

Schlussbericht

zu dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit geförderten Projekt

„Entwicklung einer energiesparenden Technologie zur Veredlung von Holz mit anorganischen Zusatzstoffen unter Nutzung mechano-chemischer Effekte“

Förderkennzeichen: 032 7243 A

Laufzeit des Projektes: 01.11.1999 bis 31.10.2002

Zuwendungsempfänger: TU Bergakademie Freiberg
Akademiestraße 6
09596 Freiberg

Ausführende Stelle: TU Bergakademie Freiberg
Professur Agglomerationstechnik und Luftreinhaltung
Leipziger Straße 28
09599 Freiberg

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Naundorf

Wissenschaftliche Mitarbeiter: Dr.-Ing. Ralf Wollenberg
Dipl.-Ing. Ulrike Straßburger

Freiberg, im Januar 2003

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Zielstellung	5
2. Planung und Ablauf des Vorhabens	8
3. Hochdruckverdichtung von Holznebenprodukten und anorganischen Rohstoffen zu Formkörpern mit Bau- und Werkstoffeigenschaften	10
3.1. Charakterisierung des Verfahrens	10
3.2. Pressformkörper aus Holznebenprodukten bzw. Hanfstroh und Löschkalk	16
3.3. Pressformkörper aus Holznebenprodukten und Kraftwerksasche	21
4. Niederdruckverdichtung von Holznebenprodukten und anorganischen Rohstoffen zu Formkörpern mit Bau- und Werkstoffeigenschaften	30
4.1. Charakterisierung des Verfahrens	30
4.2. Formkörper aus Holz hackschnitzeln und Kraftwerksasche	33
4.3. Formkörper aus Holz/Kohle-Faserstoff bzw. Xylit und Kraftwerksasche	37
5. Herstellung von Baustoffgranulaten aus biostämmigen Rohstoffen und anorganischen Prozessnebenprodukten	39
5.1. Charakterisierung des Verfahrens	39
5.2. Herstellung der Granulate	43
5.3. Eigenschaften der Granulate	46
5.3.1. Sturzfestigkeit und Schüttdichte	46
5.3.2. Verdichtungsverhalten der Kornschüttung bei Druckbelastung	48
5.3.3. Wasserdurchlässigkeit und Trocknungsverhalten der Granulatschüttung	49
5.3.4. Zündverhalten der Granulate	52
5.3.5. Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität	53
5.3.6. Dämmwirkung der Granulate in einer Versuchswand	54
6. Veredlung von Holznebenprodukten zu mineralisierten Faserstoffen	58
6.1. Charakterisierung des Verfahrens	58
6.2. Herstellung eines Holz/Asche- und Holz/Löschkalk-Faserstoffes mit erhöhtem Brandwiderstand	62
6.2.1. Verfahrensbedingungen	62
6.2.2. Eigenschaften der Verbundfaserstoffe	63

6.3.	Herstellung eines Holz/Löschkalk-Faserstoffes für die Gasreinigung	65
6.4.	Herstellung eines Holz/Kohle-Faserstoffes	66
6.4.1.	Verfahrensbedingungen	66
6.4.2.	Eigenschaften des Holz/Kohle-Verbundfaserstoffes	67
6.5.	Herstellung eines Xylitfaserstoffes	69
7.	Energetische und wirtschaftliche Bewertung der Verfahren	70
8.	Nutzen und Verwertungspotential der Forschungsergebnisse	76
9.	Zusammenfassung	79

Literaturverzeichnis

- [1] Deppe, E.:
Taschenbuch der Spanplattentechnik.
DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., 2000

- [2] Paulitsch, M.:
Moderne Holzwerkstoffe.
Springer-Verlag, 1989

- [3] Krug, H.; Naundorf, W.:
Braunkohlenbrikettierung, 2 Bände
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig

- [4] Süss, M.:
Zur Petrographie des Xylits.
Freiberger Forschungsheft, A 148 (1959), S. 14 - 33

- [5] Naundorf, W.; Speer, U.:
Granulat aus Braunkohle und Löschkalk zur SO₂-Abscheidung.
Braunkohle 50 (1998) 5, S. 467 - 471

- [6] Naundorf, W.; Wollenberg, R.:
Untersuchungen zur Steigerung der Montanwachsgewinnung.
Surface Mining · Braunkohle & Other Minerals 54 (2002) 1, S. 83 - 91

- [7] Kuchling, H.:
Taschenbuch der Physik.
Fachbuchverlag Leipzig, 1991

- [8] AiF-Vorhaben 12046 BR
TU Bergakademie Freiberg, 2002

- [9] Dämmstoffe aus der heimischen Natur.
Informationsbroschüre, herausgegeben von C.A.R.M.E.N., Fachagentur Nachhaltigende Rohstoffe, CMA

1. Zielstellung

Das im Projektantrag formulierte Ziel der Forschungs- und Entwicklungsaufgabe ist eine neue energiesparende Technologie zur Veredelung von Holz und ähnlichen Pflanzenfaserstoffen mit anorganischen Zusätzen unter Nutzung mechano-chemischer Effekte. Bei der Bearbeitung des Forschungsprojektes wurde erkannt, dass das Innovationspotenzial insbesondere dann bestmöglich ausgeschöpft wird, wenn das Holz, die biostämmigen Rohstoffe und die anorganischen Zusatzstoffe nicht nur nach einer energiesparenden Technologie veredelt werden, sondern mehrere unterschiedliche produktspezifische Verfahren entwickelt werden. Damit ist der apparative und energetische Aufwand am einfachsten minimierbar.

