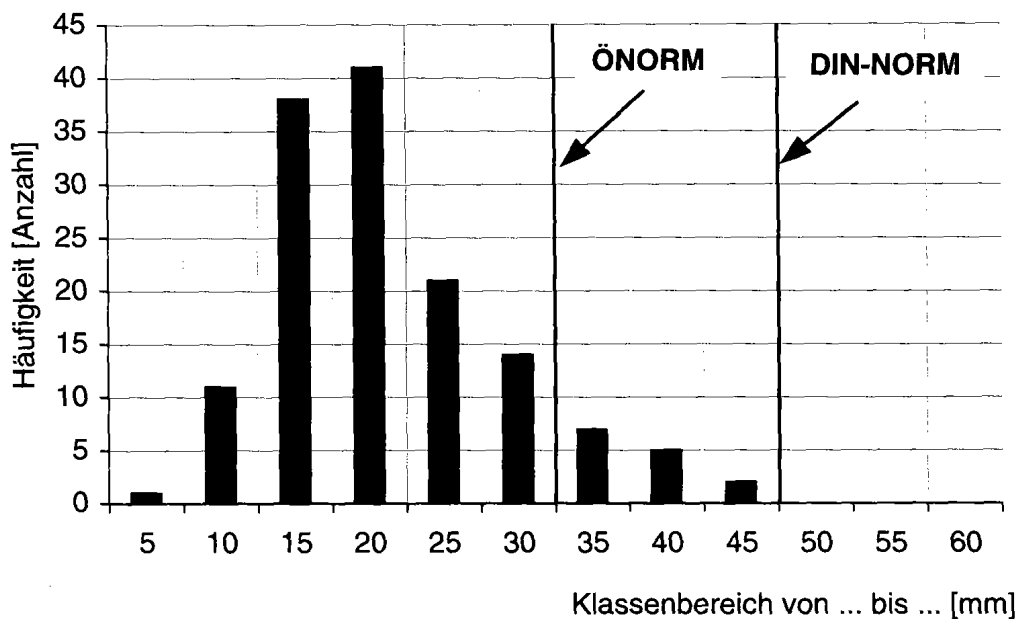


Abbildung 7.6: Verteilung der Pelletlängen (Versuch 1 ohne Presshilfsmittel)

Bemerkungen: Die Verteilung der Pelletlängen wurde durch manuelles Ausmessen von 140 Einzelpellets ermittelt; Die Pellets stammen aus dem Mischmuster von insgesamt 12 Einzelmustern (siehe Kapitel 5.2); Die ÖNORM toleriert Pellets mit Überlängen, sofern der entsprechende Massenanteil 20% nicht überschreitet (siehe Tabelle 5.1).

Lesebeispiel: Die erste Klasse umfasst Pellets mit Längen zwischen 0 und 5 mm.

⁴ Eine vollständige Analyse nach DIN 51731 erfolgte nur für eines der eingesetzten Presshilfsmittel. Von den übrigen wurden die Gehalte an N, S, und Cl bestimmt.

Die Häufigkeitsverteilung der Pelletlängen ist gleichförmig mit einer leichten Asymmetrie bei längeren Pellets. Die Längenverteilung ist bei der verwendeten Pelletpresse nicht beeinflussbar. Die mittlere Pelletlänge liegt im Bereich von 15 mm bis 20 mm. Die längsten Pellets weisen Längen zwischen 40 mm und 45 mm auf. Der Zusatz von Presshilfsmitteln verändert die Längenverteilungen nicht wesentlich, mit Ausnahme der Versuche mit dem Zusatz von Presshilfsmittel 1, welches einen leicht erhöhten Anteil von überlangen Pellets ergibt (siehe Tabelle 7.4 und Tabelle 7.5).

Aus der Längenverteilung lässt sich rechnerisch die Masseverteilung der Pellets ermitteln (Abbildung 7.7). Im dargestellten Beispiel weisen rund 45 Masse-% der Pellets eine Länge von weniger 20 mm auf und weniger als 2 Masse-% der Pellets haben eine Länge von mindestens 40 mm.

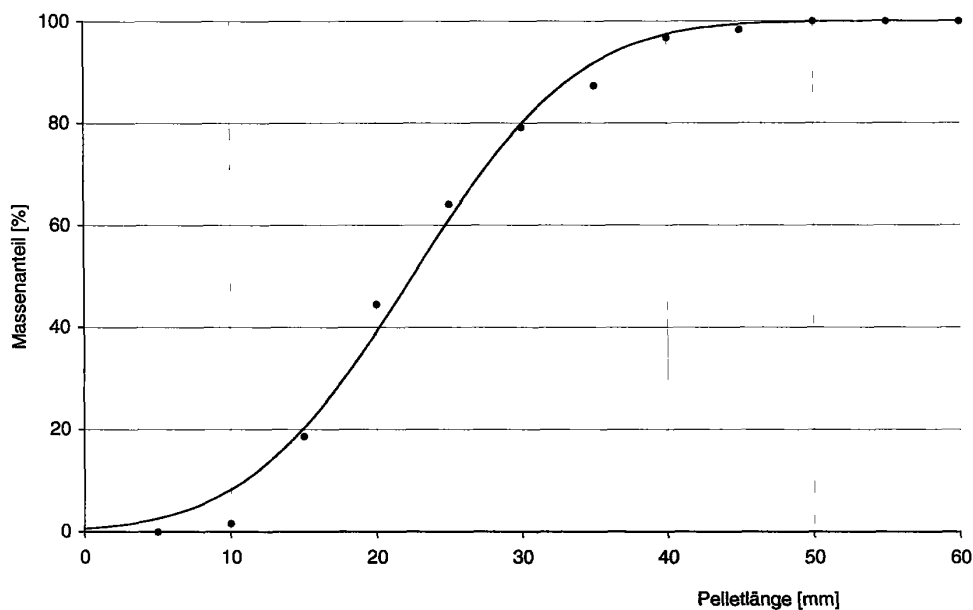


Abbildung 7.7: Masseverteilung der Pellets aus dem Versuch 1

Bemerkung: Die Masseverteilung wird rechnerisch aus der Längenverteilung unter Annahme einer konstanten Pellet-Rohdichte ermittelt.

7.4.3 Abriebverhalten

Die Abriebfestigkeit, welche die mechanische Festigkeit der Pellets beschreibt (s.a. Ausführungen in Kapitel 4.1), ist die wichtigste physikalische Eigenschaft von Holzpellets. Die Ermittlung von reproduzier- und vergleichbaren Abriebwerten von verschiedenen Pellets erfolgt mittels eines standardisierten Verfahrens, wie es z.B. die ÖNORM M 7135 vorsieht. Der mittlere Abrieb darf 2.3 Gew.-% nicht überschreiten, wobei die ÖNORM wegen möglichen experimentellen Messfehlern eine Abweichung von maximal 0.2 Gew.-% akzeptiert.

In diesem Teil interessiert vor allem der Einfluss der zugesetzten Presshilfsmittel auf den Pelletabrieb. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 7.4 zusammengefasst und in der Abbildung 7.8 visualisiert. Der Vergleich mit Pellets anderer Hersteller wird im Kapitel 7.5 behandelt.

Versuchsbezeichnung	Kurzbezeichnung	Datum	Mittlerer Abrieb (60s) [%]	Stabw Abrieb (60 s) [%]	Mittlerer Abrieb (600s) [%]	Mittlere Länge [mm]	Stabw Länge	Massenanteil Pellets mit L >5'D [Gew.-%]	Pellets mit max. Überlänge vorhanden (ja/nein)	Mittlerer Durchmesser	Stabw Durchmesser	Dichte nach ÖNORM [kg/dm ³]	(originale) Pelleteuchte u [% atro]	(originalen) Wassergehalt Pellets w [%]
Bürli Pellets ohne Presshilfsmittel (V1; Standard)	V1	2.4.01	2.25	0.52	14.7	19.3	7.7	12.6	nein	6.90	0.11	1.24	6.9	6.4
Bürli Pellets ohne Presshilfsmittel (Standard)	R5	5.4.01	1.91	0.15	15.1	18.0	6.5	9.0	nein	6.81	0.12		6.3	5.9
Bürli Pellets ohne Presshilfsmittel (mehr Rinde; V8)	V8	9.4.01	4.79	0.92	39.5	19.3	6.3	5.7	nein	6.61	0.10	1.23	6.0	5.7
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 1 (mehr Rinde)	R8	9.4.01	1.56	0.39	9.8	16.8	6.9	11.3	nein	6.91	0.13	1.19	8.6	7.9
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 1 (V2)	V2	3.4.01	1.55	0.30	9.5	18.1	7.3	6.8	nein	6.89	0.15	1.20	7.5	7.0
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 1 (V7)	V7	9.4.01	0.95	0.23	6.7	22.3	9.9	18.6	ja	6.83	0.14	1.23	6.7	6.3
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 2 (V3)	V3	3.4.01	2.46	0.46	21.8	16.8	7.9	11.8	nein	6.86	0.13	1.23	7.2	6.7
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 3 (V4)	V4	4.4.01	3.35	0.32	25.9	15.8	5.4	3.3	nein	6.82	0.12	1.25	7.0	6.5
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 4 (V5)	V5	5.4.01	2.35	0.36	17.6	19.7	8.4	11.7	ja	6.86	0.15	1.22	6.6	6.2
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 4 (V9)	V9	10.4.01	2.37	0.29	14.6	16.2	7.4	7.2	ja	6.82	0.10	1.22	6.1	5.7
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 5 (V6)	V6	5.4.01	3.88	0.42	31.7	16.7	5.9	3.1	nein	6.86	0.12	1.22	6.8	6.3

Tabelle 7.4: Physikalische Eigenschaften der auf der untersuchten Anlage hergestellten Holzpellets

Bemerkungen: Vx = Pellets aus Vollversuchen auf der untersuchten Anlage (siehe Kapitel 5.2); Rx = Pellets aus einzelnen Sackmustern aus Versuchen oder Einzelmustern von Konkurrenten; Der Pelletabrieb (60s Abriebsdauer) von Mustern mit den Bezeichnungen Vx wird von jeweils 12 einzelnen Probemustern bestimmt, die übrigen Parameter (inkl. Langzeitabrieb (10 x 60s); 3fach Bestimmung) werden aus den Mischmustern erhoben.

Mit Ausnahme des Presshilfsmittels 1 führen sämtliche untersuchten Presshilfsmittel zu einer Erhöhung des Abriebs. Keines der eingesetzten Presshilfsmittel führte zu einer Steigerung der Produktionsleistung oder zu einer Minderung des Fremdenergieverbrauchs der Anlage.

Nebst den Presshilfsmitteln führt auch der Einsatz von Sägemehl mit einem leicht erhöhten Rindenanteil⁵ zu einem deutlich höheren Pelletabrieb als das betriebsübliche Sägemehl. Im Unterschied zu Hobelspänen enthält Sägemehl aus Sägereien immer auch geringe Restmengen von Holzrinde, so dass von Pellets aus Hobelspänen bei sonst gleichen Betriebsbedingungen ein geringerer Abrieb erwartet werden kann. Der erhöhte Abrieb mit dem leicht rindenreicheren Sägemehl lässt sich durch Zusatz des Presshilfsmittels 1 deutlich reduzieren.

Zwischen dem Abrieb und dem Massenanteil Pellets mit Überlänge besteht auf der untersuchten Anlage ein Zusammenhang (Abbildung 7.9), indem Pellets mit geringem Abrieb einen höheren Masseanteil an Pellets mit Überlängen aufweisen als Pellets mit höherem Abrieb. Der Massenanteil mit Überlängen liegt jedoch immer unterhalb den Anforderungen gemäss ÖNORM M 7135.

⁵ Der erhöhte Rindenanteil im eingesetzten Sägemehl ist visuell nicht erkennbar.

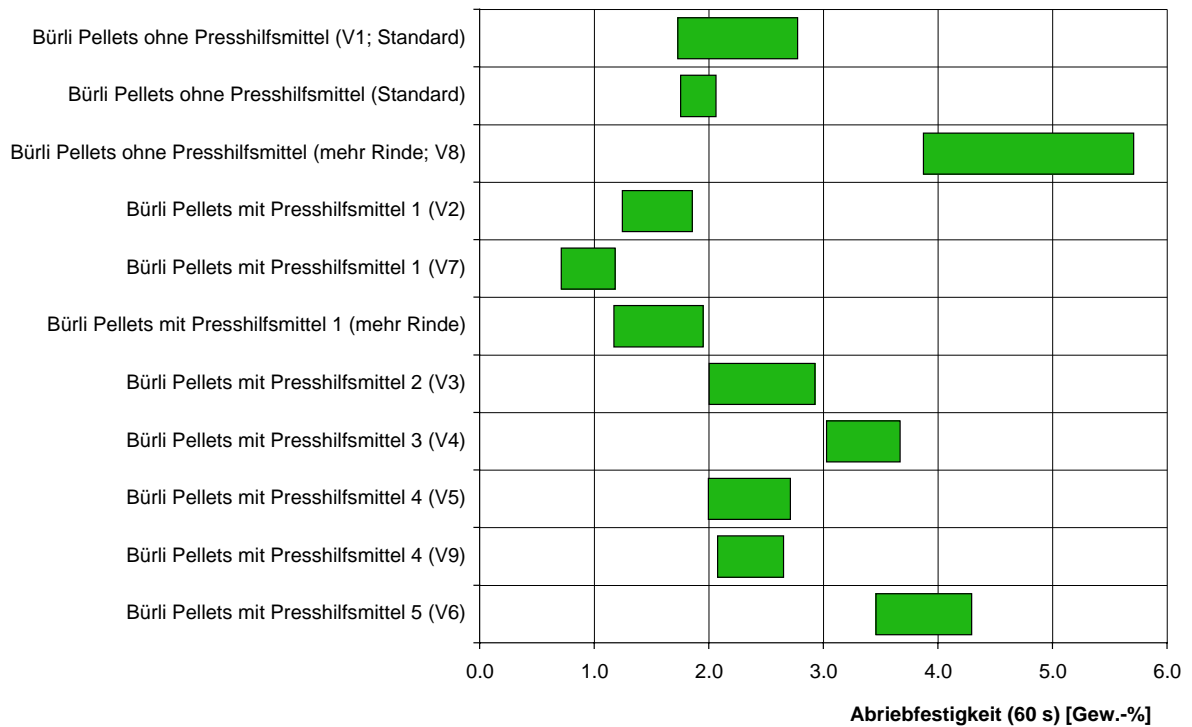


Abbildung 7.8: Vergleich des Abriebverhaltens beim Zusatz von Presshilfsmitteln

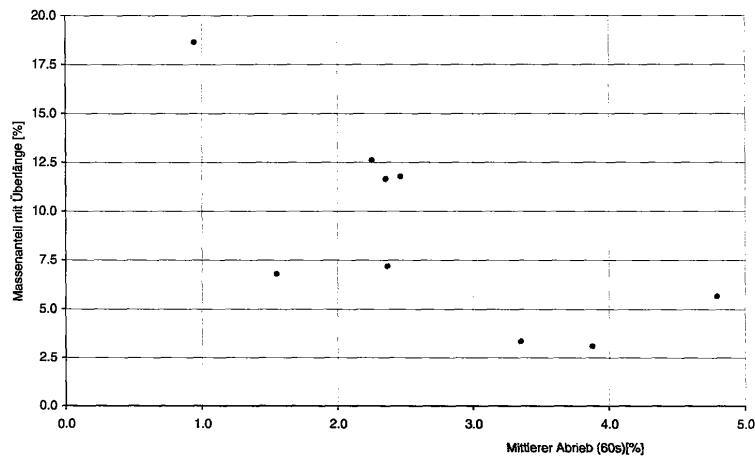


Abbildung 7.9: Zusammenhang zwischen Massenanteil an Pellets mit Überlänge und dem Abrieb

Bemerkungen: Zahlenwerte gemäss Tabelle 7.4; Als Überlänge werden Pellets mit einer Länge von mehr als 5*D bezeichnet; Der Masseanteil wird aus der Massenverteilung ermittelt (s.a. Abbildung 7.7).

Erwähnenswert ist auch der Unterschied in den Abriebswerten bei sonst gleichen Betriebsbedingungen, wenn die Beprobung einerseits fortlaufend aus dem kontinuierlichen Produktionsprozess (z.B. Versuch V1) erfolgt oder andererseits ein einzelnes Produktionsmuster (Muster R5) geprüft wird.

Dabei fällt auf, dass das Muster aus dem laufenden Produktionsprozess eine deutlich höhere Streuung in den Abriebswerten aufweist als das einzelne Sackmuster. Unter der Annahme, dass die Reproduzierbarkeit der einzelnen Abriebsmessung in beiden Fällen gleich ist, lässt sich daraus schliessen, dass im Produktionsprozess Schwankungen auftreten, die erhöhten Abrieb verursachen. Allerdings gelang es nicht, aus den gemessenen Prozessparametern (s.a. Kapitel 7.3) einen Zusammenhang abzuleiten.

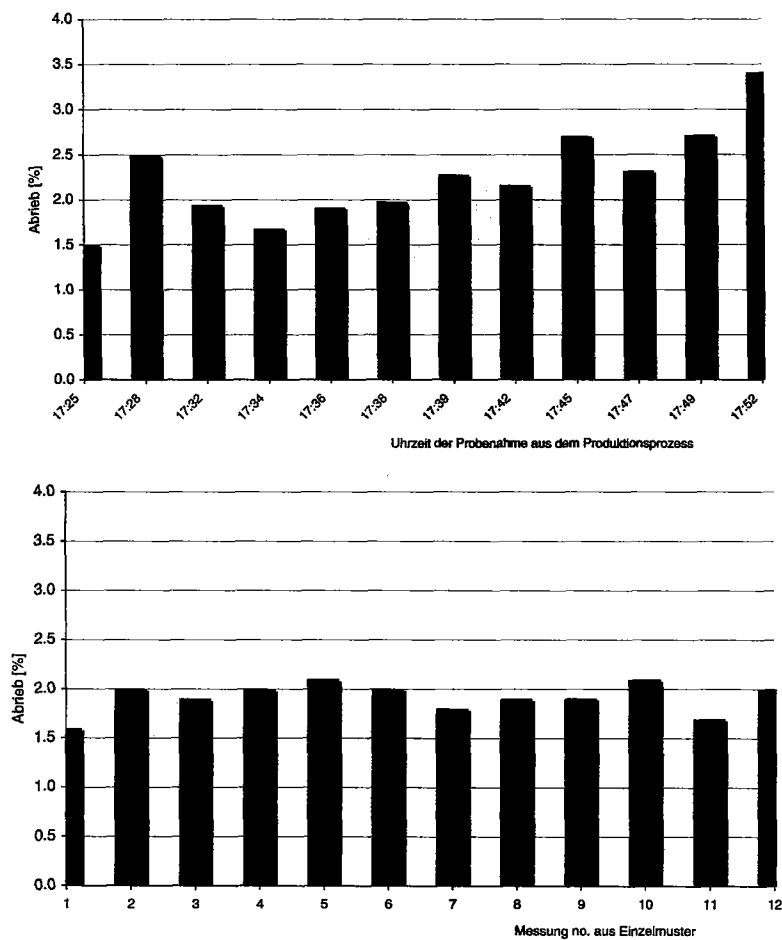


Abbildung 7.10: Gegenüberstellung der Abriebswerte von Pellets, die in 2min-Abständen aus dem Produktionsprozess entnommen wurden (obere Abbildung) und aus einem einzelnen Sackmuster stammen (untere Abbildung)

Bemerkungen: Die Betriebseinstellungen sind in beiden Versuchen vergleichbar.

7.5 Abriebverhalten von Pellets anderer Hersteller

Zur Beurteilung der Pelletqualität wurde eine Reihe von Holzpellets von in- und ausländischen Produzenten untersucht. Nebst Pellets aus reinem Holz wurde auch ein solche aus Kaffeehaurückständen untersucht. Derartige Pellets fallen in der lebensmittelverarbeitenden Industrie an und müssen teilweise über die Kehrichtverbrennung entsorgt werden, obwohl das Rohmaterial biogenen Ursprungs ist.

Die untersuchten physikalischen Eigenschaften der verschiedenen Pelletmuster sind in der Tabelle 7.5 zusammengestellt. Die Ergebnisse des wichtigsten physikalischen Parameters, des Abriebverhaltens, sind in der Abbildung 7.11 visualisiert.

Versuchsbezeichnung	Kurzbezeichnung	Datum	Mittlerer Abrieb (60s) [%]	Stabw Abrieb (60 s) [%]	Mittlerer Abrieb (600s) [%]	Mittlere Länge [mm]	Stabw Länge	Massenanteil Pellets mit L >5*D [Gew.-%]	Pellets mit max. Überlänge vorhanden (ja/nein)	Mittlerer Durchmesser	Stabw Durchmesser	Dichte nach ÖNORM [kg/dm ³]	(originale) Pelletfeuchte u [% atro]	(originaler) Wassergehalt Pellets w [%]
Bürli Pellets ohne Presshilfsmittel (V1; Standard)	V1	2.4.01	2.25	0.52	14.7	19.3	7.7	12.6	nein	6.90	0.11	1.24	6.9	6.4
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 1 (V7)	V7	9.4.01	0.95	0.23	6.7	22.3	9.9	18.6	ja	6.83	0.14	1.23	6.7	6.3
Pellets aus der Schweiz	R10	9.5.01	4.04	0.51	29.9	18.2	4.2	0.0	nein	5.94	0.03	1.32	5.1	4.8
Pellets aus Dänemark	R4	5.4.01	1.76	0.21	9.1	10.1	3.1	0.0	nein	8.16	0.07		6.7	6.3
Pellets aus Schweden	R12	14.6.01	3.63	0.86								1.18	9.2	8.4
Pellets aus Italien	R9	8.5.01	3.56	0.55	20.0	11.0	4.1	0.0	nein	6.71	0.07	1.28	6.6	6.2
Pellets aus Österreich (P1)	R1	8.5.01	1.59	0.15	8.3	14.7	3.8	0.0	nein	6.01	0.04	1.23	8.2	7.6
Pellets aus Österreich (P2)	R2	2.4.01	3.09	0.70	19.5	12.4	4.2	0.0	nein	6.20	0.10		15.1	13.1
Pellets aus Österreich (P2)	R3	5.4.01	2.15	0.28	18.1	12.4	4.2	0.0	nein	6.20	0.10		12.0	10.7
Pellets aus Österreich (P3)	R11	17.5.01	0.97	0.07	4.6	16.3	3.4	0.0	nein	5.99	0.03	1.21	7.1	6.6
Pellets aus Kaffeerückständen	S1	28.5.01	9.51	0.76	85.4	13.7	5.9	0.0	nein	8.53	0.12	1.25	10.2	9.3

Tabelle 7.5: Physikalische Eigenschaften von Pellets verschiedener Hersteller

Bemerkungen: Vx = Pellets aus Vollversuchen auf der untersuchten Anlage (siehe Kapitel 5.2); Rx = Pellets aus einzelnen Sackmustern aus Versuchen oder Einzelmustern von Konkurrenten; S1 = Spezialpellets aus Kaffeehaurückständen; Der Pelletabrieb (60s Abriebsdauer) von Mustern mit den Bezeichnungen Vx wird als Einzelbestimmung von jeweils 12 einzelnen Probemustern bestimmt, die übrigen Parameter (inkl. Langzeitabrieb (10 x 60s); 3fach Bestimmung) werden aus den Mischmustern erhoben

* Pelletmuster in Big bag während rund 1.5 Jahren in gedeckter Halle gelagert. Der Feuchtegehalt ist daher höher als üblich und nicht repräsentativ für Pellets dieses Herstellers.

Von den Fremdmustern ist nicht in allen Fällen bekannt, ob und in welchem Umfang Presshilfsmittel eingesetzt wurden. Bei folgenden Mustern wird deklariert (teilweise durch schriftliche Angabe auf den Sackmuster und teilweise durch mündliche Zusicherung des Produzenten oder Händlers), dass keine Presshilfsmittel eingesetzt wurden:

- Pellets aus der Schweiz (R10)
- Pellets aus Dänemark (R4)
- Pellets aus Schweden (R12)
- Pellets aus Österreich (P1)

Erwartungsgemäss weisen die verschiedenen Pellets deutliche Unterschiede in den Eigenschaften auf, wobei dem Abrieb die grösste Bedeutung zukommt. Die auf der untersuchten Anlage hergestellten Pellets (ohne Presshilfsmittel) bewegen sich in Bezug auf den Abrieb im mittleren Bereich der gefundenen Werte und unterschreiten den maximal zulässigen Wert von 2.3% gemäss ÖNORM nur knapp. Die geringsten Abriebswerte (60 s Abriebsdauer) zeigen die Pellets aus Österreich, die ausserdem auch geringere mittlere Längen aufweisen. Die eigenen Pellets weisen zum Teil Überlängen auf, was in gewissen Feuerungsanlagen bzw. deren Beschickungseinrichtungen gelegentlich zu Problemen führen kann. Die übrigen Pelleteigenschaften liegen innerhalb der Vorgaben der ÖNORM M7135.

Werden die Pellets anstatt wie standardmässig während 60 Sekunde; gemäss ÖNORM M7135 während der 10fach längeren Zeitdauer in der Messapparatur abgerieben, ergeben sich erwartungsgemäss höhere Werte. Auffallend ist hierbei, dass die Pellets mit sehr geringen Abriebswerten nach den Normvorgaben im Langzeitversuch deutlich besser abschneiden als die Pellets mit hohen Standardabriebswerten.

Die mittleren Abriebswerte der untersuchten Holzpelletmuster schwanken im Bereich zwischen 1% und 4% (Abbildung 7.11), die Pellets aus den Kaffeehaurückständen weisen gar einen mittleren Abriebswert von über 9% auf (Tabelle 7.5). Mit Ausnahme der untersuchten Pelletmuster aus Österreich und Dänemark sowie der eigenen Pellets mit Zusatz des Presshilfsmittels 1 weisen die übrigen Muster mittlere Abriebswerte auf, die über dem zulässigen Maximalwert gemäss ÖNORM M7135 liegen.

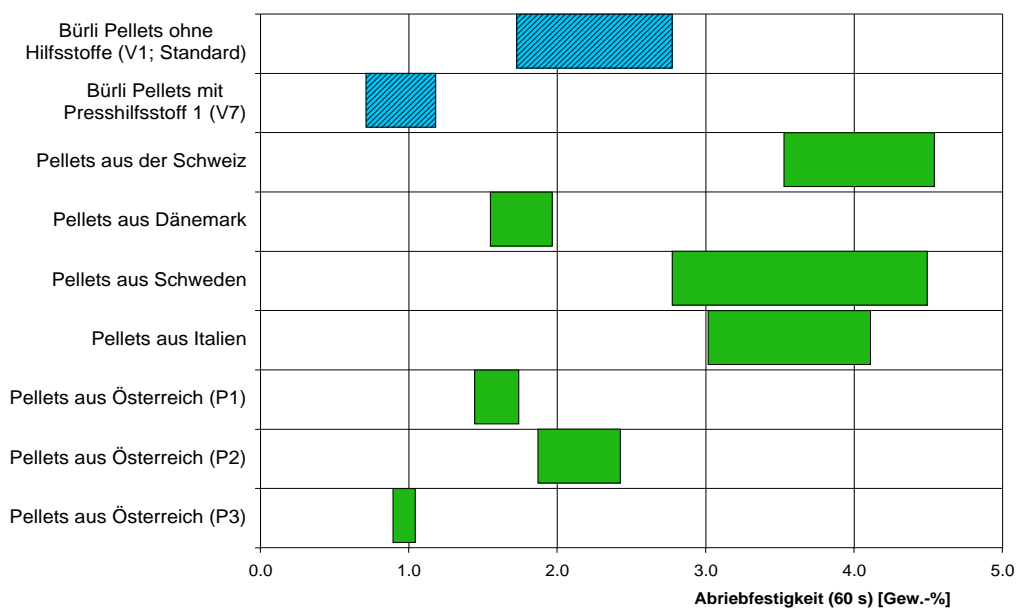


Abbildung 7.11: Vergleich des Abriebverhaltens von Holzpellets verschiedener Hersteller
Bemerkungen: Darstellung als Mittelwert +/- Standardabweichung; Ergebnisse der Kaffeehautpellets sind in der Abbildung nicht enthalten (Tabelle 7.5); Die ÖNORM M7135 und die Anforderungen des PVA lassen einen Abrieb von bis zu 2.3% zu (siehe Kapitel 5.1).

8 Ergebnisse der Pelletlagerung

Zur Ermittlung der Pelleteigenschaften werden verschiedene Pellets aus der Produktion und Pellets von verschiedenen Herstellern in einem Keller gelagert und anschliessend auf das Abriebverhalten und die Feuchte untersucht.

Eine erste Versuchsreihe beinhaltet die Lagerung der Pellets in den verschlossenen Originalsäcken aus der Produktion über einen Zeitraum von 66 Tagen (Anfang April bis Anfang Juni). Diese Sacklagerung dürfte einen typischen Lagerungsprozess bei einem Endverbraucher abbilden.

In einer weiteren Versuchsreihe werden verschiedene Pelletmuster auf einem Gitterrost in einem Kellerklima bei bekanntem Raumklima offen gelagert. Parallel hierzu werden vorgängig getrocknete Pelletmuster zur Ermittlung der zeitlichen Feuchtigkeitsaufnahme offen gelagert.

8.1 Kellerklima

Das im verwendeten Keller herrschende Klima ist in der Abbildung 8.1 zusammengestellt. Die Luftfeuchtigkeit variiert im Bereich von 52% bis 67% relativer Feuchtigkeit, während die mittleren Raumtemperaturen zwischen 18°C und 26°C liegen. Der mittlere Wassergehalt in der Kellerluft beträgt 11.5 g/m^3 . Während der Pelletlagerung in den verschlossenen Säcken wurde das Kellerklima nicht ermittelt.

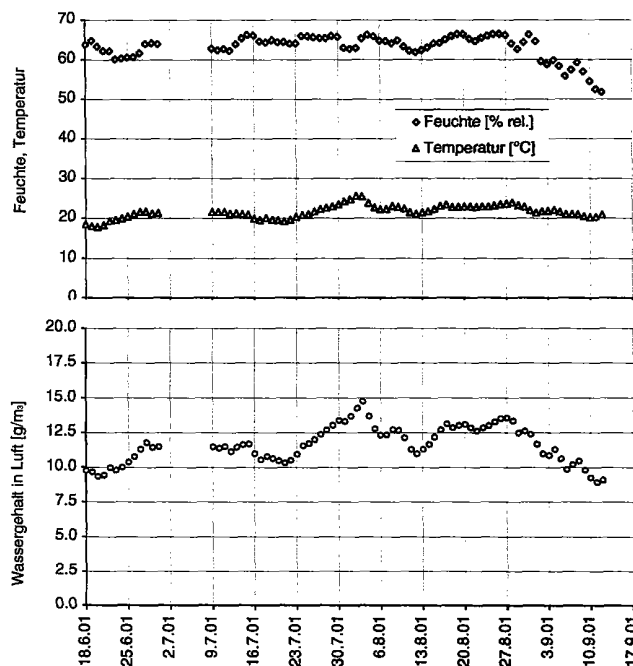


Abbildung 8.1: Kellerklima während der offenen Lagerung von Holzpellets

Bemerkungen: Die Temperatur und die Relativfeuchte werden kontinuierlich (10s-Messintervall zu jeweils 1-Stundenmittelwerte zusammengefasst) mittels eines Feuchtesensors (Rotronic Hygromer Messumformer I270) auf einem Datenerfassungsrechner gespeichert; Tagesmittelwerte von Temperatur, Temperatur und Wassergehalt.

8.2 Pelletfeuchten nach Lagerung

Die in den verschlossenen Papiersäcken verpackten Pellets nahmen während der insgesamt 66 Tage dauernden Lagerung im Mittel rund 3.6% Wasser auf, was zu einer mittleren Pelletfeuchte von 10.1% führte. Die Holzzusammensetzung und die Gegenwart von Presshilfsmitteln führte zu keiner signifikanten Änderung des Feuchtigkeitsaufnahmeverhaltens. Dagegen zeigen die in den PE-Säcken verpackten Pellets nach 35 Tagen Lagerung keine Änderung der Pelletfeuchte.

Die anschliessende offene Pelletlagerung während rund 80 Tagen im Kellerklima zeigt nur noch eine geringe zusätzliche Feuchtigkeitsaufnahme (Abbildung 8.2).

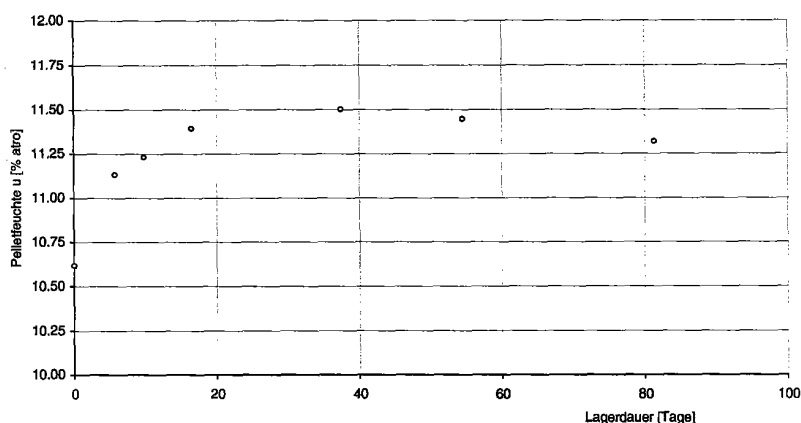


Abbildung 8.2: Verlauf der mittleren Feuchtegehalte von Holzpellets während 81 Tage offener Lagerung

Bemerkungen: mittlere Feuchtegehalte (%atro) von insgesamt 10 verschiedenen Holzpellets (s.a. Abbildung 8.3); Die Lagerung dauerte vom 22.Juni bis 12. September 2001; Die Umgebungsluft im Lagerraum weist während dem Beobachtungszeitraum einen mittleren Wassergehalt von 11.5 g/m³ auf.

Nach rund 40 Tagen offener Lagerung nehmen die Feuchtegehalte in den Pellets sogar leicht ab, was auf den verminderten Feuchtegehalt in der Luft zurückzuführen ist (s.a. Abbildung 8.1). Die mittleren Endfeuchte von 11.3 % atro liegt im Bereich des zulässigen Feuchtegehalts von 11.1 % atro nach ÖNORM M7135 bzw. leicht unter dem entsprechenden Wert von 13.6 % atro gemäss DIN 51731 (siehe Tabelle 5.2).

Die Unterschiede in den Feuchtegehalten von Pellets verschiedener Hersteller oder dem Zusatz von verschiedenen Hilfsstoffen sind bei der offenen Lagerung gering (Abbildung 8.3).

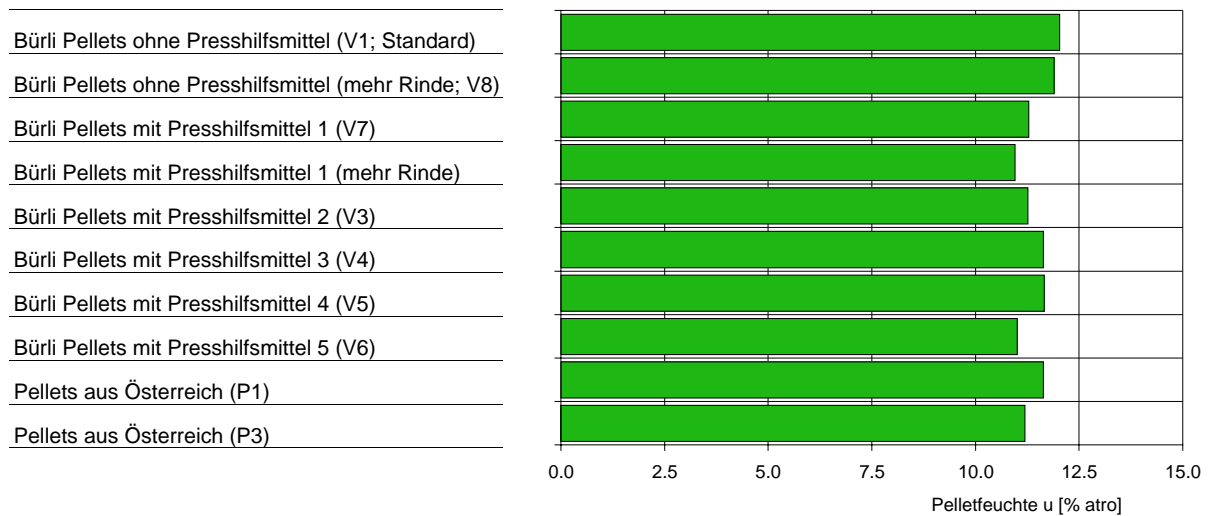


Abbildung 8.3: Feuchtegehalte (%atro) von getrockneten Holzpellets nach 55 Tagen offener Lagerung

Bemerkungen: Die Pellets werden vor der Lagerung während 5 Stunden bei 105°C getrocknet; Die Lagerung dauerte vom 22.Juni bis 16. August 2001 (55 Tage); Die Umgebungsluft im Lagerraum weist während dem Beobachtungszeitraum einen mittleren Wassergehalt von 11.8 g/m³ auf.

Das Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten von getrockneten Pellets zeigt die Abbildung 8.4. Sämtliche der untersuchten Pellets zeigen ein identisches Verhalten in Bezug auf die Feuchtigkeitsaufnahme.

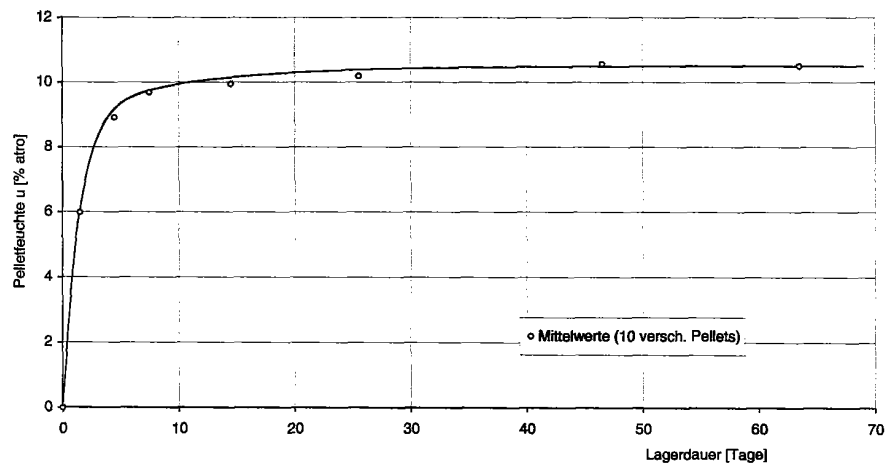


Abbildung 8.4: Feuchtigkeitsaufnahme von getrockneten Holzpellets bei offener Lagerung in Keller

Bemerkungen: Die Pellets werden vor der Lagerung während 5 Stunden bei 105°C getrocknet; Die Lagerung dauerte vom 13.Juni bis 16. August 2001 (64 Tage); Die Umgebungsluft im Lagerraum weist während dem Beobachtungszeitraum einen mittleren Wassergehalt von 11.4 g/m³ auf.

Die getrockneten Pellets zeigen zu Beginn der Exposition eine markante Feuchtigkeitsaufnahme. Bereits nach 10 Tagen offener Lagerung sind 95% des Endwertes erreicht. Die Feuchteaufnahme-fähigkeit nimmt danach deutlich ab und erreicht nach rund 1 monatiger Lagerdauer eine annähernde Sättigung.