Für die Verfahrensentwicklung werden hauptsächlich Prozessnebenprodukte verwendet, die bislang nicht für die Herstellung von Bau- oder Werkstoffen genutzt werden konnten, oder Rohstoffe, die trotz vielseitiger Verwendung immer noch im Überschuss zur Verfügung stehen:

- Holznebenprodukte in Form von Holzhackschnitzeln oder Säge- und Hobelspänen,
- fasrige biostämmige Rohstoffe und jungtertiäre Weichbraunkohle,
- Löschkalk und/oder Kalksteinmehl,
- kalk- und anhydrithaltige Nebenprodukte, insbesondere Kraftwerksaschen,
- REA-Gips.

Für die Bereitstellung dieser Rohstoffe werden vergleichsweise geringe Mengen an Energie benötigt. Das ist eine günstige Ausgangsposition für die Entwicklung von energiesparenden Verfahren.

Eine wichtige Vorgabe des Forschungsvorhabens ist die Herstellung von möglichst neuartigen und hochwertigen Produkten, die bislang aus den genannten Rohstoffen noch nicht hergestellt wurden und mit denen neue Einsatzgebiete erschlossen werden können. Damit soll gleichzeitig ein Beitrag zur effizienteren Nutzung von Prozessnebenprodukten und zur Schonung der natürlichen Ressourcen geleistet werden. Die dafür zu entwickelnden Verfahren sollen einen signifikanten Beitrag zur Einsparung von Energie leisten. Die Energieeinsparung soll sich nicht allein auf die Herstellungstechnologie für die neuen Produkte beziehen. Es werden vielmehr Verfahren und Produkte benötigt, die insgesamt von der Rohstoffbereitstellung bis zur Entsorgung der Endprodukte zur Energieeinsparung beitragen. Bei der Bearbeitung der Forschungsaufgabe werden deshalb folgende Teilbereiche der Energieeinsparung berücksichtigt:

1. Minimierung des Energiebedarfes für die Herstellungstechnologie der neuen Produkte (Hauptziel)

Diese Zielstellung soll vor allem durch die Verwendung von ausreichend verfügbaren und mit geringem Energieaufwand bereitstellbaren Rohstoffen und durch die Entwicklung von Verfahren mit wenigen Prozessstufen erreicht werden. Wenn eine Maschine gleichzeitig mehrere Prozessstufen realisieren kann, entfallen damit die Energieaufwendungen

- für den Antrieb und die Prozesswärme von vielen Einzelmaschinen,
- für zwischengeschaltete Fördereinrichtungen,
- für das Bauen mehretagiger oder großflächiger Betriebsgebäude sowie
- für das Beheizen und Beleuchten großer Produktionsräume.

Unter Berücksichtigung dieser Vielfalt von Energieaufwendungen kann in Summe selbst auch dann Energie eingespart werden, wenn der Energiebedarf für die Schlüsselmaschine relativ groß ist. Außerdem ist es von Vorteil, wenn die Schlüsselmaschine nur eine Energieart benötigt.

Zur Minimierung des Energiebedarfes für die Herstellungstechnologie gehört auch der Einsatz von ohnehin anfallenden Rohstoffen, für deren Bereitstellung kein weiterer Energiebedarf erforderlich ist.

Es werden Herstellungsverfahren angestrebt, bei denen in der Stoffveredlungsphase möglichst keine staubenden Zwischenprodukte entstehen, so dass der häufig enorme Aufwand für den Betrieb von Entstaubungseinrichtungen entfällt.

Des Weiteren sollen Verfahren zur Anwendung kommen, bei denen der größte Teil der Energie (außer Antriebsenergie) durch Niedertemperatur- oder sogar Abwärme gedeckt werden kann. Die benötigte absolute Menge an Wärmeenergie ist ein wichtiges, aber allein nicht ausreichendes Kriterium für ein Verfahren mit geringem Energiebedarf. Größere Wärmemengen wären sogar zu vertreten, wenn sie mit Abwärme oder Niedertemperaturwärme (z.B. über die Kraft-Wärme-Kopplung) statt mit Hochtemperaturwärme (z.B. für Brennprozesse) gedeckt werden können. Das trifft vor allem für Standorte zu, wo große Mengen an Niedertemperaturwärme zur Verfügung stehen.