8.3 Pelletabrieb nach Lagerung

Im Gegensatz zur Feuchtigkeitsaufnahme durch die Lagerung zeigt das Abriebverhalten der gelagerten Pellets markante Unterschiede (

Abbildung 8.5).

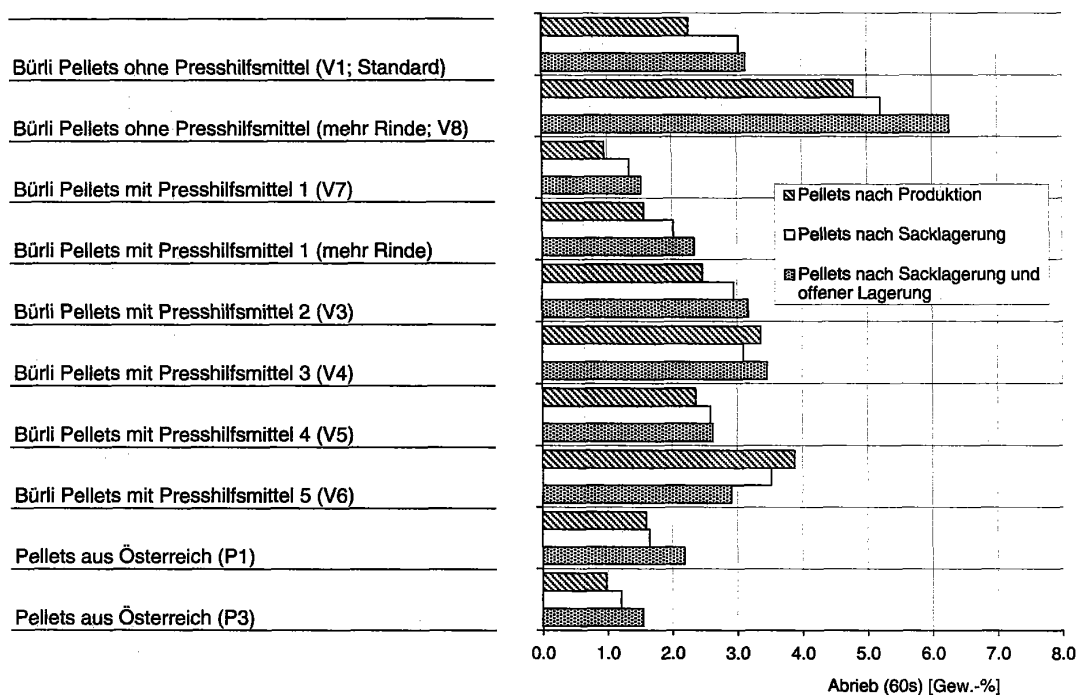


Abbildung 8.5: Verhalten der Abriebswerte von Holzpellets durch Lagerung

Bemerkungen: Mit Ausnahme der Pellets P1 und P3 nahmen die Pellets durch die Sacklagerung Feuchtigkeit auf (Pellets P1 und P3 sind in PE-Säcken geliefert); Mittlere Pelletfeuchten: 7.1 % atro (Stabw 0.7) für originale Pellets, 10.1 % atro (Stabw 0.4) für Pellets nach 66 Tagen Sacklagerung (=vor offener Lagerung; ohne P1 und P3); 11.3% atro (Stabw 0.4) für Pellets nach offener Lagerung; Die offene Lagerung im Keller dauerte vom 22.Juni bis 12. September 2001(81 Tage).

Mit Ausnahme eines Pelletmusters (Pellets mit Presshilfsmittel 5) nimmt der Abrieb zu, d.h. die Pelletqualität wird schlechter. Die Abnahme der Abriebfestigkeit hängt vom untersuchten Pellettyp ab. Die geringste Zunahme des Pelletabriebs von 0.11% (absolut; in Bezug auf originalen Abrieb) zeigen die Pellets mit dem Presshilfsmittel 3, die höchste Zunahme von 1.48% (absolut) weisen die Pellets mit dem erhöhten Rindenanteil auf.

Von den insgesamt 10 untersuchten Pelletmustern weisen nur noch vier Pellets Abriebswerte unterhalb der ÖNORM-Anforderung (s.a. Kapitel 5.1) auf.

9 Emissionen bei der Pelletverbrennung

Zur Untersuchung des Abbrandverhaltens von verschiedenen Pellets gelangt eine Pelletfeuerung einfacher Bauart (Beschreibung in Kapitel 6.2) ohne Leistungs- oder Verbrennungsregelung zum Einsatz. Ein Verbrennungsversuch beinhaltet sowohl Messungen im Vollast- als auch im Teillast-Betriebspunkt und dauert jeweils mehrere Stunden mit einem Brennstoffverbrauch von total rund 50 kg Pellets.

Insgesamt werden 9 verschiedene Holzpellet-Chargen und eine Pelletcharge aus Kaffeehaurückständen verbrannt. Der Pelletabrieb beeinflusste den Brennstoffmassenstrom bzw. die daraus berechnete Brennstoffwärmeleistung, indem Pellets mit geringem Abrieb geringere Massenströme im Vollast-Betriebspunkt ergaben als Pellets mit höherem Abrieb. Umgekehrt war der Brennstoffmassenstrom bei Pellets mit höherem Abrieb im Teillast-Betriebspunkt höher als diejenige von Pellets mit geringem Abrieb. Mit den Pellets aus den Kaffeehaurückständen konnte kein stabiler Feuerungsbetrieb erzielt werden, so dass nur einzelne Messpunkte zur Verfügung stehen, die der qualitativen Beurteilung des Abbrandverhaltens dienen.

9.1 Schadstoff/ λ -Charakteristik der Pelletfeuerung

Die untersuchte Pelletfeuerung zeigt eine ausgeprägte Abhängigkeit einzelner Schadstoff-Emissionen von der Luftüberschusszahl Lambda (Abbildung 9.1). Dabei sind sowohl die Emissionen von Kohlenmonoxid, unverbrannten Kohlenwasserstoffen (als FID-Messwert) als auch der Gesamtstaubgehalt durch die Luftüberschusszahl beeinflusst.

Bei Luftüberschusszahlen unter 2.0 steigen die Schadstoffemissionen exponentiell an und führen zu deutlichen Überschreitungen der LRV-Grenzwerte. Ein Anlagenbetrieb mit vertretbaren Emissionen erfordert für diesen Feuerungstyp einen Luftüberschuss über 2.0.

Die NO_x -Emissionen zeigen bei CO -Gehalten $< 2000 \text{ mg/m}_n^3$ (13% O_2) keine eindeutige Abhängigkeit vom CO -Gehalt im Abgas. Bei CO -Gehalten $> 5000 \text{ mg/m}_n^3$ sinken hingegen die NO_x -Emissionen auf Werte $< 50 \text{ mg/m}_n^3$.

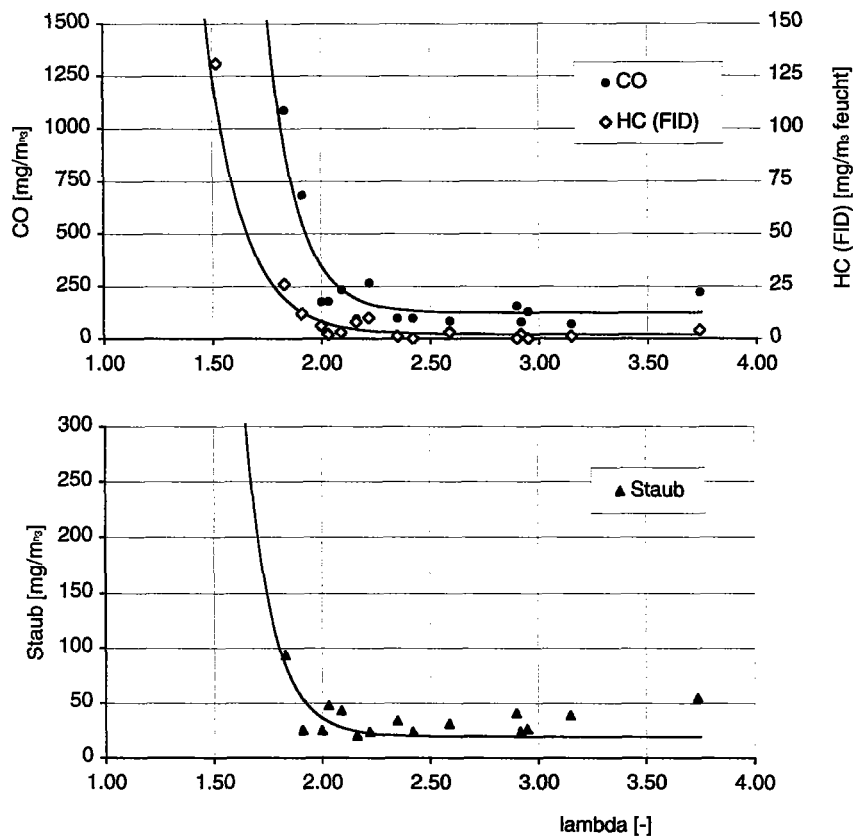


Abbildung 9.1: Schadstoff/ λ -Charakteristiken der untersuchten Pelletfeuerung vom Typ Pelletino

Bemerkungen: Zahlenwerte gemäss Tabelle 9.1 und Tabelle 9.2; CO und Staub mit Bezug auf trockenes Abgas bei 1013 mbar, 0°C , 13% O_2 ; HC (FID) mit Bezug auf feuchtes Abgas bei 1013 mbar, 0°C , 13% O_2 , kalibriert mit C_3H_8 .

9.2 Emissionen im Vollast-Betriebspunkt

Die über die Vollast-Betriebperiode gemittelten Emissionsdaten sind in der Tabelle 9.1 zusammengestellt. Die erzielte Brennstoffwärmeleistung variiert im Bereich von 12 kW bis 16.8 kW.

Die in der untersuchten Pelletfeuerung eingesetzten Holzpellets führen zu deutlich unterschiedlichen Emissionen (s.a. Abbildung 9.2).

Versuchsbezeichnung	Brennstoff-Verbrauch kg/h	Brennstoff- wärmeleistung kW	Luftüberschusszahl -	CO-Emission ¹⁾ mg/m ³	NO _x -Emission ¹⁾ mg/m ³	HC (FID) -Emission ²⁾ mg/m ³	SO ₂ -Emission ¹⁾ mg/m ³	Staub-Emission ¹⁾ mg/m ³	Anzahlkonzentration ¹⁾ 10 ¹³ /m ³	PM 0.6 ¹⁾ mg/m ³	Partikel mode nm
Bürli Pellets ohne Presshilfsmittel (V1; Standard)	3.10	14.6	1.91	687	72	12	1.6	26	3.22	19	66
Bürli Pellets ohne Presshilfsmittel (mehr Rinde; V8)	2.52	12.0	2.03	180	86	2	n.b.	48	2.04	127	102
Pellets aus Österreich (P1)	2.67	13.0	2.22	269	74	10	0.5	24	4.00	15	73
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 2 (V3)	3.32	15.7	2.16	98	117	8	n.b.	21	3.70	16	67
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 3 (V4)	3.17	14.9	2.00	177	142	6	n.b.	26	3.73	15	67
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 4 (V5)	2.81	13.3	2.35	99	244	1	n.b.	34	3.67	30	76
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 4 (V9) und erhöhtem Sägemehlanteil	3.54	16.7	1.83	1090	147	26	n.b.	94	2.44	247	155
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 5 (V6)	3.54	16.8	1.52	5189	26	131	n.b.	837	2.40	1214	359

Tabelle 9.1: Zusammenstellung von Betriebs- und Emissionsmesswerten bei der Verbrennung von Holzpellets im Vollast-Betriebspunkt

Bemerkungen: NO_x als NO₂; PM 0.6 = Particulate Matter 0.6 μm

¹⁾ trockenes Abgas bei 1013 mbar, 0°C, 13% O₂ (Bezugsgrösse)

²⁾ feuchtes Abgas bei 1013 mbar, 0°C, 13% O₂ (Bezugsgrösse), als C (kalibriert mit C₃H₈)

Die teilweise erheblichen Unterschiede der Emissionen an CO, Kohlenwasserstoffen und Staub werden auf einen Betrieb bei zu tiefem Luftüberschuss zurückgeführt, der sich als Folge eines unregelmässigen Anlagenbetriebs bei einigen Pellettypen einstellt. Dieser Anstieg der Emissionen ist somit nur indirekt eine Folge der unterschiedlichen Pelleteigenschaften. Am deutlichsten kommt dies beim Versuch V6 zum Vorschein. Die dabei verwendeten Pellets weisen einen hohen Abrieb auf (s.a. Tabelle 7.4), was bei der eingesetzten Anlagentechnologie zu einem erhöhten Brennstoffeintrag bei gleichbleibender Luftmenge führt. Die dadurch resultierende Absenkung der Luftüberschusszahl verursacht danach die erhöhten Emissionen.

Der Einfluss der mechanischen Pelleteigenschaften auf die Verbrennungsqualität lässt sich auch anhand eines Vergleiches von einem Versuch mit erhöhtem Sägemehlanteil illustrieren (Vergleich von Versuch V4 mit V9). Die Erhöhung des Sägemehlanteils führt mit Ausnahme der NO_x-Emissionen zu einer spürbaren Erhöhung der übrigen Emissionswerte, was wiederum auf die tiefere Luftüberschusszahl und die damit verbundene Erhöhung des Schadstoffausstosses zurückzuführen ist.

Die Gesamtstaubemissionen sind bei allen Versuchen mit Ausnahme des Versuches 6 auf tiefem Niveau und unterschreiten typische Werte von Holzschnitzelfeuerungen deutlich. Der mittlere Partikeldurchmesser der emittierten Staubteilchen (Partikel mode, Tabelle 9.1) bewegt sich bei ausreichendem Luftüberschuss ($\lambda > 2$) im Bereich zwischen 60 nm und 80 nm, bei $\lambda < 2$ betragen die mittleren Partikeldurchmesser >100 nm. Die Hauptfracht der Partikel stammen demnach wie bei der Holzschnitzelverbrennung aus submikronen Teilchen ([Hasler et al. 1997, Hasler et al. 1998, Gaegauf 2000, Oser et al 2000]). Die heute oft diskutierten PM10-Gehalte⁶ entsprechen daher annähernd den gemessenen Staubgehalten. Für die Verbrennungsversuche mit Pellets sind dazu auch im Anhang die mittels SMPS ermittelten Korngrößenverteilungen dargestellt.

Abbildung 9.2 zeigt eine visuelle Zusammenstellung der gemessenen Emissionsparameter. Darin ist ebenfalls erkennbar, dass bei der Verbrennung von Pellets mit hohem Abrieb (Versuch V6) oder beim Zusatz von Sägemehl (Versuch V9) höhere Emissionen beobachtet werden als bei den übrigen Pelletbrennstoffen.

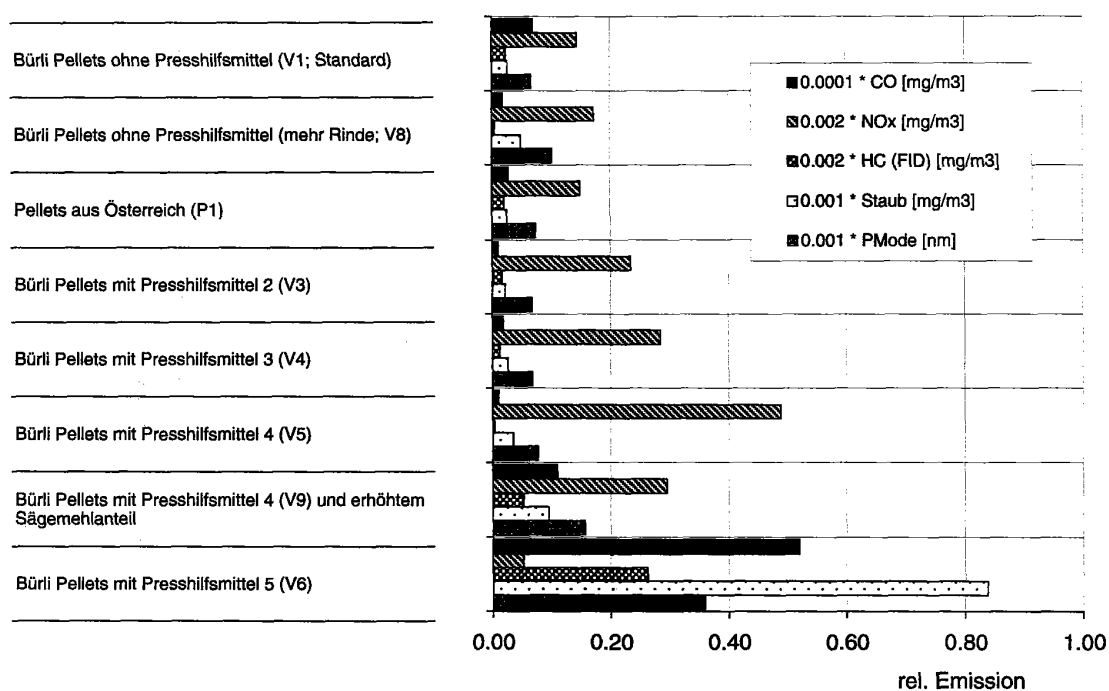


Abbildung 9.2: Relative Emissionswerte im Vollast-Betriebspunkt

Bemerkung: Bezugsgrößen für die Emissionsparameter analog Tabelle 9.1. Lesebeispiel: relative NO_x-Emission (V1) = 0.14 entspricht einer absoluten NO_x-Emission von 70 mg/m_n³ (=0.14/0.002) bei 13% O₂ gemäss Tabelle 9.1.

Aufgrund der sehr geringen Schwermetall- und Chlorgehalte in den Pellets (siehe Tabelle 7.3) sind nur unbedeutende Emissionen dieser Schadstoffe zu erwarten, die um mehrere Größenordnungen unter den entsprechenden Grenzwerten liegen.

⁶ PM10 = partikulärer Feststoff mit einem Teilchendurchmesser <10 µm. PM = Particulate Matter.

9.3 Emissionen im Teillast-Betriebspunkt

Im Gegensatz zu den Versuchen beim Vollast-Betriebspunkt liegen die Luftüberschusszahlen λ beim Teillast-Betriebspunkt immer über 2.0, so dass allfällig erhöhte Emissionen nur in geringem Ausmass vom Anlagenbetrieb beeinflusst sind. Die erzielte Brennstoffwärmeleistung variiert im Bereich zwischen rund 7 kW und 13 kW.

Von zwei Ausnahmen abgesehen unterscheiden sich die gemessenen Emissionsparameter beim Einsatz verschiedener Pelletbrennstoffe nur unwesentlich (Tabelle 9.2 und Abbildung 9.3).

Versuchsbezeichnung	Brennstoff-Verbrauch kg/h	Brennstoff- wärmeleistung kW	Luftüberschusszahl -	CO-Emission ¹⁾ mg/m ³	NO _x -Emission ¹⁾ mg/m ³	HC (FID) -Emission ²⁾ mg/m ³	SO ₂ -Emission ¹⁾ mg/m ³	Staub-Emission ¹⁾ mg/m ³	Anzahl-konzentration ¹⁾ 10 ¹³ /m ³	PM 0.6 ¹⁾ mg/m ³	Partikel mode nm
Bürli Pellets ohne Presshilfsmittel (V1; Standard)	2.02	9.5	2.42	100	80	0	3.3	25	3.07	25	70
Pellets aus Österreich (P1)	1.80	8.7	2.95	132	77	0	1.0	27	4.11	18	70
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 1 (V7)	2.01	9.5	3.15	71	109	1	128	39	4.38	47	68
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 1 (V7)	1.37	6.5	3.74	223	101	4	170	56	4.00	124	64
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 2 (V3)	2.09	9.9	2.92	83	119	2	n.b.	25	3.89	14	66
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 3 (V4)	2.19	10.3	2.59	86	148	3	n.b.	32	3.33	43	69
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 4 (V5)	1.96	9.3	2.90	158	269	0	n.b.	41	3.81	59	69
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 4 (V9) und erhöhtem Sägemehlanteil	2.65	12.5	2.09	237	179	3	n.b.	44	1.88	52	74

Tabelle 9.2: Zusammenstellung von Betriebs- und Emissionsmesswerten bei der Verbrennung von Holzpellets im Teillast-Betriebspunkt

Bemerkungen: NO_x als NO₂; PM 0.6 = Particulate Matter 0.6 μm ; SO₂-Messungen mittels nasschemischer Probenahme.