2. Herstellung von Produkten mit geringem Energieverbrauch bei der nachfolgenden Verarbeitung und während der Nutzung

Energieeinsparung bei der Verarbeitung und während der Nutzung wird z.B. erreicht durch:

- Herstellung von Produkten mit dem endgültigen Formwert, so dass der Energieverbrauch für die Nachbearbeitung entfällt,

- Herstellung von Produkten mit geringem Aufwand für den Einbau in Anlagen,
- Herstellung von Produkten, die sich durch hohe Wärmedämmwirkung und gleichzeitig durch hohe Wärmespeicherung auszeichnen,
- Herstellung von Produkten mit langer Lebensdauer zwecks Vermeidung von schneller Ersatzproduktion und von Reparaturen,
- Herstellung von multifunktionalen Produkten, die den gleichzeitigen Einsatz von unterschiedlichen Materialien erübrigen. Ein Beispiel dafür ist die Herstellung von Produkten für das „einschalige Bauen“, die hinreichend fest sein müssen und gleichzeitig die Wärmedämmvorschriften erfüllen.

3. Herstellung von Produkten nach Verfahren, bei denen keine Stoffumwandlungsverluste auftreten.

Die Stoffumwandlungsverluste sind bei der Herstellung vieler künstlicher Syntheseprodukte relativ groß. Wenn keine Stoffumwandlungsverluste auftreten, werden Ressourcen geschont und zumeist in Summe auch weniger Energie benötigt. Der spezifische Energiebedarf reduziert sich durch einen hohen Stoffnutzungsgrad.

4. Entwicklung von Technologien ohne Anfall von Nebenprodukten und Emissionen, für deren Beseitigung Energie notwendig wäre.

5. Herstellung von Produkten, deren Heizwert nach der stofflichen Nutzung im Rahmen einer thermischen Entsorgung genutzt werden kann.

Durch die Kombination von stofflicher und nachfolgender thermischer Nutzung lässt sich eine besonders hohe Energieeffektivität erreichen.

Die Forschungsaufgabe wurde in Abhängigkeit von den Erkenntnisfortschritten flexibel erfüllt. Es werden energiesparende Verfahren zur bestmöglichen Verwertung der vorn genannten Rohstoffe zu hochwertigen Produkten mit vielfältigen Einsatzgebieten und möglichst hohen Erlösen entwickelt.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Gemäß den Festlegungen im Arbeitsplan des Projektes wurde mit der Herstellung von festen Formkörpern mit Bau- und Werkstoffeigenschaften unter Anwendung des Verfahrensprinzips der Hochdruckpressverdichtung begonnen. Das Ziel der Versuche, Formkörperqualitäten zu realisieren, die bislang ohne den Einsatz von teuren synthetischen Leimen nicht möglich waren, konnte erreicht werden. Charakteristisches Merkmal der Formkörper ist ihre hohe Festigkeit, die spezielle Einsatzmöglichkeiten auf dem Bau- und Werkstoffsektor eröffnet. Aus energetischer Sicht von Nachteil ist die Notwendigkeit, dass bei diesem Verfahren zur Auslösung der notwendigen Bindekräfte hohe Presskräfte anzuwenden sind, die über Elektroenergie realisiert werden müssen. Es wurde deshalb auch nach einem alternativen Verfahrensweg gesucht, der es gestattet, qualitative hochwertige Formkörper auch mit geringen Presskräften zu erzeugen. Durch diese Pressdruckoptimierung ist ein weiterer, ursprünglich nicht geplanter Forschungskomplex entstanden - die Produktveredlung nach dem Verfahren der Niederdruckverdichtung. Bei diesem Verfahren werden die Bindekräfte für die Formkörperentwicklung in anderer Weise genutzt. Es entstehen Formkörper, die nicht hochfest sind, aber für viele Anwendungen eine ausreichende mechanische Stabilität haben, und die aufgrund ihrer höheren Porosität bessere Dämmeigenschaften aufweisen. Sie können zum Beispiel ein geeigneter Baustoff für das einschalige Bauen.

Im Verlauf der Bearbeitung des Forschungsprojektes wurde immer deutlicher, dass nicht nur Formkörper gefragt sind, sondern insbesondere auch schüttfähige Baustoffe und resistente Faserstoffe, die viel einfacher hergestellt werden können. Es wurde erkannt, dass das Forschungsziel einer energiesparenden Technologie nicht nur auf ein Produkt beschränkt bleiben sollte. Das Energiesparpotential lässt sich auch unter dem Aspekt der regionalen Anpassung dann am besten ausschöpfen, wenn nicht nur auf ein, sondern auf mehrere Verfahren und Produkte zurückgegriffen werden kann. Diese Überlegungen waren der Ausgangspunkt für die Aufnahme der Forschungskomplexe 3 und 4 in das Programm, die ursprünglich ebenfalls nicht vorgesehen waren. Komplex 3 betrifft die Herstellung von Baustoffgranulaten, die eine hohe Festigkeit und gute Wärmedämmeigenschaften haben und sich zum Beispiel zum Verfüllen und Ausgleichen von Fußböden eignen. Im Komplex 4 wurde die Herstellung von durch Mineralisierung resistent gemachten Holzfasern verfolgt.