¹⁾ trockenes Abgas bei 1013 mbar, 0°C, 13% O₂ (Bezugsgrösse)

²⁾ feuchtes Abgas bei 1013 mbar, 0°C, 13% O₂ (Bezugsgrösse); als C (kalibriert mit C₃H₈)

Erhöhte Emissionen werden nur bei den Pellets mit den Presshilfsmitteln 1 und 4 beobachtet. Die Verwendung von Presshilfsmittel 1 führt zu erhöhten SO₂-Emissionen, während das Presshilfsmittel 4 erhöhte NO_x-Emissionen verursacht. Parallel zur nasschemischen SO₂-Probenahme beim Versuch V7 (mit 6.5 kW Wärmeleistung) wurde eine adsorptive Gasprobenahme mittels Dräger-Röhrchen durchgeführt. Die Messung der gasförmigen SO₂-Konzentration mittels Dräger-Röhrchen ergab einen SO₂-Gehalt im Abgas von lediglich 13 mg/m³ (bei 13% O₂; 6fach-Bestimmung, Zusammenstellung im Anhang 12.1) gegenüber von 170 mg/m³ nach der nasschemischen Methode⁷. Die Dräger-Messungen gelten in der Regel als zuverlässig.

⁷ Der vorsorgliche LRV-Grenzwert für SO₂ beträgt 250 mg/m³ und darf 2500 g/h nicht überschreiten.

Die nasschemische Methode⁸ erfasst die gasförmigen Schwefeloxid-Verbindungen (z.B. SO₂, SO₃, H₂SO₄) durch Absorption in einer wässrigen Lösung mit gleichzeitiger Oxidation mittels H₂O₂ zu Sulfaten. Partikuläre Verbindungen (z.B. Staub, aber auch partikuläre Sulfate wie CaSO₄, K₂SO₄) werden vor der Absorption in einem beheizten Glaswattefilter abgeschieden. Die Absorptionslösungen werden anschliessend auf ihren Gehalt an Sulfat analysiert. Die Umrechnung der Analysewerte erfolgt auf Gehalte als Schwefeldioxid. Eine vollständige Emission des Brennstoffschwefels (total 760 mg/kg atro) als SO₂ würde im Abgas zu einer SO₂-Konzentration von 140 mg/m³ führen. Eine vollständige Emission als SO₂ ist jedoch praktisch ausgeschlossen. Aufgrund von Literaturdaten ist mit einem Schwefelanteil von 13% bis maximal 40% im Abgas zu rechnen (siehe Anhang 12.2), was zu SO₂-Emissionen zwischen 18 mg/m³ bis max. 56 mg/m³ (bei 13% O₂) führen würde. Wegen der grossen Unterschiede der beiden SO₂-Bestimmungsmethoden ist der Wert an SO₂ unsicher.

Die Gesamtstaubgehalte und die Partikel modes liegen in demselben Bereich wie beim Vollast-Betriebspunkt.

Die Verteilung der relativen Emissionswerte ist beim Teillast-Betriebspunkt ebenfalls gleichmässiger als beim Vollast-Betriebspunkt (Vergleich Abbildung 9.2 mit Abbildung 9.3).

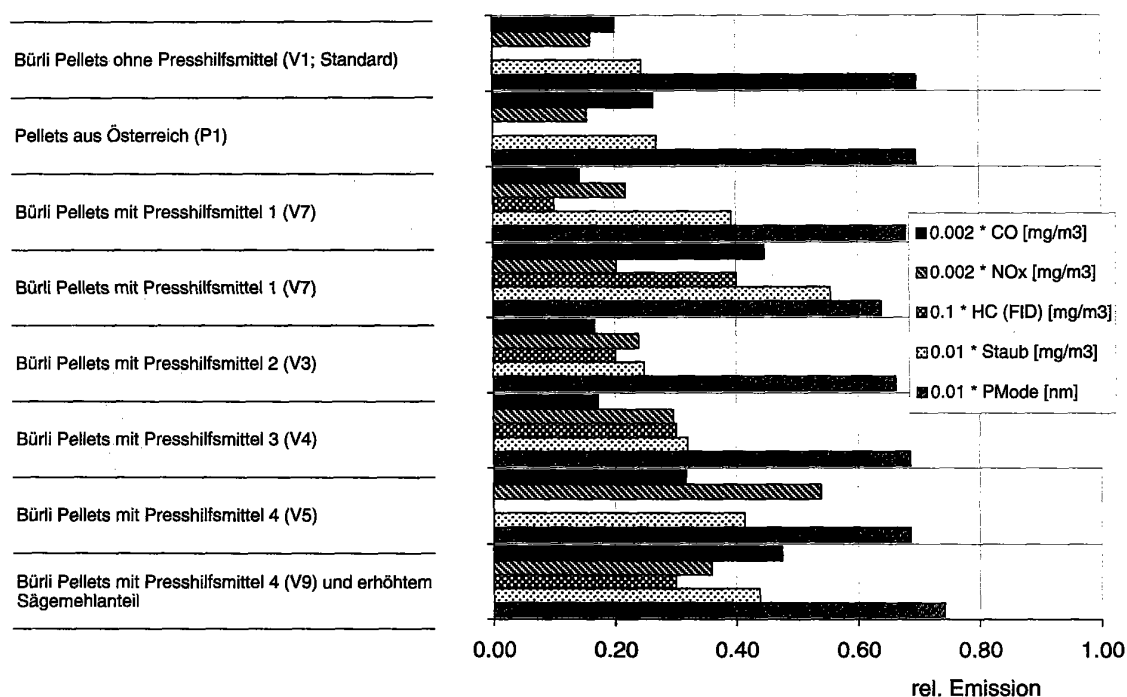


Abbildung 9.3: Relative Emissionswerte im Teillast-Betriebspunkt

Bemerkung: Bezugsgrössen für die Emissionsparameter analog Tabelle 9.2

Lesebeispiel: relative CO-Emission (V1) = 0.2 entspricht einer absoluten CO-Emission von 100 mg/m³ (=0.2/0.002) bei 13% O₂ gemäss Tabelle 9.2.

⁸ Die Durchführung der Messungen erfolgte gemäss den Empfehlungen des BUWAL's über die Emissionen von Luftfremdstoffen [BUWAL 1996].

9.4 Zusammensetzung der Aschen

Die bei der Verbrennung angefallenen Aschen wurden im Labor auf den Restkohlenstoffgehalt und das Ascheschmelzverhalten untersucht. Der Restkohlenstoffgehalt widerspiegelt die Ausbrandqualität, während das Ascheschmelzverhalten Hinweise auf die Verschlackungstendenz gibt. Die Bildung von Schlackeklumpen ist bereits beim Erreichen des Erweichungspunktes zu erwarten. Die Resultate sind in der Tabelle 9.3 zusammengestellt und Literaturwerten gegenübergestellt.

Die Restkohlenstoffgehalte (als TOC bestimmt) in den Aschen sind unerwartet hoch und bewegen sich mit Ausnahme derjenigen von den Pellets aus Kaffeehaurückständen im Bereich von 8 bis 19 Gew.-%. Die höchsten TOC-Gehalte zeigen die Pellets mit dem erhöhten Rindenanteil. Die hohen Restkohlenstoffgehalte werden auf die Eigenheiten des eingesetzten Feuerungsfabrikates zurückgeführt. In anderen Feuerungskonstruktionen werden deutlich tiefere Restkohlenstoffgehalte im Bereich von 1 Gew.-% erwartet. TOC-Gehalte >5 Gew.-% sind als nicht mehr zeitgemäss zu betrachten und durch Verbesserung des Ausbrands zu vermeiden. Der Restkohlenstoffgehalt in der Asche aus den Pellets aus Kaffeehaurückständen beträgt rund 2 Gew.-% und ist somit wesentlich tiefer als bei der Holzpelletverbrennung.

Die Ascheerweichungspunkte (EP) der im Rahmen dieses Projektes hergestellten Pellets bewegen sich im Bereich von 1160°C bis 1370°C. Der EP der Pellets aus Österreich ist höher und beträgt rund 1450°C. Der Vergleich mit Literaturwerten lässt vermuten, dass diese Pellets wahrscheinlich aus reinem Fichtenholz hergestellt sind, während die hier hergestellten Pellets aus einem Gemisch verschiedener Nadelhölzer bestehen.

Bei der Pelletverbrennung in der untersuchten Feuerung wurde bei den Pellets mit dem erhöhten Rindenanteil eine geringfügige Schlackebildung beobachtet, während bei allen übrigen Holzpellets keine verschlackten Aschen entstanden.

Unerwartet hohe Ascheschmelztemperaturen weist die Asche aus der Verbrennung von Pellets aus Kaffeehaurückständen auf. Dies erstaunt umso mehr, als bei der Verbrennung dieser Pellets eine deutliche Schlackebildung beobachtet wurde. Die bei der Verbrennung beobachtete Schlackenbildung ist mit hoher Sicherheit auf den Feuerungsbetrieb im Luftmangel zurückzuführen, da bei Luftmangel deutlich höhere Verbrennungstemperaturen möglich sind als bei hohem Luftüberschuss.

Brennstoffcharakterisierung	Verb.versuch	TOC [m-%]	Ascheschmelzverhalten		
			EP [°C]	HP [°C]	FP [°C]
Bürli Pellets ohne Hilfsstoffe (Standard)	V1	9.4	1260	1300	1340
Pellets aus Österreich	S2	13	1450	1460	1480
Bürli Pellets mit erhöhtem Rindenanteil (ohne Hilfsstoffe)	V8	19	1160	1180	1190
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 1	V7	10	1190	1240	1270
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 2	V3	10	1260	1310	1340
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 3	V4	8.4	1240	1270	1360
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 4	V5	7.9	1240	1290	1380
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 4. Mehr Sägemehl bei der Verbrennung.	V9	11	1160	1190	1210
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 5	V6	10	1370	1400	1420
Pellets aus Kaffeehaurückständen	S1	2.1	>1500	>1500	>1500
Fichte (Österreich)	Q1		1580	1630	1660
Fichte (Österreich)	Q1		1640	1700	>1700
Fichte (Österreich)	Q1		1410	>1700	>1700
Fichtenholz (mit Rinde)	Q2		1430	1600	1580
Mischprobe (Fichte / Buche; Österreich)	Q1		1260	1310	1340
Nadelholz-Rinde	Q2		1440	1460	1490
Mischprobe (Rinde; Österreich)	Q1		1320	1340	1410

Tabelle 9.3: Restkohlenstoffgehalte und Ascheschmelzverhalten nach DIN 53170 aus der Pelletverbrennung sowie Vergleich mit Literaturwerten

Bemerkungen: TOC = Total Organic Carbon; EP = Erweichungspunkt; HP = Halbkugelpunkt; FP = Fließpunkt; m-% = Masse-%; Literaturquellen: ^{Q1} [Schmidt et al. 1993], ^{Q2} [Hartmann et al. 2000]

10 Energie- und Ökobilanz

10.1 Energiebilanz

Um den Energieaufwand der Pelletherstellung zu beurteilen, wird der Fremdenergieverbrauch im Verhältnis zum Energieinhalt der produzierten Pellets betrachtet. Die Fremdenergie umfasst den Ölverbrauch für die Trocknerbeheizung sowie den Stromverbrauch für die Pelletierung und für den Betrieb des Trockners. Die weiter oben bestimmten Mittelwerte zum Energieverbrauch sind in Tabelle 10.1 zusammengefasst und Schätzwerten für trockeneres Rohmaterial gegenüber gestellt.

Der gesamte Stromverbrauch für die Pelletherstellung beträgt rund 1,5% bezogen auf den Heizwert der Pellets. Die Fremdenergie in Form von Heizöl für die Trocknung macht 12,8% aus, so dass der gesamte Fremdenergieanteil 14,4% beträgt. Dieser Wert gilt für die relativ hohe Feuchtigkeit des Ausgangsmaterials von 75%.

Bei Verwendung von Ausgangsmaterial mit einem Feuchtegehalt von 40% könnte die Trocknerleistung rund halbiert und der gesamte Fremdenergieverbrauch auf 8,2% vermindert werden. Bei Verwendung von trockenem Ausgangsmaterial mit $u < 13\%$ wäre keine Trocknung erforderlich. Nebst dem Wegfall des Ölverbrauchs würde der Stromverbrauch geringfügig verringert, so dass der gesamte Fremdenergieanteil dann noch rund 1,4% in Form von Strom betragen würde.

	Feuchtegehalt des Rohmaterials	Wassergehalt des Rohmaterials	Trocknerleistung	Gesamtstromverbrauch	Energieanteil Strom in Pellets	Energieanteil Öl in Pellets	Fremdenergieanteil in Pellets total
	% atro	% atro	MW	kW	%	%	%
Mittelwerte aller Versuche	75.7	43.1	2.1	253	1.5	12.8	14.4
Rohmaterial mittlerer Feuchte (Schätzung)	40.0	28.6	1.1	253	1.5	6.7	8.2
Rohmaterial trocken (Schätzung)	12.7	11.3	0.0	225	1.4	0.0	1.4

Tabelle 10.1: Energiebilanz der Pelletierung. Mittelwerte aller Versuche (Auszug von Tabelle 7.2) im Vergleich zu Schätzwerten für Rohmaterial mit mittlerer Feuchte sowie trockenem Rohmaterial, das keine Trocknung benötigt (Feuchte entsprechend dem Mittelwert nach Trockner).

10.2 Ökobilanz

Eine detaillierte Ökobilanz erfordert eine umfangreiche Analyse der Umweltbelastung über den ganzen Lebenszyklus der Pellets. Die Erhebung entsprechender Daten ist nicht Teil der vorliegenden Untersuchung. In der vorliegenden Studie wird eine Abschätzung der Ökobilanz für Holzpellets durchgeführt, die sich an die Ökobilanz der BUWAL-Studie Nr. 315 [BUWAL 2000] anlehnt, in welcher Heizöl, Gas und Holz für Heizzwecke verglichen werden. Für den Einfluss des Treibhauseffekts wird daraus die Standardvariante (mittlere Bedeutung des Treibhauseffekts) betrachtet. Aus der BUWAL-Studie wird die Methode der ökologischen Knappheit übernommen, bei der den einzelnen Emissionen Umweltbelastungspunkte (UBP) zugeordnet werden. In der Ökobilanz werden alle Prozessschritte vom Anbau von Holz bis zu den Emissionen bei der Verbrennung berücksichtigt. Durch Addition der UBPs über den gesamten Lebenszyklus errechnet sich das Total der UBPs, welches als Vergleichsbasis für verschiedene Prozessketten dient.

Die Ökobilanz basiert auf der Annahme, dass Pellets aus Sägemehl hergestellt werden, das aus der Holzverarbeitung in ausreichendem Mass zur Verfügung steht. Obwohl Sägemehl ein Abfallprodukt der Rundholzverarbeitung ist, wird die Umweltbelastung zur Bereitstellung von Sägemehl gleich wie bei Holzschnitzeln angenommen (worst case).

Im Vergleich zur Versorgung mit Holzschnitzeln werden bei Pellets die zusätzliche Umweltbelastung bei der Herstellung und die verminderten Emissionen bei der Verbrennung berücksichtigt. Um die Sensitivität der einzelnen Prozessschritte aufzuzeigen, werden dazu folgende Szenarien betrachtet:

Prozess-Schritt	Varianten
Sägemehltrocknung	<ul style="list-style-type: none">- ölbefuerter Trockner (Standard)- holzbefuerter Trockner (Variante)- Trockner mit Abwärmenutzung (Option)- Trockner mit Partikelfilter (Option)
Pelletverbrennung:	<ul style="list-style-type: none">- Emissionen gemäss Prüfstandsmessungen (Literaturwerte)- Emissionen gemäss eigenen Verbrennungsversuchen (Kapitel 9)- Emissionen wie Holzschnitzel (als Vergleich)

Zusätzlich zu den Daten der BUWAL-Studie 315 werden verschiedene pelletspezifische Daten benötigt, insbesondere die Emissionen bei der Pelletherstellung und -verbrennung sowie der Energieverbrauch zur Pelletherstellung. Die folgenden Tabellen fassen die zusätzlichen Daten zusammen. Alle für die Bilanzierung eingesetzten Emissionswerte (auch die Angaben für den Trockner) sind auf Nutzenergie bezogen, indem für die Pelletfeuerung ein Jahresnutzungsgrad berücksichtigt ist.

Allgemeine Parameter

- Pelletfeuchte	7,0	% atro
- Heizwert Pellet	16,9	MJ/kg
- Jahresnutzungsgrad der Pelletfeuerung	75	%

Emissionen bei der Pelletverbrennung

O₂-Bezugsgrösse 11 Vol-%

Variante 1 (Pellets auf Prüfstand)

CO	100	mg/Nm ³	70	kg/TJ
NMVOG	2	mg/Nm ³	1.41	kg/TJ
NO _x	140	mg/Nm ³	99	kg/TJ
Partikel PM10	50	mg/Nm ³	35	kg/TJ

Bemerkungen: - Typische Werte; Prüfberichte siehe <http://www.blb.bmlf.gic.at/>

Variante 2 (Pellets ohne Hilfsstoffe, eigene Messwerte, siehe Kapitel 9)

CO	343	mg/Nm ³	241	kg/TJ
NMVOG	6.0	mg/Nm ³	4.22	kg/TJ
NO _x	98	mg/Nm ³	69	kg/TJ
Partikel PM10	37.5	mg/Nm ³	26	kg/TJ

Bemerkungen: - Mittelwerte aus Versuch P1, Versuch P8 und Versuch S2 (je Voll-/Teillast)

Variante 3 (Holzschnitzel gemäss BUWAL [2000])

CO			1480	kg/TJ
NMVOG*			36	kg/TJ
NO _x			160	kg/TJ
Partikel PM10			109	kg/TJ

* Non Methan Volatile Organic Carbon (=gasförmige, flüchtige Kohlenwasserstoffe ohne Methan)

Bei der Pelletherstellung werden eine Reihe von möglichen Konzepten miteinander verglichen. Die hauptsächlichsten Zusatzemissionen sind dem Trocknungsprozess zuzuordnen. Die hierzu erforderlichen Daten stammen teilweise aus der untersuchten Pelletierungsanlage und beruhen teilweise auf Annahmen.

Emissionen bei der Sägemehltrocknung**Standardfall: ölbefuerter Direktrockner ohne Gewebefilter und Abwärmenutzung**

Abluftvolumenstrom	30'000	m ³ /h		
Pelletproduktion	3500	kg/h		
CO	50	mg/Nm ³	34	kg/TJ
NMVOG	200	mg/Nm ³	135	kg/TJ
Partikel PM10	50	mg/Nm ³	34	kg/TJ

Bemerkung: - NO_x wie Ölfeuerung.

Varianten: - Gewebefilter: 99% PM10-Reduktion, 0 % NMVOG-Reduktion.
 - Abwärmenutzung: 30% Brennstoffeinsparung, 50% NMVOG-Reduktion.
 - Emissionen bei holzbefueuertem Trockner wie bei ölbefueuertem.