Im ursprünglichen Projekt war vorgesehen, das für Holz zu entwickelnde Verfahren der Hochdruckverpressung auch für den Einsatz anderer Faserstoffe, wie Flachs, Hanf, Stroh, Kartonagen, anzupassen und zu optimieren. In Testversuchen konnte gezeigt werden, dass alle Erkenntnisse zur Veredlung von Holz prinzipiell auf alle anderen Lignozellulosen an-

wendbar sind, wobei die erforderliche verfahrenstechnische Anpassung und Optimierung kein schwieriges Problem darstellen. Aus diesem Grund wurde auf umfangreiche Versuche mit weiteren Faserrohstoffen verzichtet und die Forschungsarbeit auf die Produktentwicklung auf der Basis von Holz konzentriert.

Im Rahmen des Projektes waren finanzielle Mittel worden für die Anschaffung eines Autoklaven zur CO₂-Behandlung der Presswerkstoffe geplant und auch bewilligt. Die positiven Ergebnisse erster Testversuche hatten die Anwendung dieses Nachbehandlungsverfahrens dringend empfohlen. Im Verlauf der Untersuchungen stellte sich jedoch heraus, dass die Effekte der CO₂-Behandlung im Hinblick auf die Qualitätssteigerung nicht unbedingt benötigt werden bzw. durch Nutzung anderer Effekte sogar in der angestrebten Wirkung übertroffen werden, wenn z.B. die Holzfaserstoffe einer Schnelltrocknung unter der Bedingung der Durchströmung des Faserhaufwerkes mit erhöhten Temperaturen unterzogen werden. Deshalb wurde unter Zustimmung des Projektträgers anstelle eines Autoklaven ein Durchströmungstrockner angeschafft. Die schnelle Trocknung bei schneller Aufheizung, die in einem solchen Trockner realisiert werden kann, bewirkt eine Modifizierung des Holzfaserstoffes durch partielles Ausschwitzen von holzeigenen Wachsen und Harten sowie durch thermochemische Reaktionen zwischen Holzinhaltsstoffen. Der getrocknete Faserstoff wird deutlich hydrophober und damit widerstandsfähiger gegen mikrobiellen Abbau und erlangt wesentlich bessere Verarbeitungseigenschaften für die Herstellung von plattenförmigen Werkstoffen.

Mit den umgewidmeten finanziellen Mitteln wurde des Weiteren eine Universalprüfmaschine sowie ein Rotationsverdampfer gekauft. Die Universalprüfmaschine sollte zur Bestimmung der Festigkeit von Holzfasern in folgender Weise eingesetzt werden. Aus Holzfasern wird nach der Papiertechnologie mit Hilfe eines Blattbildners ein Vlies erzeugt, aus dem nach der Trocknung Streifen für eine mit der Prüfmaschine durchzuführende Zugfestigkeitsmessung geschnitten werden. Die Zugfestigkeitswerte sollten ein qualifiziertes Maß für die Faserfestigkeit sein. Aufgrund von ersten Zugfestigkeitsmessungen an Vliesstreifen aus feinen Holzfasern wurde davon ausgegangen, dass sich die Methode sehr gut für eine standardisierte Charakterisierung von Faserfestigkeiten eignet. Im Verlauf der Untersuchungen musste jedoch festgestellt werden, dass diese Annahme nur für Holzfasern mit sehr hoher Feinheit aufrecht erhalten werden kann. Bei gröberen Holzfasern, wie sie bei den Versuchen überwiegend eingesetzt worden sind, streuten die Zugfestigkeitswerte aufgrund von Vliesinhomogenitäten zu stark. Es war keine zuverlässige Trendbestimmung mehr möglich. Die Methode erwies sich damit für den größten Teil der Untersuchungen als unbrauchbar. Die Universalprüfmaschine wird derzeit gemeinsam mit dem in Eigenleistung aufgebauten Blattbildner für die Vorbereitung eines anschließenden Forschungsprojektes benutzt, welches die

Herstellung von dünnflächigen Werkstoffen aus feinen, pflanzenstämmigen Fasern zum Inhalt hat. Die hierzu durchzuführende Forschungsarbeit baut in wesentlichen Punkten auf den Erkenntnissen auf, die in diesem Abschlussbericht dargelegt werden. Es kann damit letztlich eine zweckmäßige Verwendung dieses Gerätes sichergestellt werden.

Der Rotationsverdampfer war als ein Hilfsgerät zur Gewinnung von Pflanzenextrakten gekauft worden, die als Konditionierungs- und Konservierungsmittel für Holzfasern geeignet sind. Rindenextrakte sind bekanntlich wirkungsvolle Konservierungsmittel. Die Extraktherstellung selbst ist jedoch keine so einfache Prozedur wie anfangs angenommen. Sie verlangt die Erarbeitung von verfahrenstechnischem Know-how, was nicht als eine Nebenaufgabe im Rahmen dieses Projektes zufriedenstellend zu leisten war. Die Versuche zur Konditionierung und Konservierung von Holzfasern mit Pflanzenextrakten wurden deshalb zugunsten der oben genannten Produktentwicklungen zurückgestellt.

Außer den an Drittinstitutionen durchgeführten Arbeiten und der Schaffung zusätzlicher versuchstechnischer Voraussetzungen wurde das Forschungsvorhaben mit den im Antrag geplanten und genehmigten personellen und finanziellen Mitteln realisiert. Zeitplan und Finanzplan des genehmigten Vorhabens wurden eingehalten. Die zum großen Teil mit Drittmitteln aus der Industrieforschung erbrachte Eigenleistung der Forschungsstelle beinhaltete:

- Umrüstung einer hydraulischen Presse als Heißpresse zur Realisierung des Verfahrens der Niedrig- und Mitteldruckverdichtung,
- Aufbau einer Versuchswand zur Messung der Dämmwirkung von Granulatschüttungen,
- Durchführung von physikalischen und chemischen Stoffanalysen und die Ermittlung von Qualittskennziffern durch Nachbar- und Fremdinstitutionen,
- Wartung der Versuchsgeräte, technische Änderungen an den Versuchsständen, Einrichtung der Messtechniken, Bau kleiner Versuchsvorrichtungen,
- wissenschaftliche Betreuung des Forschungsprojektes.

3. Hochdruckverdichtung von Holznebenprodukten und anorganischen Rohstoffen zu Formkörpern mit Bau- und Werkstoffeigenschaften

3.1. Charakterisierung des Verfahrens

Das Ziel dieser Verfahrensentwicklung ist die Veredlung von in großen Mengen verfügbaren Holznebenprodukten (Holzhackschnitzeln, Späne) zu hochwertigen Produkten in einer Qualität, die bislang ohne Einsatz von hochwertigen synthetischen Bindestoffen nicht erreicht werden konnte. Der angestrebte hohe Veredlungsgrad für die Holznebenprodukte ist uner-

lässlich notwendig, wenn für diese Rohstoffe neue Einsatzgebiete erschlossen werden sollen. Die neuen Produkte sollen keine Konkurrenzprodukte für Spanplatten und Holzfaserverwerkstoffe werden. Das Ziel ist vielmehr die Entwicklung von speziellen Werkstoffen mit zumindest teilweise kunststoff- oder hartholzähnlichen Eigenschaften, für die höhere Erlöse erzielt werden können, wenn sie spezielle Anforderungen auch im Bereich des Kleinmensektors erfüllen. Es wird angestrebt, dass wenigstens einige Qualitätskennwerte der neu entwickelten Werkstoffe besser sind als die von vielen gewachsenen Hölzern, wie z.B. von Fichte oder Kiefer. Ein besonders hohes Niveau wird vor allem für folgende Qualitätskenngrößen angestrebt:

- Druckfestigkeit
- Härte
- Biegefestigkeit
- Brandwiderstand
- Resistenz gegenüber biologischem Abbau.

Der beträchtliche Veredlungseffekt für die zunächst relativ wertlosen Holznebenprodukte ist hinsichtlich Verfahrensaufwand und Energiebedarf natürlich nicht zum „Nulltarif“ zu erhalten. Ein Vergleich ist deshalb nur mit Verfahren (z.B. der Kunststoffindustrie) sinnvoll, die ähnlich hochwertige Produkte erzeugen.

Die hohe Werkstoffqualität soll durch die Anwendung folgender Verfahrensschritte erreicht werden:

1. Umwandlung der Holznebenprodukte in ein Zerfaserungsprodukt mit sehr guten Binde- und Verdichtungseigenschaften

Holz ist ein zäher und elastischer Rohstoff. Bei der Zerkleinerung zu stängligen Holzspänen verliert das Holz diese Eigenschaften nicht. Durch die ungünstigen Verdichtungs- und Bindungseigenschaften von Holzspänen und vor allem durch ihre starke Rückexpansion während der Druckentlastung am Ende des Verpressungsprozesses können aus ihnen nur durch den Einsatz von relativ hohen Anteilen an teuren synthetischen Klebstoffen feste Holzwerkstoffe hergestellt werden [1].