10.3 Variantenvergleich

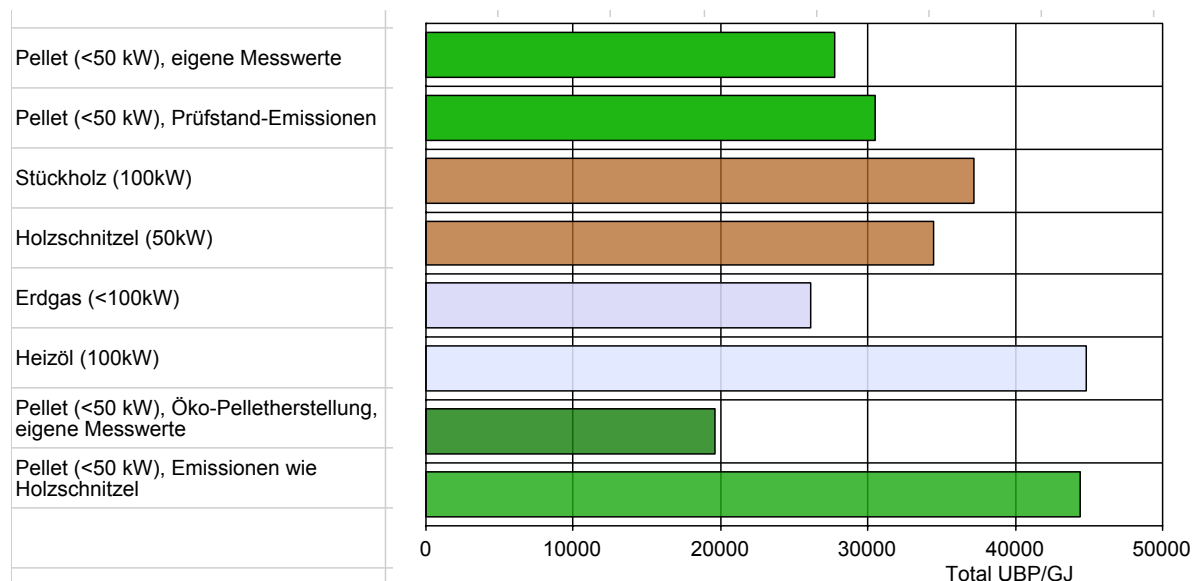


Abbildung 10.1: Total der UBP für Öl-, Gas-, Holz- und Holzpelletheizungen. Bei den Pellets wurde einmal mit den eigenen Messwerten und einmal mit den Prüfstands-Messungen gerechnet. Zur Beurteilung des ökologischen Verbesserungspotentials von Pellets wurden zusätzlich die UBP bei Verwendung eines holzbefeuerten Direktrockners mit Gewebefilter und Abwärmenutzung dargestellt (Öko-Pelletherstellung). Weiter ist der theoretische Fall, dass bei der Pelletverbrennung gleichviel Schadstoffemissionen entstehen wie bei der Holzschnitzelverbrennung angegeben.

Bemerkungen: UBP für Öl, Gas, Holzschnitzel und Stückholz gemäss [BUWAL 2000], UBP für Pelletheizungen nach eigenen Berechnungen (Rohsägemehlfeuchte beim Trocknereintritt $u = 84\%$; ölbefuertes Direktrockner ohne Abwärmenutzung und Gewebefilter, ausser bei der Öko-Pelletherstellung)

Der Vergleich zwischen den Energieträgern Heizöl, Gas und verschiedenen Holzbrennstoffen zeigt die Abbildung 10.1. Je geringer das Total der Umweltbelastungspunkte einer Verfahrensvariante ausfällt, umso ökologisch vorteilhafter ist die Variante. Die Ermittlung der Umweltbelastungspunkte für die Verbrennung von Holzpellets beruht auf vier Fallbeispielen, und zwar auf Emissionswerten gemäss den eigenen Messungen, gemäss Prüfstandsmessungen, unter der Annahme einer Öko-Pelletherstellung sowie unter der Annahme, dass die Pelletverbrennung zu vergleichbaren Emissionen führt wie diejenige von Holzschnitzeln. Die Pelletherstellung beruht jeweils auf einer Trocknungstechnologie nach heutigem Stand der Technik, d.h. insbesondere auf einem ölbefeuerten Direkt-Trockner ohne Abwärmenutzung und Gewebefilter.

Gemäss Abbildung 10.1 ist die Wärmeerzeugung mit Holzpellets ökologisch vorteilhafter als mit Holzschnitzeln oder Stückholz und auch als mit Heizöl. Der Vorteil gegenüber Holzschnitzeln ergibt sich aus den deutlich geringeren NO_x - und Staub-Emissionen bei der Pelletverbrennung. Wenn die Pelletverbrennung zu vergleichbaren Emissionen wie von Holzschnitzeln führen würde, wäre die Heizung mit Pellets ökologisch unvorteilhafter als mit Holzschnitzeln und auch als mit Heizöl.

Abbildung 10.2 zeigt die Verteilung von ausgewählten Emissionsfaktoren bei der Bereitstellung und Verbrennung von Holzpellets. In der Rubrik „Bereitstellung“ sind sämtliche Prozesse und Arbeitsschritte zur Erzeugung von Holzpellets enthalten, beginnend beim Holzanbau im Wald bis zum Transport der produzierten Pellets zum Endverbraucher.

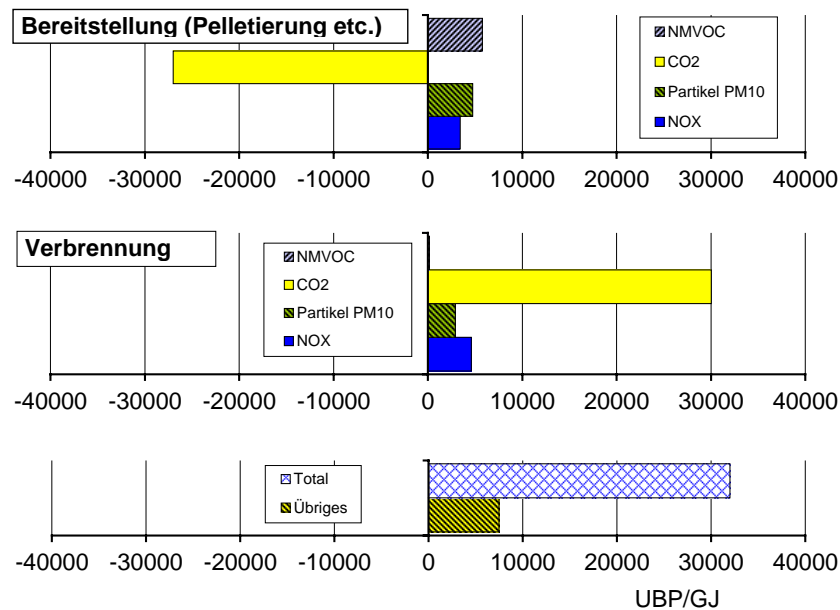


Abbildung 10.2: Zusammensetzung des Totals der Umweltbelastungspunkte für Holzpellets

Bemerkungen: Rohsägemehlfeuchte beim Trocknereintritt $u = 84\%$; Pelletrocknung erfolgt in einem state-of-the-art Trockner (ölbefeuert; ohne Abwärmenutzung und Gewebefilter); Emissionen bei der Pelletverbrennung gemäss den eigenen Messwerten (Variante 2); Unterstes Bild: Das Total entspricht der Summe der UDP's aus der Bereitstellung und Verbrennung, „Übriges“ enthält die Summe der UBPs aus den übrigen Parametern wie SO_2 , Abfälle und CH_4 .

Der CO_2 -Verbrauch durch das Biomassewachstum wird in der Bereitstellung mit einem positiven Beitrag zur Ökobilanz berücksichtigt (positiver Beitrag = negative Umweltbelastungspunkte), wie in der Studie [BUWAL 2000] ausgeführt ist.

Der Trocknungsprozess führt bei der Bereitstellung von Holzpellets zu einer zusätzlichen Umweltbelastung gegenüber Holzschnitzeln. Rund 80% der Umweltbelastung durch Partikel während der Bereitstellung stammen aus der Trocknung und rund 90% der Umweltbelastung durch Kohlenwasserstoffe. Bei der Beurteilung der Ökologie von Pellets als Energieträger ist die Pelletherstellung somit ein relevanter Prozessschritt und es besteht insbesondere bei der Trocknungstechnologie ein Verbesserungspotenzial.

Das Potenzial zur Minderung der Umweltbelastung durch technologische Massnahmen bei der Pelletherstellung zeigt die Tabelle 10.2. Die Ausschöpfung des gesamten Potenzials bei der Pelletherstellung vermindert die Umweltbelastung der Herstellung zwischen 24% und 27% (bzw. 8500 UBPs/GJ) gegenüber der Basissituation (Rohsägemehlfeuchte $u=84\%$). Die energetische Pelletnutzung würde dadurch auf eine ökologische Belastung sinken, die unter derjenigen von Erdgas liegt (Abbildung 10.1). Die Umsetzung dieses Potenzials würde allerdings beträchtliche Modifikationen erfordern, insbesondere einen holzbefeuerten Trockner mit Abwärmenutzung und Gewebefilter. Gegenüber dieser Maximalvariante kommt für die Praxis auch ein stufenweiser Ausbau in Frage.

Aufgrund der systembedingten Trägheit einer Holzfeuerung ist bei Einsatz eines holzbefeuerten Trockners ein Dauerbetrieb von grossem Vorteil. Die Zusatzinvestitionskosten für eine derartige

Prozessanpassung werden für ein Pelletwerk mit einer jährlichen Maximalkapazität von 20'000 Tonnen Pellets (6000 Vollbetriebsstunden) auf rund 2.7 Mio CHF veranschlagt.

Andererseits vermindert auch der Einsatz von etwas trockenerem Sägemehl ($u=40\%$ anstatt $u=84\%$ ⁹) die Umweltbelastung um 6 bis 8%.

Zudem kann die Pelletverbrennung in ungeeigneten Öfen oder bei schlechten Betriebsbedingungen zu einer deutlich höheren Umweltbelastung führen als die Pelletverbrennung unter guten Voraussetzungen. Erfolgt der Pelletabbrand unter Verbrennungsbedingungen, die mit denjenigen einer konventionellen Holzschnitzelfeuerung vergleichbarer Grösse üblich sind, nimmt die Umweltbelastung um 50% (bzw. 16200 UBP/GJ) zu (Vergleich mit Basissituation; s.a. Abbildung 10.1).

[UBP/MJ Nutzenergie]			u = 84%				u = 40%			
			Ohne AbWN		Mit AbWN		Ohne AbWN		Mit AbWN	
Trockner	Gewebefilter	PS	Eigene	PS	Eigene	PS	Eigene	PS	Eigene	
Bereitstellung	–	–	-24800	-24800	-24800	-24800	-24800	-24800	-24800	-24800
Herstellung	Öl	ohne	13100	13100	9400	9400	10800	10800	7800	7800
		mit	9400	9400	5700	5700	7100	7100	4100	4100
	Holz	ohne	12000	12000	8700	8700	10200	10200	7400	7400
		mit	8400	8400	5000	5000	6500	6500	3700	3700
Verbrennung	–	–	42200	39300	42200	39300	42200	39300	42200	39300
Total	Öl	ohne	30500	27600	26800	23900	28200	25300	25200	22300
		mit	26800	23900	23100	20200	24500	21600	21500	18600
	Holz	ohne	29400	26500	26100	23200	27600	24700	24800	21900
		mit	25800	22900	22400	19500	23900	21000	21100	18200

Tabelle 10.2: Durch den Energieträger Holzpellets generierte Umweltbelastungspunkte pro Nutzenergie, aufgeteilt nach Bereitstellung, Herstellung und Verbrennung. Es werden die Varianten unterschiedliche Sägemehlfuchte bei Trocknereintritt, Öl- oder Holz-befeuertem Direktrockner und Trocknung ohne oder mit Gewebefilter bzw. ohne oder mit Abgaswärmenutzung AbWN unterschieden. Die UBP/Nutzenergie bei der Pelletsverbrennung sind sowohl auf der Basis der Prüfstands-Messungen (PS) als auch auf der Basis der eigenen Messungen (eigene) bestimmt worden.

Bemerkungen: Die Variante mit ölbefeuertem Direktrockner ohne Gewebefilter und ohne Abwärmenutzung bei einer Sägemehlfuchte von 84% entspricht der aktuellen Situation während der vorliegenden Untersuchung (state-of-the-art Trocknung). Die übrigen Varianten zeigen das Verbesserungspotential auf.

⁹ Eine Rohsägemehlfuchte rund 40% wird als Fallbeispiel verwendet.

11 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Der erfolgreiche und umweltgerechte Einsatz von Holzpellets als Energieträger erfordert eine gut ausgebaut und funktionierende Pelletkette mit einer umfassenden Qualitätskontrolle. Bei den einzelnen Prozessschritten der Pelletkette sind folgende Faktoren zu beachten:

- Rohmaterialversorgung: Menge, Preis, Qualität¹⁰, Liefertermine
- Pelletherstellung: Pelletierungstechnologie, Pelletqualität, Emissionsminderung
- Pelletlagerung: Zwischenlagerung beim Produzenten
Endlagerung beim Verbraucher
- Pelletförderung: Befüllung von Transportfahrzeugen
Befüllung von Brennstoffsilos beim Endverbraucher
- Pelletverbrennung: Beschickung, Verbrennungstechnologie, Regelung

11.1 Rohmaterial

Schlussfolgerungen

- Bereits ein geringer Rindenanteil im Sägemehl führt zu einer deutlichen Verschlechterung der mechanischen Pelleteigenschaften.
- Die deutlich bessere mechanische Stabilität der untersuchten Pellets aus Österreich ist wahrscheinlich auf das verwendete Rohmaterial zurückzuführen (siehe Kapitel 9.4). Es ist anzunehmen, dass diese Pellets aus sortenreinem und rindenfreiem Fichtenholz hergestellt wurden, während die Pellets aus dem untersuchten Pelletwerk aus einem Gemisch verschiedener Nadelhölzer mit Rindenanteil bestehen.
- Dies weist darauf hin, dass die mechanische Qualität von Holzpellets zu einem hohen Anteil von der Rohmaterialqualität (z.B. Holzart, Rindenanteil) abhängig ist.

Empfehlungen

Aus der Literatur ist bekannt, dass Pilze zu einer Delignifizierung des Holzes führen können [Schindel 1998]. Die bekanntesten ligninabbauenden Pilze sind Weiss- und Braunfäulepilze. Eine dreiwöchige Exposition von Buchenholz mit Weissfäulepilzen führte im Labor zu einem Ligninabbau von rund 25% gegenüber dem Ausgangswert. Die Exposition mit den Weissfäulepilzen führt zudem zu einer drastischen Verminderung der Scherfestigkeit des Holzes. Den gezielten Ligninabbau versucht man sich heute etwa bei der Herstellung von Holzfaserverwerkstoffen zu Nutze zu machen.

Das Holz bzw. das daraus entstehende Sägemehl, welches im untersuchten Pelletwerk als Rohmaterial eingesetzt wird, wurde meist während nicht bekannter Dauer (Tage bis Wochen) im Freien gelagert, so dass eine ligninabbauende Pilzinfektion nicht auszuschliessen ist. Durch Verwendung von geeigneten Presshilfsmitteln könnte z.B. ein durch Fäulnis verminderter Ligningehalt ausge-

¹⁰ Es wird in jedem Falle davon ausgegangen, dass nur naturbelassenes Rohmaterial zum Einsatz gelangt.

glichen werden. Daneben kann auch durch Optimierung der Versorgung und Lagerung angestrebt werden, dass Fäulnis sicher vermieden wird.

Hohe Qualitätsanforderungen für das Rohmaterial (z.B. sortenreine und rindenfreie Holzsägespäne aus frischem Fichtenholz) führen allerdings zu erhöhten Beschaffungskosten, einem reduzierten Marktangebot und ungünstigen Lieferbedingungen (z.B. längere Transportdistanzen, evtl. saisonale Zwischenlager). Wünschenswert und sinnvoll ist jedoch eine möglichst vollständige Nutzung des in der Schweiz anfallenden Sägemehls von rund 180'000 Jahrestonnen als Rohstoff für die Pelletherstellung. Da der einheimische Pelletmarkt aber in naher Zukunft durch importierte Pellets Konkurrenz erhalten wird, ist für die Ökobilanz von Holzpellets zu beachten, dass die Energie- und Umweltbilanz durch lange Transportwege (z.B. Import aus Kanada oder Osteuropa) deutlich schlechter ausfallen kann als für Pellets aus regionaler Produktion. Bei einer gesamtheitlichen Betrachtung sind deshalb die langen Transportwege gegen den Einsatz von Presshilfsmitteln abzuwägen, sofern diese die Nutzung eines grösseren Anteils von regional anfallendem Rohmaterial ermöglichen.

11.2 Pelletherstellung

Schlussfolgerungen

- Die mechanischen Pelleteigenschaften lassen sich bei gegebener Verfahrenstechnologie durch Variation der Betriebsparameter (z.B. Körnigkeit des Sägemehls) nur geringfügig verbessern.
- Der Stromverbrauch im untersuchten Pelletwerk ist deutlich geringer als in einem schwedischen Werk.
- Der Fremdenergieverbrauch zur Sägemehltrocknung wird in erster Linie durch den Feuchtegehalt des Rohmaterials bestimmt. Sofern trockeneres Rohmaterial zur Verfügung steht, fällt die Energie- und Umweltbilanz für die Pellets deutlich besser aus.
- Trotz beträchtlichen Kohlenwasserstoff- und Staub-Emissionen des direktbefeuerten Trockners und der vollumfänglichen Umweltbelastung zur Bereitstellung des Sägemehls wie bei Holzschnitzel (worst case) schneiden Holzpellets in der Ökobilanz besser ab als Holzschnitzel und Stückholz und Erdöl. Der Vorteil gegenüber Holzschnitzel ist eine Folge der deutlich geringeren Emissionen von NO_x und PM10 bei der Verbrennung.
- Unter Ausnutzung des Verbesserungspotenzials bei der Sägemehltrocknung durch Gewebefilter, Abwärmenutzung und holzbefeuerten Trockner könnte die Umweltbelastung von Holzpellets noch um rund 30% verringert werden und wäre damit geringer als diejenige von Erdgas.

Empfehlungen

Im Bereich der Pelletproduktion sind vor allem Verbesserungen in der mechanischen Pelletstabilität anzustreben. Hierbei sind auch sinnvolle Qualitätsstandards zu definieren.

Der Einsatz von innovativen Verfahrenskonzepten bei der Pelletherstellung ermöglicht ökologische und teilweise auch ökonomische Verbesserungen bezüglich Emissionsminderung und Fremdenergieverbrauch. Eine Minderung der Emissionen und des Fremdenergieverbrauchs ist z.B. durch Optimierung des Trocknungsprozesses möglich, entweder durch Beschaffung von trocknerem Rohmaterial oder durch Wahl einer geeigneten Vortrocknung. Bei trocknerem Rohmaterial erfordert der direktbefeuerte Trockner eine geringere Wärmeleistung bei tieferen Kontakttemperaturen. Dadurch sinkt einerseits der Fremdenergiebedarf (30% Minderung sind realistisch), aber auch die uner-

wünschten Emissionen von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (VOC). Die VOC-Emissionen liessen sich vermutlich um mehr als 50% vermindern. In der bisherigen Verfahrensvariante verursachen die VOC-Emissionen rund 5'200 UBP von insgesamt 32'000 UBP.

Als Zukunftsvision sind in der Schweiz Pelletwerke anzustreben, die nach ökologischen Kriterien geplant und betrieben werden und Pellets zu wirtschaftlich konkurrenzfähigen Preisen anbieten. Bei einer ganzheitlichen Betrachtungsweise kann dazu möglicherweise auch der Einsatz von Presshilfsmitteln, die nicht normenkonform sind oder in einer nicht normenkonformen Dosierung eingesetzt werden, von Vorteil sein.

11.3 Presshilfsmittel

Schlussfolgerungen

- Die verwendeten Presshilfsmittel führen in den eingesetzten Zuschlagsmengen von rund 1 Gew.-% weder zu einer Reduktion des Energieverbrauchs in der Pelletierungspresse noch zu einer Erhöhung der Pelletproduktionsleistung.
- Die mechanischen Eigenschaften (Abrieb) können durch den Einsatz von Presshilfsmitteln sowohl verbessert als auch verschlechtert werden.
- Die mit Abstand besten Ergebnisse bezüglich mechanischer Stabilität wurden mit einem Presshilfsmittel aus der sekundären Biomasseverarbeitung erzielt.
- Die möglichst hohe Nutzung des Potenzials an naturbelassenem Sägemehl erfordert einen von den Brennstoffeigenschaften (z.B. Holzart; Rindenanteil) unabhängigen Pelletierungsprozess. Dazu kann der Zusatz von geeigneten Presshilfsmitteln vorteilhaft sein.

Empfehlungen

Das mit grossem Erfolg eingesetzte Presshilfsmittel 1 hat folgende Vor- und Nachteile:

Vorteile

- Das Presshilfsmittel besteht zu >90% aus natürlichen Bestandteilen
- Es wird in der Tierfutterwürfelherstellung seit Jahren in grossen Mengen eingesetzt
- Bereits bei geringer Zuschlagsmenge (1 Gew.-%) wird eine deutliche Erhöhung der Pelletabriebfestigkeit erzielt
- Geringe Betriebskosten
- Erlaubt hohe Flexibilität bezüglich Sägemehleigenschaften (Rindenanteil; Holzart), dadurch Kostenersparnis
- Presshilfsmittelzuschlag ermöglicht Verzicht auf Dampfzugabe während der Pelletierung (dadurch Reduktion der Trocknerleistung und Betriebskostensparnis)

Nachteile

- Nicht konform gemäss DIN und SN, da in diesen Normen keine Zusätze erlaubt sind
- Nicht ÖNORM-konform, da Presshilfsmittel chemisch verändert ist
- Vermutlich erhöhte SO₂-Emissionen bei der Verbrennung¹¹

¹¹ Wegen widersprüchlicher Messresultate ist eine Verifizierung (Wiederholung; versch. Betriebszustände und Zuschlagsmengen) und breitere Abstützung (Vergleich mehrerer Bestimmungsmethoden) der SO₂-Werte erforderlich. In zukünftigen Ökobilanzen sollte zudem die Umweltbelastung von SO₂ als variabler Parameter einfließen.

Nebst dem Presshilfsmittel 1 gibt es jedoch auch chemisch nicht veränderte Presshilfsmittel aus der primären Landwirtschaft, die den gewünschten Effekt einer hohen Abriebfestigkeit erzielen. Allerdings sind die erforderlichen Dosierungen und Betriebskosten höher.

Wie bereits unter dem Aspekt „Rohmaterial“ erwähnt, erfordert eine abschliessende Beurteilung eine Gesamtbetrachtung der Prozesskette. Eine möglichst vollständige Nutzung des jährlichen einheimischen Sägemehlanfalls erfordert eine hohe Anlagenflexibilität in Bezug auf die Rohmaterialeigenschaften. Bei der zunehmenden Konkurrenzierung durch ausländische Produkte sind die langen Transportwege gegen den Einsatz bzw. die Umweltauswirkungen von Presshilfsmitteln in der Ökobilanz abzuwägen.

11.4 Pelletlagerung

Schlussfolgerungen

- Die Holzpellets nehmen bei der Lagerung in Papiersäcken deutlich Feuchtigkeit auf. Nach rund 2 Monaten Sacklagerung steigt der mittlere Feuchtegehalt von ursprünglich 6.5% auf 10.1%.
- Eine offene Lagerung von Pellets in einem Kellerklima führt bereits nach knapp 30 Tagen zu einer Sättigungsfeuchte in den Pellets von rund 11.5%.
- Die Feuchtigkeitszunahme durch die Lagerung führt zu einer Verschlechterung der mechanischen Pelleteigenschaften.
- Das Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten ist für alle untersuchten Pellets (versch. Hersteller und Presshilfsmittel) identisch.

Empfehlungen

Die Feuchtigkeitsaufnahme von Holzpellets bei der Sacklagerung lässt sich durch Verwendung von Säcken aus Polyethylen (PE) oder von plastifizierten Papiersäcken deutlich reduzieren. Bei der Verwendung von reinen Kunststoffsäcken sind bei einigen Kunden Akzeptanzprobleme zu erwarten, die teilweise durch Aufklärung und Information verringert werden könnten.

Die Feuchtigkeitsaufnahme bei der offenen Lagerung beim Endverbraucher im Silo lässt sich nur durch bauliche Massnahmen minimieren. Hierzu ist eine Schulung und Information von Planern und Bauherren erforderlich. Die nicht zu vermeidende Restfeuchtigkeitsaufnahme der Pellets muss entweder durch höhere Abriebfestigkeit der originalen Pellets oder durch Einsatz geeigneter Beschickungs- und Feuerungstechnologien kompensiert werden.

11.5 Pelletförderung

Die Pelletförderung durch mechanischen oder pneumatischen Transport kann zu beträchtlichen Staubemissionen bei der Befüllung des Pelletsilos und zu Betriebsstörungen bei der Pelletfeuerung führen. Pellets mit geringerer mechanischer Festigkeit verstärken diese Effekte. Der Einfluss der Pelletförderung wurde im Rahmen dieses Projektes nicht untersucht.

11.6 Pelletverbrennung

Schlussfolgerungen

- Mit einer Ausnahme in Bezug auf Stickstoff führen die verwendeten Presshilfsmittel in der verwendeten Zuschlagsmenge zu keiner Grenzwert-Überschreitung von Inhaltsstoffen gemäss DIN 51731.
- Es konnte auch keine Veränderung des Ascheschmelzverhaltens beobachtet werden.
- Pellets mit erhöhtem Abrieb führen in der untersuchten Feuerung bei Vollast infolge Luftmangel zu hohen Emissionen an CO, Kohlenwasserstoffen und Staub. Die erhöhten Emissionen könnten durch eine geeignete Verbrennungsregelung vermieden werden.
- Die verwendeten Presshilfsmittel führen mit Ausnahme von einem Fall bezüglich NO_x und einem eventuellen Fall bezüglich SO₂ nicht zu einer Erhöhung der Emissionen. Die erhöhten NO_x-Emissionen liegen unter den LRV-Grenzwerten.
- Die Emissionen von CO, NO_x, Kohlenwasserstoffen und PM10 sind bei ausreichendem Luftüberschuss ($\lambda > 2$) tief. Die NO_x- und PM10-Emissionen sind deutlich geringer als bei der Verbrennung von Holzschnitzeln.
- Die Ökobilanz zeigt, dass Holzpellets gegenüber Stückholz oder Holzschnitzeln ökologisch vorteilhafter sind. Das bessere Abschneiden ist vor allem auf die verminderten Emissionen bei der Pelletverbrennung zurückzuführen. Erhöhte Emissionen durch mangelhaften Feuerungsbetrieb sollte daher vermieden werden durch den Einsatz einer leistungsfähigen Regelung.

Empfehlungen

Eine Förderung der energetischen Nutzung von Holzpellets ist ökologisch sinnvoll, sofern eine hohe Verbrennungsqualität bei variablen Pelleteigenschaften sichergestellt wird. Obwohl Pellets im Vergleich zu Holzschnitzeln relativ konstante Brennstoffeigenschaften aufweisen, kann bereits der Einsatz von Pellets innerhalb der zulässigen Schwankungsbreite zu deutlich erhöhten Emissionen führen. Allfällige Fördermassnahmen sollten deshalb auch den vermehrten Einsatz von Pellet-Feuerungen anstreben, die auch bei Betrieb mit unterschiedlichen Pelleteigenschaften einen emissionsarmen Betrieb gewährleisten. Dazu wird insbesondere auch der Einsatz einer Verbrennungsregelung als notwendig erachtet. Das Verhalten von Pelletfeuerungen könnte dazu z.B. durch Feldmessungen mit verschiedenen Feuerungsfabrikaten im Praxisbetrieb mit definierten Pelletqualitäten untersucht werden.

11.7 Fazit und Ausblick

Die Nutzung von Holzpellets kann eine ökologisch sinnvolle Variante sein zur Substitution fossiler Brennstoffe. Für einen ökologischen Vergleich von Pellets mit Holzschnitteln oder Heizöl müssen der Aufwand für den Transport sowie für die Pelletherstellung berücksichtigt werden. Aus ökologischen Gründen ist in erster Linie die Verwertung von regional verfügbaren Nebenprodukten der Holzverarbeitung als Rohmaterial für die Pelletherstellung anzustreben.

Bei der Herstellung ist zu beachten, dass vor allem die bei feuchtem Rohmaterial erforderliche Trocknung zu einer relevanten Umweltbelastung beiträgt. Da die Pelletverbrennung im Vergleich zu Holzschnitteln zu geringeren Emissionen führt, fällt die Ökobilanz insgesamt jedoch immer noch besser aus als für Holzschnittel. Allerdings sollte sichergestellt werden, dass auch in der Praxis tiefe Emissionswerte eingehalten werden, wozu der Einsatz einer Verbrennungsregelung empfohlen wird.

Nebst Sicherstellung eines guten Anlagenbetriebs kann die Ökobilanz weiter verbessert werden, indem die Emissionen und der Energieaufwand der Pelletherstellung vermindert werden. Dies ist derzeit weder im Vergleich zu Holzschnitteln noch zur Einhaltung der geltenden Grenzwerte erforderlich. Mittelfristig ist jedoch davon auszugehen, dass bei Holzschnittelfeuerungen und allenfalls auch bei Trockneranlagen eine Verminderung der Feinstaubemissionen erforderlich wird. Für beide Brennstoffketten würde dies die Kosten spürbar erhöhen aber gleichzeitig auch die Umweltbelastung weiter vermindern.

Durch die Verwendung verschiedener Presshilfsmittel aus primären landwirtschaftlichen Biomassen konnten in der vorliegenden Untersuchung keine relevanten Verbesserungen erzielt werden. Dagegen hat die Verwendung eines Nebenprodukts der sekundären Holzverarbeitung eine deutliche Verbesserung der Pelleteigenschaften bewirkt. Dieses Presshilfsmittel ist derzeit selbst nach ÖNORM nicht zulässig, nach DIN und SN sind Presshilfsmittel sogar grundsätzlich ausgeschlossen. Für eine gesamtheitliche Bewertung der Pelletkette ist zu beachten, dass der Einsatz von Presshilfsmitteln allenfalls vorteilhaft sein, sofern dadurch die Nutzung von regional anfallendem Rohmaterial ermöglicht wird, das sonst nicht verwertet werden kann. Dies kann auch für nicht ÖNORM-konforme Presshilfsmittel oder in dafür unzulässiger Dosierung gelten.

12 Anhang

12.1 Messprotokoll der SO₂-Messung (Dräger-Röhrchen)

Während der Pelletverbrennung aus dem Versuch V7 wurden parallel zur nasschemischen SO₂-Probenahme eine diskontinuierliche SO₂-Messung mittels Dräger-Röhrchen durchgeführt (Originalprodukte der Firma Dräger). Der Gehalt an gasförmigen SO₂ mittels Dräger-Röhrchen wurde dabei in gleichmässigen Zeitabständen insgesamt 6 Mal bestimmt. Die Dauer einer Einzelmessung beträgt rund 1-2 Minuten.

SO₂-Messung mittels Dräger-Röhrchen

Examinator: Ph. Hasler

Datum: 7.8.2001

Anlage: Pelletino (Standort Klus, Ökozentrum)

Brennstoff: Bürli Pellets V7 (Presshilfsmittel 1)

Umgebungsdruck: 962 mbar

Umgebungstemperatur: 20 °C

Unterdruck im Abgas: 0 mbar

Zeit hh:mm	Verbindung	Probenahmestelle	Hübe Soll	Hübe Ist	Konzentration (ohne O ₂ -Bezug)	
					ppm	mg/Nm ³
14:44	SO ₂ 20...200 ppm	Abgas im Kamin	10	10	< 5	< 14
14:53	SO ₂ 20...200 ppm	Abgas im Kamin	10	25	12	13
14:58	SO ₂ 20...200 ppm	Abgas im Kamin	10	25	12	13
15:05	SO ₂ 20...200 ppm	Abgas im Kamin	10	25	5	6
15:12	SO ₂ 20...200 ppm	Abgas im Kamin	10	25	10	11
15:18	SO ₂ 20...200 ppm	Abgas im Kamin	10	25	5	6

Bemerkungen: - Parallele nasschemische SO₂-Messung von Ökozentrum (14:48 - 15:18)

Die Dräger-Messungen ergeben Gehalte an gasförmigem SO₂ zwischen 6–13 mg/m_n³ (ohne O₂-Bezug) mit einem Mittelwert von 10 mg/m_n³. Der über die Versuchsdauer gemittelte O₂-Gehalt beträgt 14.8 Vol.-%, was einen mittleren SO₂-Messwert von 13 mg/m_n³ (bei 13% O₂) ergibt.

12.2 Transferkoeffizient von Schwefel in das Abgas

Bei der Verbrennung der Pellets mit dem Presshilfsstoff 1 wurden die SO₂-Emissionen mit zwei verschiedenen Messverfahren ermittelt. Die Ergebnisse der beiden Verfahren differierten um mehr als eine Grössenordnung (siehe Tabelle 9.2). Die Bewertung der beiden Messergebnisse erfolgt anhand von Literaturdaten, aus welchen das Verhalten von Schwefel bei der Verbrennung abgeleitet wird. Die Literaturwerte und die daraus abgeleiteten Transferkoeffizienten (Massenanteil SO₂ im Abgas im Verhältnis zum Schwefelgehalt im Brennstoff) sind in der Tabelle 12.1 zusammengestellt. Der mittlere Transferkoeffizient von Schwefel beträgt bei der Verbrennung von landwirtschaftlichen Brennstoffen auf einer Rostfeuerung rund 40%, bei der Verbrennung von Altholz in einer ZWS etwa 13%.

Brennstoff	Feuerung	Schwefel in Brennstoff mg/kg	SO ₂ im Abgas		Transfer- koeffizient %
			theoretisch mg/m _n ³	gemessen mg/m _n ³	
Winterweizen gelb	Rost	2150	498	177	36
Winterweizen grau	Rost	1640	382	140	37
Haferstroh	Rost	1730	399	178	45
Feldgras	Rost	2090	490	188	38
Triticale	Rost	2070	468	188	40
Altholz	ZWS	1690		50	13

Tabelle 12.1: Schwefelgehalte von Biobrennstoffen, SO₂-Emissionen in das Abgas und Transferkoeffizienten.

Bemerkungen: 11 Vol.-% O₂ als Bezugsgrösse für SO₂-Emissionen im Abgas; ZWS = zirkulierende Wirbelschicht; Transferkoeffizienten als Massenanteil des Brennstoffschwefels im Abgas; Literaturquellen (S in Brennstoff und gemessene SO₂-Emissionen): [Vetter et al. 1995], [Weber et al. 1995], [Hasler et al 1993].

Bei den landwirtschaftlichen Brennstoffen ist der Schwefel in organischer Form in Proteinen gebunden, beim Altholz liegt der Schwefel vor allem in anorganischer Form als Sulfat vor (z.B. Gips-, Beton- oder Farbreste). Beim verwendeten Presshilfsmittel liegt der Schwefel als anorganisches Sulfonat vor (HSO₃⁻).

Trotz der unterschiedlichen Anlagentechnologie bei der in Tabelle 12.1 aufgeführten Transferkoeffizienten ist davon auszugehen, dass der deutlich tiefere Wert bei der Altholzverbrennung hauptsächlich auf die chemische Bindungsform des Schwefels im Brennstoff zurückzuführen ist und nicht auf die Verbrennungstechnologie. Bei der Verbrennung von Pellets mit Zusatz von Presshilfsstoff 1 sind daher eher Transferkoeffizienten von 13% als von 40% zu erwarten.

12.3 Korngrößenverteilung mit SMPS-Messungen

Auf den nachfolgenden Seiten sind die Korngrößenverteilungen der Staubemissionen abgebildet. Auf jeder Seite ist je ein Brennstoff ausgewertet, in den meisten Fällen in einem Betriebspunkt bei Vollast und bei Teillast. Die SMPS-Messungen wurden vom Ökozentrum Langenbruck durchgeführt.

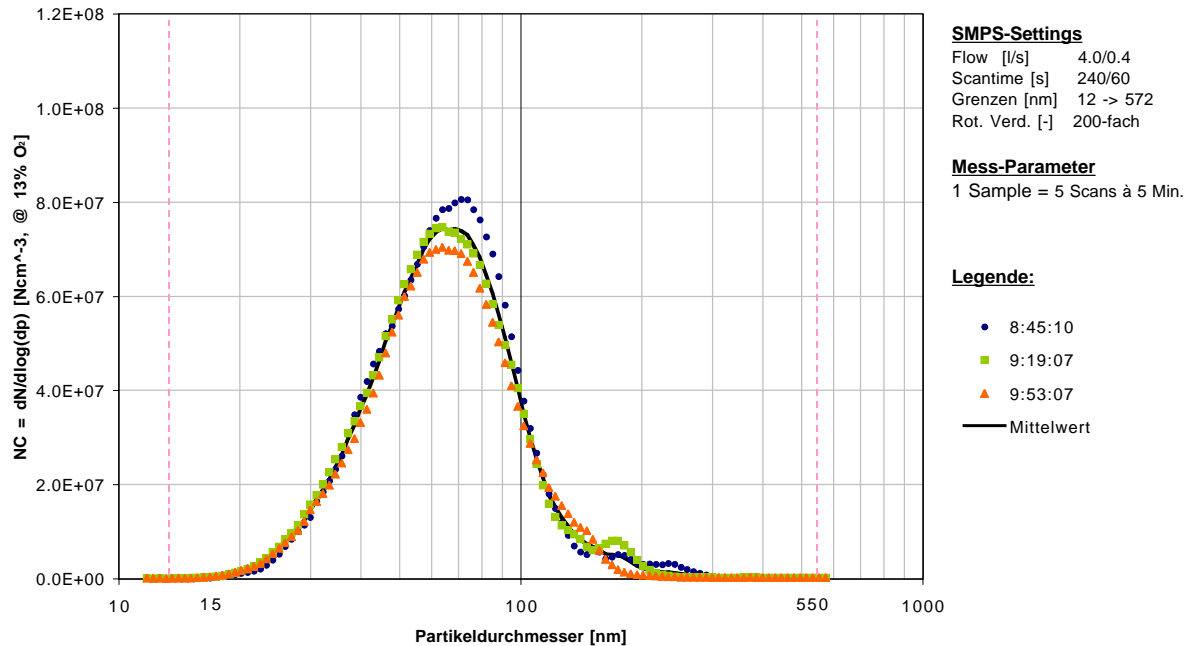
Bürli Pellets ohne Presshilfsmittel (V1), Vollast, Partikel-Anzahlverteilung