Die Binde- und Verdichtungseigenschaften der Holznebenprodukte verbessern sich erst dann deutlich, wenn sie unter hydrothermalen Prozessbedingungen in einen weichen, watti- gen Faserstoff überführt werden. Die Herstellung von Holzfaserverstoffen wurde bislang nur mit Schleifsteinen oder Refinern realisiert [2]. Der Energiebedarf ist hierbei sehr hoch. Allein für den Antrieb der Maschinen wird ein Elektroenergiebedarf von etwa 1200 bis 2000 kWh pro

Tonne Faserstoff (wf) benötigt. Beim Refinerverfahren ist zudem eine Druckdämpfung des Holzes mit hochwertiger Wärmeenergie und teurem Wasserdampf bei Temperaturen von etwa 180 bis 200 °C erforderlich. Wegen des hohen Energiebedarfes wurde die Holzerfaserung in der Vergangenheit nur in geringem Umfang für die Herstellung von speziellen Holzprodukten genutzt.

Der spezifische Energiebedarf für die Zerkleinerung des Holzes verringert sich sehr stark, wenn für den Zerkleinerungsprozess der Doppelschneckenextruder (Doppelschneckenzerfaserer) eingesetzt wird (Bild 1). In Versuchen mit einem kleintechnischen Apparat (Durchsatz ca. 0,5 t/h) wurde ein mittlerer Energieverbrauch von 200 kWh/t gemessen. Mit dieser Maschine wird zwar keine vergleichbar hohe Faserfeinheit wie mit den Refinern erreicht, das ist aber für die Verwendung von Holzfasern auch nicht immer erforderlich. Das Holz wird bei der Zerkleinerung im Doppelschneckenzerfaserer im feuchten Zustand durch anhaltend einwirkende intensive Druck- und Scherbeanspruchungen hauptsächlich parallel zur Faserbündelstruktur aufgespalten. Die Beanspruchung erfolgt zwischen den gegenläufig rotierenden Extruderschnecken sowie zwischen den Schneckenflügeln und dem profilierten Schneckeninnengehäuse. Der letzte Teil der Schneckenflügel vor der Austrittsöffnung ist so konstruiert, dass eine partielle Rückwärtsströmung erzwungen wird. Das begünstigt die Pfropfenbildung und den Aufbau eines inneren Überdruckes im Zerkleinerungsraum und führt zu einer besonders intensiven Druck- und Scherbeanspruchung.

Der Wassergehalt des Holzes wird so eingestellt, dass der Gutpfropfen im Zerkleinerungsraum vollständig mit Holz und Wasser ausgefüllt ist. Durch die mechanische Beanspruchung stellt sich im Zerkleinerungsraum eine Temperatur von $\vartheta_M \approx 90^\circ\text{C}$ bis 100°C ein. Das Holz wird daher praktisch unter hydro-mechanischen und hydro-thermalen Bedingungen zerkleinert. Das Wasser bzw. der entstehende Wasserdampf im Zerkleinerungsraum begünstigt intensive Zerkleinerungs- und Aufschlussprozesse durch

- Aufquellen,
- Plastifizierung als Folge von Denaturierungsprozessen,
- partielles makromolekulares und kolloidales Lösen von Holzinhaltsstoffen,
- Entspannungszerkleinerung beim Übergang des Kapillarwassers in Dampf während der Druckentspannung,
- Absättigung der frisch entstehenden Faseroberflächen vor der Anlagerung von Gasadsorptionsschichten durch sofortige Ausbildung von Hydrathüllen.

Das Wasser fungiert im Zerkleinerungsraum zudem als Lösungs- und Dispergiermittel für lösliche Stoffe und kolloidale Partikel, als Gleit- und Fließmittel für den Feststoff im Schneckenraum und als Reaktionsvermittler für reaktionsfähige Inhaltsstoffe. Die hohe Feststoffdichte und die günstigen Reaktionsbedingungen in der wässrigen Phase bei hohen Temperaturen modifizieren das Holz durch chemische und physikalische Reaktionen.

Unter den genannten Prozessbedingungen entsteht ein Holzfaserstoff mit folgenden vorteilhaften Eigenschaften:

- hohes Potential für die Ausbildung von besonders festen formschlüssigen Verbindungen zwischen den zur Verfilzung neigenden Fasern bei der Pressverdichtung,
- vorteilhafte Verpressungseigenschaften durch hohe Druckplastizität und wesentlich reduzierte Neigung zur Rückexpansion nach der Druckentlastung,
- hohes Bindevermögen durch:
 - * Aktivierung von Bindekräften auf den Faseroberflächen und deren „Konservierung“ durch Hydrathüllen,
 - * Aufrauung der Faseroberflächen,
 - * Mobilisierung von neuen Bindekräften durch Plastifizierung von Lignin, Austritt von Harzen und Wachsen aus Zellen sowie durch Erzeugung von rohstoffeigenen Bindehilfsstoffen in Form von z.B. denaturierten Eiweißen, Zuckern und Gerbstoffen sowie von deren Reaktionsprodukten,
 - * Überführung von Hemizellulosen in holzgummiähnliche Produkte mit erhöhter Bindewirkung.