Datum: 9.8.01

Anlage: Std

Code: 1 hi

Power: 14.6 kW



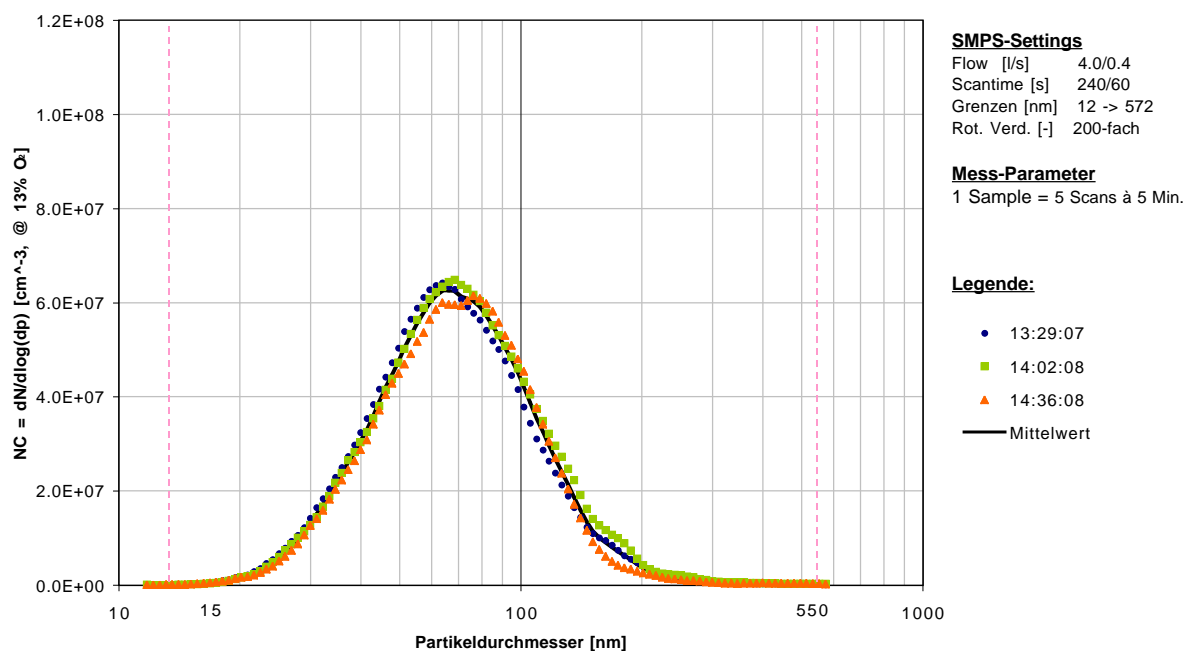
Bürli Pellets ohne Presshilfsmittel (V1), Teillast, Partikel-Anzahlverteilung

Datum: 9.8.01

Anlage: Std

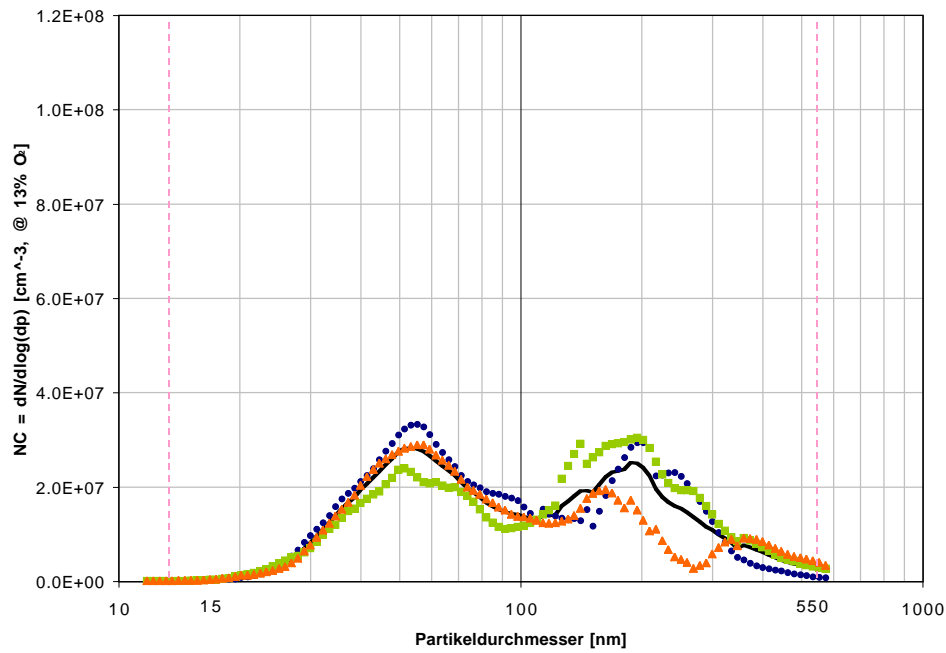
Code: 1 lo

Power: 9.5 kW



Bürli Pellets ohne Presshilfsmittel mit Rinde (V8), Vollast, Partikel-Anzahlverteilung

Datum: 16.8.01 Anlage: Std Code: 8 vl Power: 12.0 kW



SMPS-Settings
 Flow [l/s] 4.0/0.4
 Scantime [s] 240/60
 Grenzen [nm] 12 -> 572
 Rot. Verd. [-] 200-fach

Mess-Parameter
 1 Sample = 5 Scans à 5 Min.

Legende:

- 10:00:07
- 10:32:08
- ▲ 11:05:11
- Mittelwert

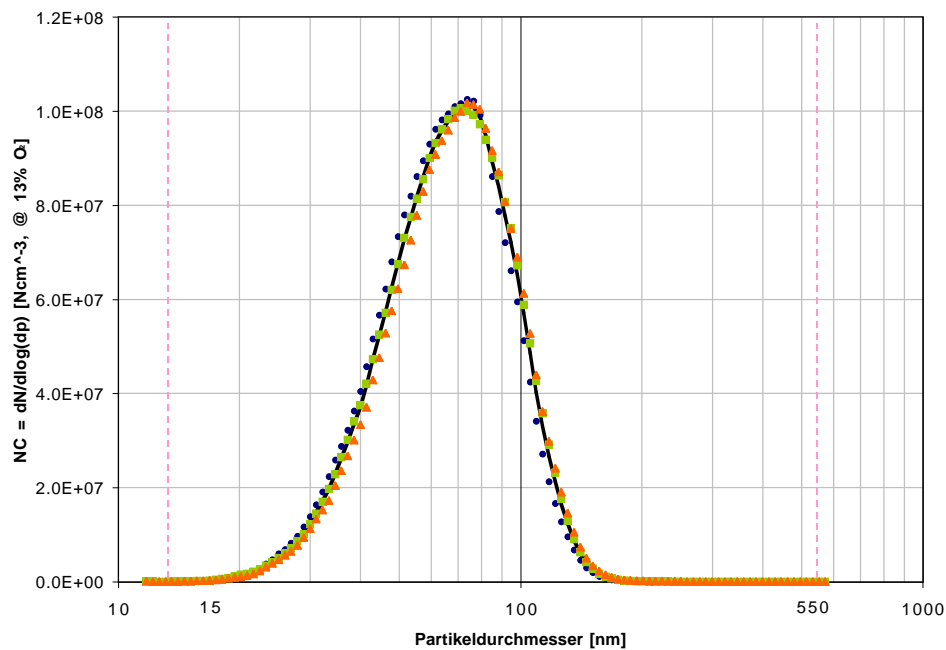
Pellets aus Österreich (P1), Vollast, Partikel-Anzahlverteilung

Datum: 10.8.01

Anlage: Std

Code: Sp 2 hi

Power: 13.0 kW



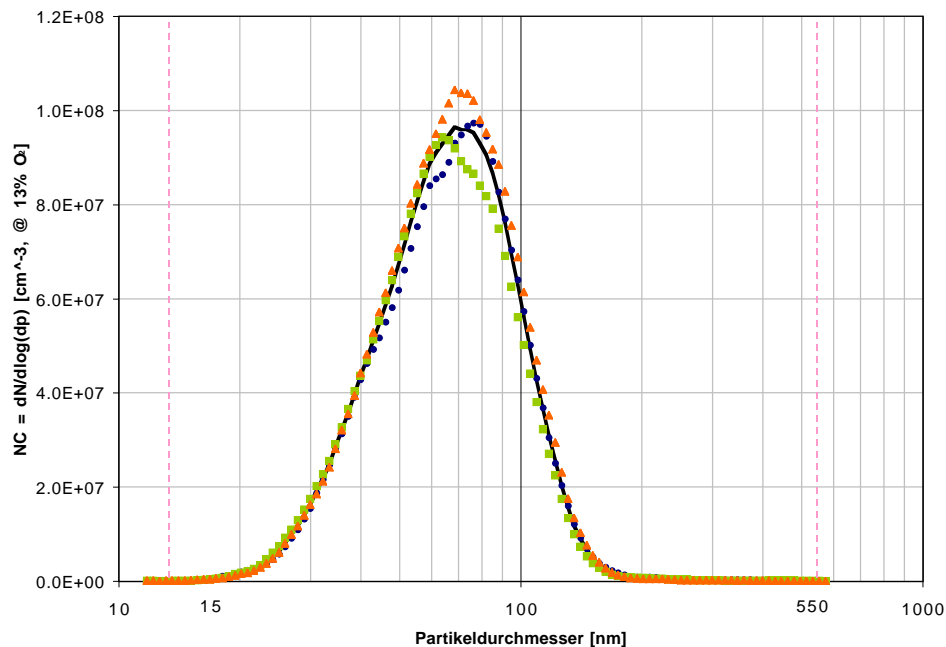
Pellets aus Österreich (P1), Teillast, Partikel-Anzahlverteilung

Datum: 10.8.01

Anlage: Std

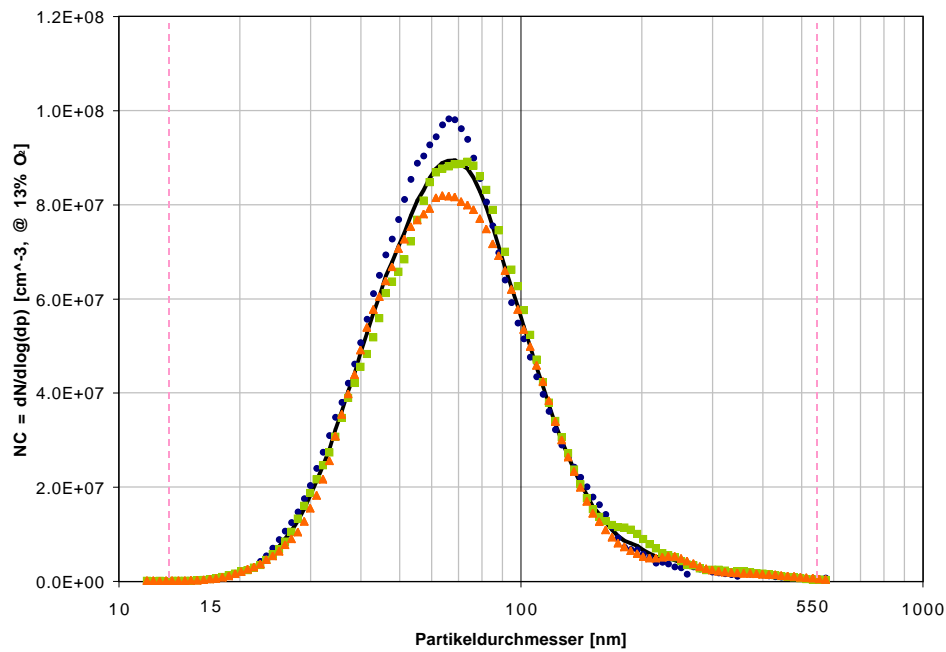
Code: Sp.2 lo

Power: 8.7 kW



Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 1 (V7), Teillast, Partikel-Anzahlverteilung

Datum: 7.8.01 Anlage: Std Code: 7 hi Power: 9.5 kW



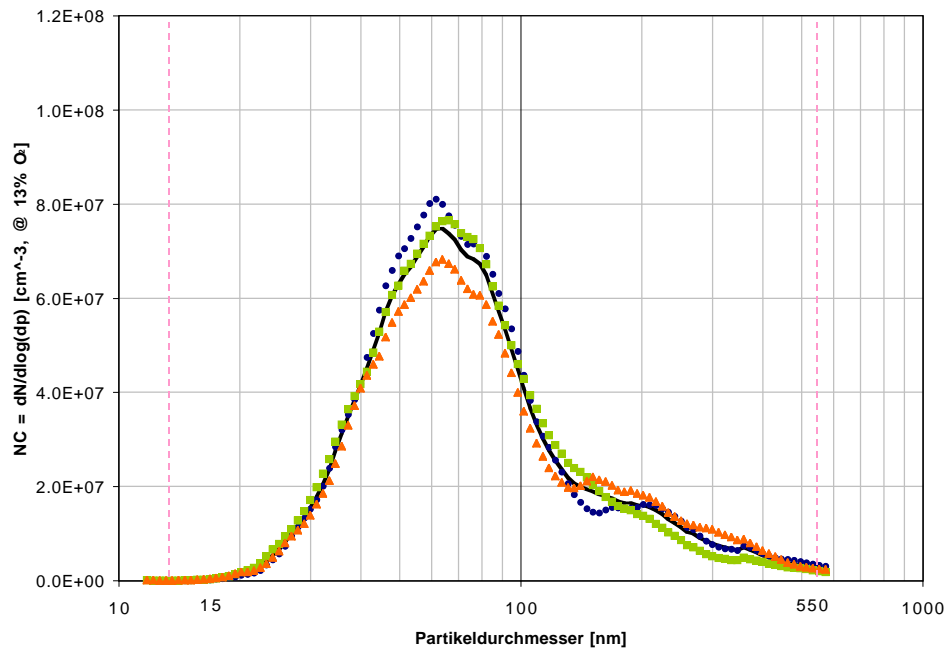
SMPS-Settings
 Flow [l/s] 4.0/0.4
 Scantime [s] 240/60
 Grenzen [nm] 12 -> 572
 Rot. Verd. [-] 200-fach

Mess-Parameter
 1 Sample = 5 Scans à 5 Min.

Legende:
 • 11:25:23
 ■ 12:00:32
 ▲ 12:33:30
 — Mittelwert

Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 1 (V7), Teillast tief, Partikel-Anzahlverteilung

Datum: 7.8.01 Anlage: Std Code: 7 lo Power: 6.5 kW



SMPS-Settings
 Flow [l/s] 4.0/0.4
 Scantime [s] 240/60
 Grenzen [nm] 12 -> 572
 Rot. Verd. [-] 200-fach

Mess-Parameter
 1 Sample = 5 Scans à 5 Min.

Legende:
 • 14:40:08
 ■ 15:18:09
 ▲ 15:52:07
 — Mittelwert

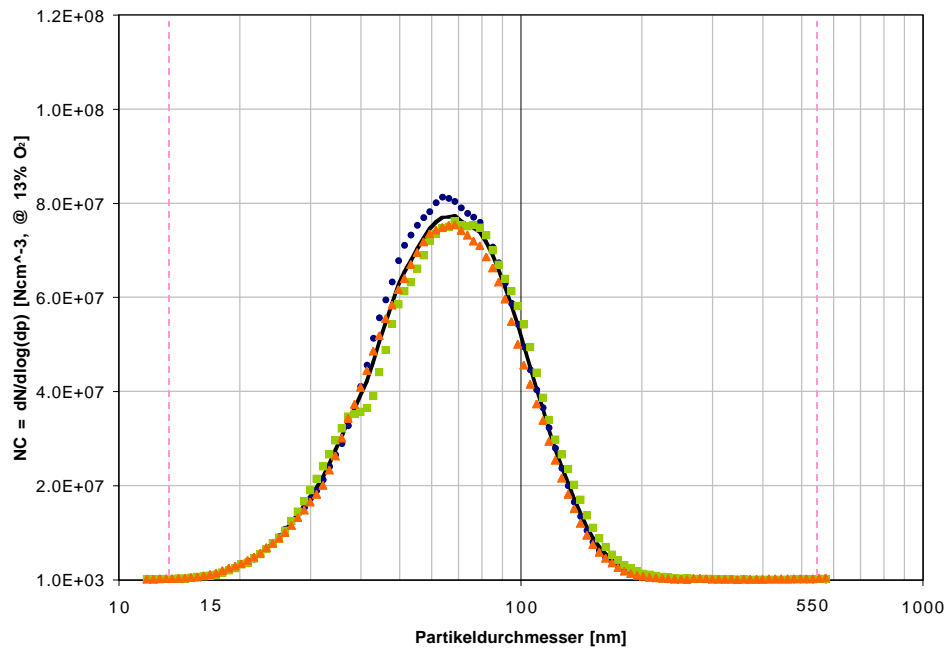
Bürli-Pellets mit Presshilfsmittel 2 (V3), Vollast, Partikel-Anzahlverteilung

Datum: 2.8.01

Anlage: Std

Code: 3 hi

Power: 15.7 kW



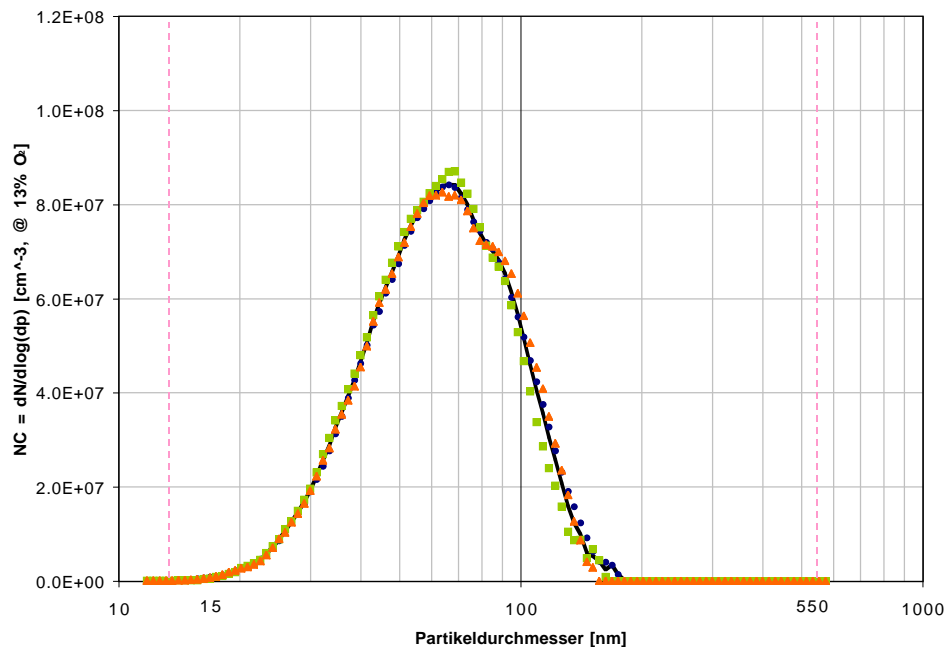
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 2 (V3), Teillast, Partikel-Anzahlverteilung

Datum: 2.8.01

Anlage: Std

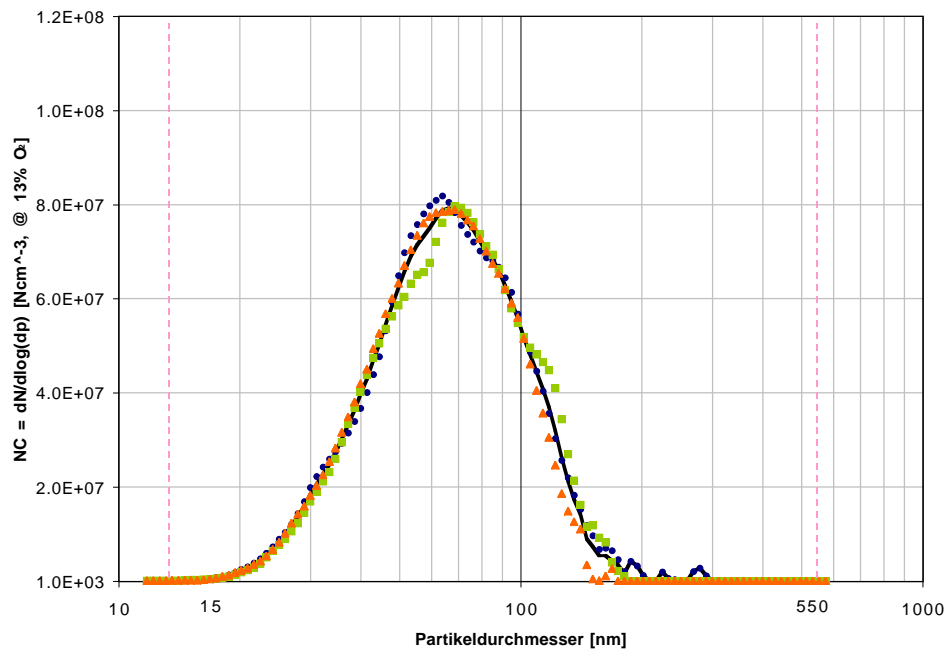
Code: 3 lo

Power: 9.9 kW



Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 3 (V4), Vollast, Partikel-Anzahlverteilung

Datum: 3.8.01 Anlage: Std Code: 4 hi Power: 14.9 kW



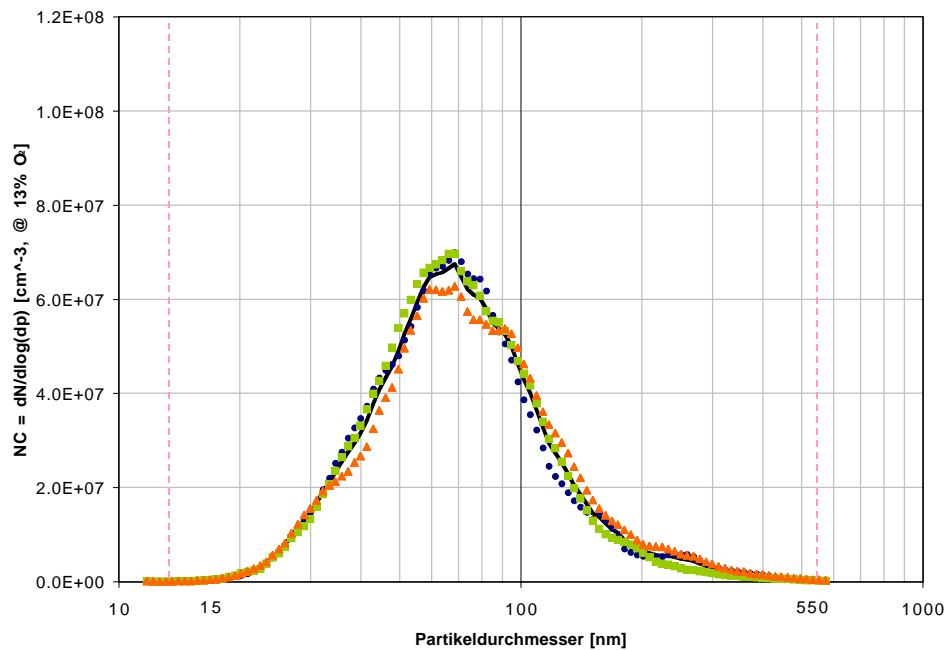
SMPS-Settings
 Flow [l/s] 4.0/0.4
 Scantime [s] 240/60
 Grenzen [nm] 12 -> 572
 Rot. Verd. [-] 200-fach

Mess-Parameter
 1 Sample = 5 Scans à 5 Min.