2. Durchgängige Imprägnierung und Modifizierung der Holzfasern mit Löschkalk und/oder Kraftwerksaschen

Durch umfangreiche Vorversuche wurde festgestellt, dass Löschkalk die Verpressungseigenschaften von Holzfasern grundlegend verbessert. Die wichtigsten Gründe für den positiven Einfluss des Löschkalkes auf die Verdichtungs- und Bindeeigenschaften des Holzes sind:

- Partielles Ausfüllen des Innenkapillarovolumens der Holzfasern durch einen gut agglomerierbaren Stoff. Die Holzfasern erhalten dadurch verbesserte Kompressionseigenschaften und ihre Rückexpansion nach der Druckentlastung vermindert sich beträchtlich.
- Partieller chemischer Aufschluss von Holzinhaltsstoffen zu besser verdichtbaren und bindungsfähigeren Substanzen.

- Die Wirkung als Reaktionsstoff bzw. Reaktionsvermittler für Holzinhaltsstoffe. Die Ca-Ionen des Löschkalkes reagieren mit vielen Holzsubstanzen unter Ausbildung von stabilen und zumeist auch wenig wasserlöslichen Verbindungen.
- Verhärten von thermoplastischen Mikrostrukturen durch die eingelagerten Ca(OH)_2 -Partikel (Füllstoff).
- Abbinden durch Umwandlung zu CaCO_3 .

Der Löschkalk kann diese Funktionen aber nur dann erfüllen, wenn er die Holzfasern durchgängig bis in das Innere der Holzzellen durchdringt. Das wird nur erreicht, wenn der Löschkalk vorher in Wasser fein dispergiert wird und sich Ca-Ionen bilden, der Vermischungsprozess durch intensive und länger anhaltende mechanische Beanspruchung im wässrigen Milieu realisiert wird und die Holzfasern durch Zerkleinerung auf eine hohe Feinheit leichter durchtränkbar werden. Die genannten Prozessbedingungen liegen in fast idealer Weise während des Holzaufschlusses im Doppelschneckenzerfaserer vor. Die Holzerfaserung einerseits sowie die Imprägnierung und Modifizierung der Holzfasern mit Löschkalk andererseits werden also gleichzeitig in einer Prozessstufe mit dem Doppelschneckenzerfaserer realisiert. Das wäre mit anderen Zerfaserungsmaschinen (Refiner) nicht mit dieser Intensität möglich. Der Doppelschneckenzerfaserer (Doppelschneckenextruder) ist eine effiziente Zerfaserungsmaschine. Er ist zudem im Vergleich zu vielen traditionellen Mischern ein wirksameres Mischaggregat, und er dient außerdem als Reaktor für Vorreaktionen. Er erfüllt damit das Ziel der Forschungsarbeiten: Entwicklung von Verfahren mit wenig Prozessstufen. Das Bild 2 zeigt einen Holz/Löschkalk-Faserstoff.

Von großer Bedeutung ist außerdem die Tatsache, dass die Rohstoffe bindungsmäßig aktiviert werden und diese Eigenschaftsänderung ohne Rohstoffumwandlungsverluste eintreten. Die Masse der Aufgabestoffe wird vollständig in die Finalprodukte überführt. Die genannten Fakten führen direkt oder indirekt zur Konzipierung einer Technologie mit geringem spezifischen Energiebedarf.

3. Dämpfung der imprägnierten Fasern

Durch die Dämpfung der imprägnierten Fasern mit Heißdampf erhöht sich die Druckplastizität des Faserstoffes durch Aufweichen. Das Lignin wird dabei gleichzeitig als Bindemittel aktiviert und mobilisiert. Weitere Pflanzeninhaltsstoffe, wie zum Beispiel die Tannine der Rinde, werden ebenfalls in ihrer Bindewirkung aktiviert. Die Dämpfung ist ein wichtiger Verfahrensschritt zur Erzielung einer hohen Pressformkörperqualität.

4. Trocknung der imprägnierten und gedämpften Fasern in einem Durchströmungstrockner

Es hat sich bewährt, die mit Löschkalk imprägnierten und modifizierten Fasern in einem Durchströmungstrockner auf den optimalen Verpressungsfeuchtegehalt herunterzutrocknen. Die schnelle und allseitige Erwärmung und Trocknung der Holzfasern in einer durchströmten Schicht intensiviert den löschkalkbedingten Modifizierungseffekt. Durch diese Trocknungsart wird gleichzeitig eine weitere, wertvolle Modifizierung der Holzfasern erreicht. Infolge des Ausschwitzens holzeigener Wachse und Harze sowie einer Denaturierung von Eiweißen werden die hydrophilen Eigenschaften des getrockneten Faserstoffes in starkem Maße zurückgedrängt. Damit werden die Holzfasern hydrophober und widerstandsfähiger gegen mikrobiellen Abbau. Außerdem verbessern sich dadurch seine Verarbeitungseigenschaften für die Herstellung von plattenförmigen Werkstoffen.