Legende:
 • 10:29:03
 ■ 11:04:17
 ▲ 11:43:50
 — Mittelwert

Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 3 (V4), Teillast, Partikel-Anzahlverteilung

Datum: 3.8.01 Anlage: Std Code: 4 lo Power: 10.3 kW



SMPS-Settings
 Flow [l/s] 4.0/0.4
 Scantime [s] 240/60
 Grenzen [nm] 12 -> 572
 Rot. Verd. [-] 200-fach

Mess-Parameter
 1 Sample = 5 Scans à 5 Min.

Legende:
 • 14:40:06
 ■ 15:15:01
 ▲ 15:49:16
 — Mittelwert

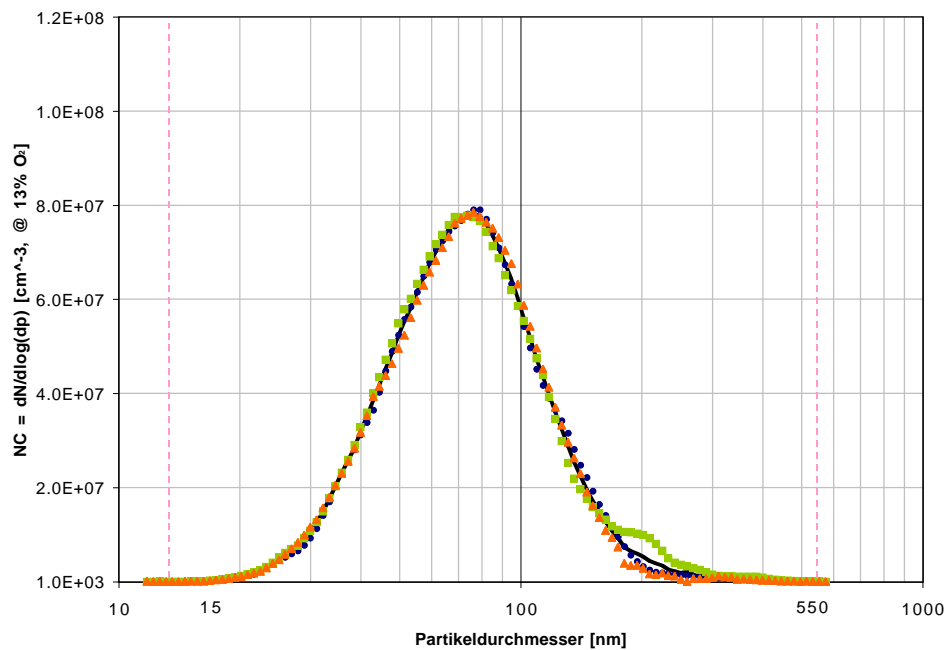
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 4 (V5), Vollast, Partikel-Anzahlverteilung

Datum: 6.8.01

Anlage: Std

Code: 5 hi

Power: 13.3 kW



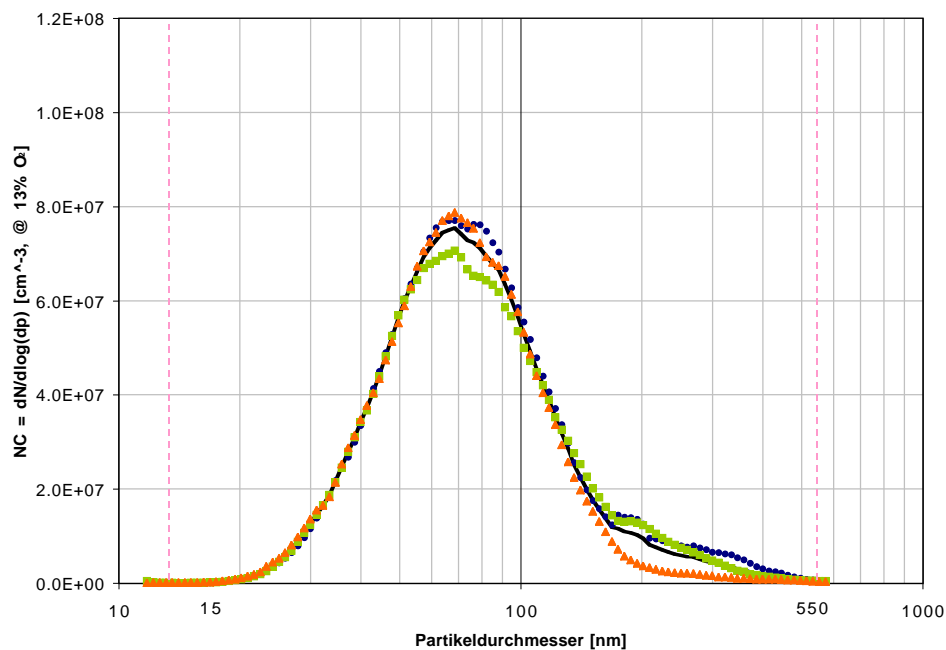
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 4 (V5), Teillast, Partikel-Anzahlverteilung

Datum: 6.8.01

Anlage: Std

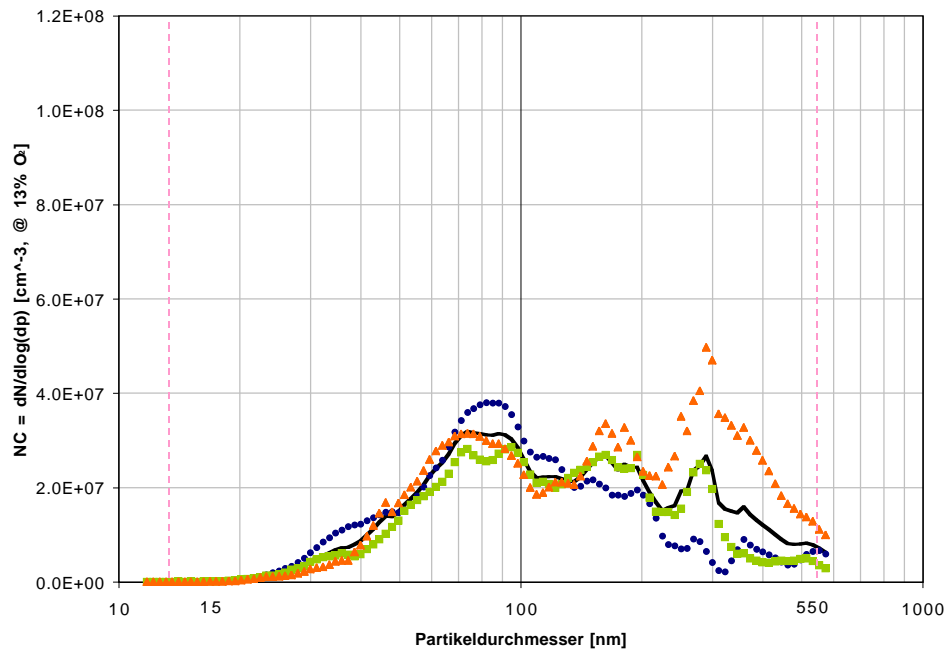
Code: 5 lo

Power: 9.3 kW



Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 4 (viel Sägemehl) (V9), Vollast, Partikel-Anzahlverteilung

Datum: 16.8.01 Anlage: Std Code: 9 hi Power: 16.7 kW



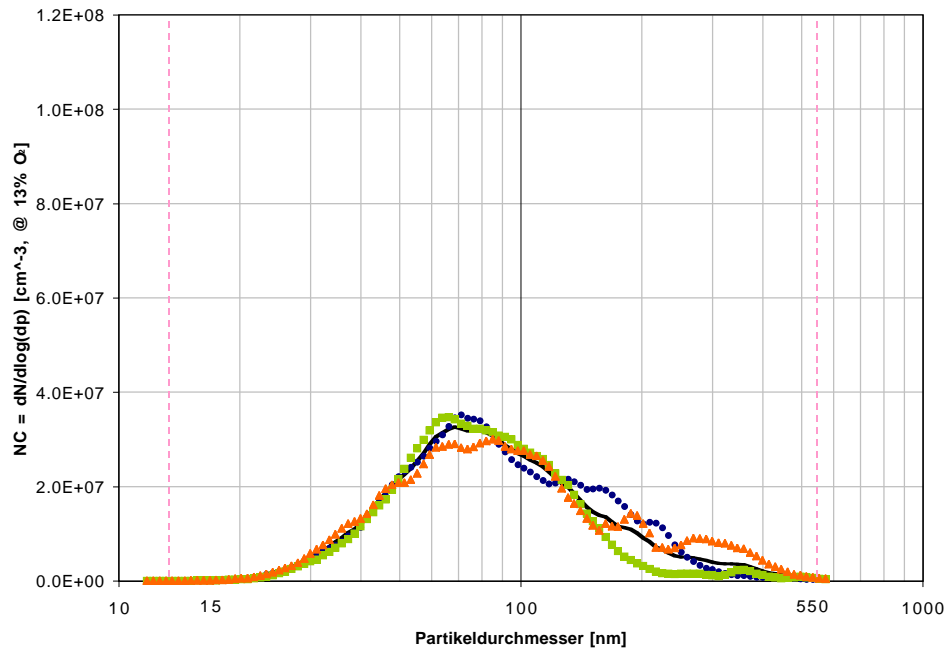
SMPS-Settings
 Flow [l/s] 4.0/0.4
 Scantime [s] 240/60
 Grenzen [nm] 12 -> 572
 Rot. Verd. [-] 200-fach

Mess-Parameter
 1 Sample = 5 Scans à 5 Min.

Legende:
 • 16:12:17
 ■ 16:45:09
 ▲ 17:18:05
 — Mittelwert

Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 4 (viel Sägemehl) (V9), Teillast, Partikel-Anzahlverteilung

Datum: 16.8.01 Anlage: Std Code: 9 lo Power: 12.5 kW



SMPS-Settings
 Flow [l/s] 4.0/0.4
 Scantime [s] 240/60
 Grenzen [nm] 12 -> 572
 Rot. Verd. [-] 200-fach

Mess-Parameter
 1 Sample = 5 Scans à 5 Min.

Legende:
 • 18:41:31
 ■ 19:15:19
 ▲ 19:47:47
 — Mittelwert

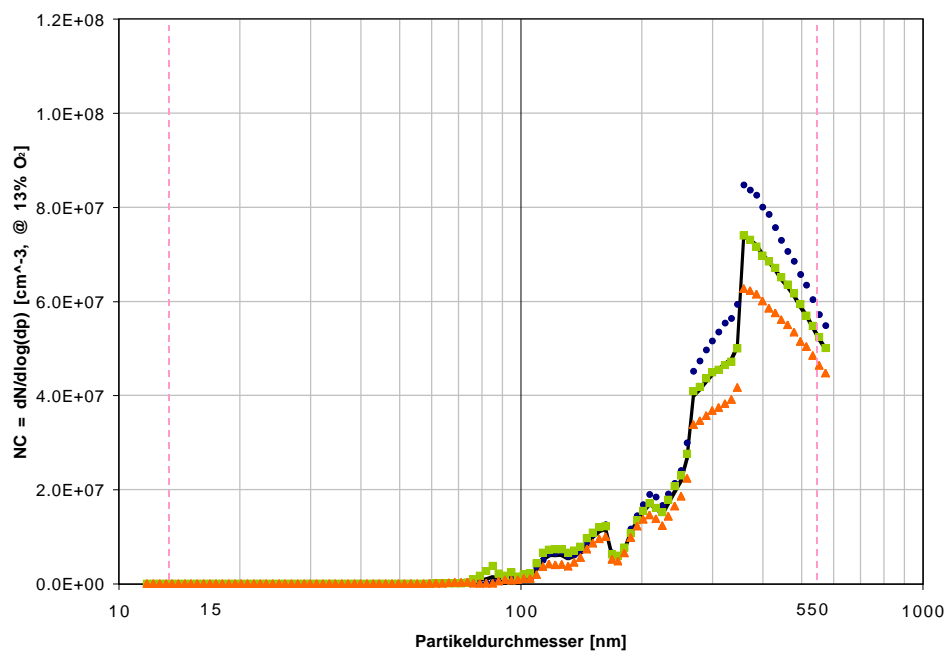
Bürli Pellets mit Presshilfsmittel 5 (V6), Vollast, Partikel-Anzahlverteilung

Datum: 14.8.01

Anlage: Std

Code: 6 lo

Power: 16.8 kW

**SMPS-Settings**

Flow [l/s] 4.0/0.4
Scantime [s] 240/60
Grenzen [nm] 12 -> 572
Rot. Verd. [-] 200-fach

Mess-Parameter

1 Sample = 5 Scans à 5 Min.

Legende:

- 12:22:45
- 12:50:26
- ▲ 13:18:12
- Mittelwert

13 Literaturverzeichnis

13.1 Normen

DIN 51731: *Presslinge aus naturbelassenem Holz – Anforderungen und Prüfung*, DIN 51731: 1996-10

ÖNORM M 7135: *Presslinge aus naturbelassenem Holz oder naturbelassener Rinde, Pellets und Briketts, Anforderungen und Prüfbestimmungen*, ÖNORM M 7135, Ausgabe 2000-11-01

SN166000: *Prüfung fester Brennstoffe – Presslinge aus naturbelassenem Holz – Anforderungen und Prüfung*, (DIN 51731:1996 unverändert übernommen), SN 166000:2001 de

13.2 Literatur

BUWAL: *Empfehlungen über die Emissionsmessung von Luftfremdstoffen bei stationären Anlagen (Emissions-Messempfehlungen)*, Bundesamt für Umwelt, Land und Landschaft (BUWAL), p. 81f, Stand vom 25. Januar 1996

BUWAL: *Heizenergie aus Erdöl, Erdgas oder Holz?*. Autoren: Kessler, F.; Knechtle, N.; Frischknecht, R., Schriftenreihe Umwelt Nr. 315, Bern 2000

Gaegauf, C.: Partikelemissionen verschiedener Holzfeuerungen, *6. Holzenergie-Symposium*, 20.10.2000, ETH Zürich, ENET, Bundesamt für Energie, Bern 2000, 31-50

Gschwind, P.: Brennstoffversorgung und Anlagentechnik bei Pelletfeuerungen. *5. Holzenergie-Symposium*, 16. Oktober 1998, ETH Zürich, Bundesamt für Energie, Bern 1998, S. 173-188

Hartmann, H.; Böhm, T.; Maier, L.: *Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – Umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten*, Reihe Materialien, nr. 154, Bayr. Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München, 2000

Hasler, P.; Nussbaumer, T.: *Stofffluss bei der Verbrennung und Vergasung von Altholz*, DIANE 8 – Energie aus Altholz und Altpapier, Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW), EDMZ-Nr. 805.172 d, Bern, November 1993

Hasler, P.; Nussbaumer, T.: *Partikelgrößenverteilung bei der Verbrennung und Vergasung von Biomasse*, Bundesamt für Energie, Bern 1998, 45-74

Hasler, P.; Nussbaumer, T.: Aerosole aus Biomassefeuerungen – Grundlagen, Eigenschaften und Abscheidung, *5. Holzenergie-Symposium*, 16.10.1998, ETH Zürich, ENET, Bundesamt für Energie, Bern 1998, 45-74

Läng, H.-P.: Holzpellets: Wird aus der steigenden Nachfrage ein Trend?, *Heizung-Klima*, 4/2001, 30-32

Niemann, R.: *Holzpellets: biologisch und sauber*, BÜHLER Diagramm, Ausgabe nr. 129 (July 2001), 18-19

Oser, M.; Nussbaumer, T.; Schweizer, B.; Mohr, M.; Figi, R.: Untersuchung der Einflüsse auf die Partikelemissionen in einer Unterschubfeuerung, *6. Holzenergie-Symposium*, 20.10.2000, ETH Zürich, ENET, Bundesamt für Energie, Bern 1997

Pelletverband (PVA): *Mitteilung Herrn P. Helmberger, P.*, Juni 2001

(siehe auch <http://www.pelletsverband.at>)

sabi-koncernen (Schweden), *Aresredovisning 2000* (Jahresrechnung 2000 vom 15. Mai 2001)

Schindel, K.: *Die Röntgenmikroanalyse von Lignin als Untersuchungsmethode für Holz und Holzwerkstoffe*, Dissertation Georg-August-Universität Göttingen (Deutschland), 1998

Schmidt, A.; Tzschetzsche, A.; Hantsch-Linhart, W.: *Analysen von Biomassen*, Anhang B, Institut für Verfahrenstechnik, Brennstofftechnik und Umwelttechnik, TU Wien, 1993

Vetter, A.; Wieser, P.; Mäusezahl, K.; Leiterer, M.; Rudolph, B.; Werner, A.: *Untersuchungen zum Einfluss der Brennstoffart und -qualität auf die Zusammensetzung der Reststoffe und deren Verwertung am Strohheizwerk Schkölen zur Sicherung der Umweltverträglichkeit*. Abschlussbericht 12/1995, Themen-Nr.: 40 012 430 H/D/1995, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Dezember 1995

Völlmin, C.: Pellets – Brennstoff und Feuerungen, *Schweizer Kaminfeger*, 3/2001, 10-15

Völlmin, C.: Stand und Entwicklungstendenzen von Pelletfeuerungen in Öfen und Kesseln. 6. *Holzenergie-Symposium*, 20. Oktober 2000, ETH Zürich, Bundesamt für Energie, Bern 2000, S.125-142

Weber, R.; Moxter, W.; Pilz, M.; Pospischil, H.; Poleder, G.: *Umweltverträglichkeit des Strohheizwerkes Schkölen – Teil Emissionen*, Projektbericht, Thüringer Landesanstalt für Umwelt, Jena (Deutschland), Dez. 1995