5. Herstellung des Endproduktes durch Hochdruckverdichtung

Die hydro-mechanische Zerfaserung, die Konditionierung mit Löschkalk, die Dämpfung mit Heißdampf und Konditionierung durch schnelle Trocknung in einer durchströmten Schicht sind Grundvoraussetzungen dafür, dass sich der Holzfaserstoff durch Hochdruckverdichtung zu plattenförmigen Werkstoffen mit hoher Qualität verarbeiten lässt. Wichtig ist die Anwendung hoher Pressdrücke von $p \geq 100$ MPa. Der Pressraum der Presse wird unter diesen Prozessbedingungen zum mechano-chemischen und thermo-chemischen Feststoffreaktor. Die Hochdruckverdichtung vereinigt in sich die Prozessstufen der Formgebung und der Feststoffsynthese durch Festkörperreaktionen.

Die hohe Produktqualität entsteht durch das Auslösen von sehr festen formschlüssigen Verbindungen und Festkörperbrücken sowie von Haupt- und Nebervalenzbindungen. Nebenprodukte oder Emissionen entstehen dabei nicht.

Die neue Grundtechnologie (Bild 3) zeichnet sich durch folgende Vorteile aus:

1. Umwandlung von billigen Holznebenprodukten und Löschkalk bzw. kalkhaltigen Rohstoffen in feste Werkstoffe ohne Einsatz von synthetischen Leimen oder Kunststoffen.
2. Realisierung der hydro-mechanischen Zerfaserung, der Aktivierung und Modifizierung der Fasern sowie der mechano-chemischen und thermo-chemischen Feststoffsynthese mit wenigen Prozessstufen und relativ einfachen Maschinen ohne erhöhten Aufwand an Sicherheitstechnik.

- | | |
|----------------------------------|---|
| Aufschlussmaschine: | Doppelschneckenzerfaserer, |
| Trocknung des Faserstoffes: | z.B. Bandrockner mit Auflockerungs-
vorrichtungen oder Fluidrockner, |
| Pressverdichtung und Formgebung: | Hydraulisch betriebene Pressen. |
3. Anordnung der Maschinen auf einer Ebene in Flachbauten ohne Bedarf an besonders festen Fundamenten.
 4. Herstellung von weitestgehend fertig geformten Werkstoffen ohne aufwendige und energieintensive Nachbearbeitung.
 5. Vollständige Rohstoffverwertung zum Finalprodukt ohne Stoffumwandlungsverluste.
 6. Kein Anfall von Nebenprodukten und Schadstoffemissionen.
 7. Geringer Aufwand an Fördertechnik und Entstaubungsanlagen.

3.2. Pressformkörper aus Holznebenprodukten bzw. Hanfstroh und Löschkalk

Die Untersuchungen wurden hauptsächlich mit Holzhackschnitzeln aus Fichtenholz durchgeführt, wie sie von der Forstwirtschaft im Erzgebirge zur Verfügung gestellt werden. Die Hackschnitzel bestehen zum größten Teil aus jungem Splintholz. Außerdem enthalten sie auch kleinere Anteile an Rinden und Fichtennadeln. Das Fichtenholz hat eine relativ hohe Porosität und eine geringe Rohdichte.

Ergänzende Versuche wurden zudem mit Hanfstroh (Ganzpflanze) durchgeführt, weil der Anbau und die Verwertung von Hanf gegenwärtig eine aktuelle agrarpolitische Aufgabenstellung darstellt. Mit positiven Ergebnissen würde zugleich der Nachweis erbracht, dass die neue Technologie auch auf Strohrohstoffe übertragbar ist.

Das Hanfstroh besteht vorrangig aus etwa 25 % Hanffasern und durchschnittlich 75 % Hanfschäben. Bei den traditionellen Verarbeitungstechnologien werden nur die Hanffasern verwertet. Die Hanfschäben sind Abfallprodukte. Die Konzentration der Erzeuger- und Verarbeitungskosten auf nur 25 Ma.-% des Ausgangsrohstoffes beeinträchtigt die Wirtschaftlichkeit. Deshalb ist eine Verarbeitung anzustreben, bei der der Hanf ohne Aufschluss (Rösten, Faserabtrennung) als Ganzpflanze zu hochwertigen Produkten für neue Einsatzgebiete verwertet werden kann. Die Forschungsarbeiten sollen dazu einen Beitrag leisten.

Als Löschkalk wurde ein handelsübliches pulverförmiges Kalziumhydroxid eingesetzt.

Es wurden eine Vielzahl an Versuchen nach der im Bild 3 angegebenen Grundtechnologie durchgeführt, um in deren Rahmen optimale Herstellungsbedingungen zu erkunden. Im Folgenden werden nur ausgewählte Ergebnisse vorgestellt.

Grundvoraussetzung für die Erzeugung fester plattenförmiger Werkstoffe ist die Einhaltung des optimalen Holz/Löschkalk- bzw. Hanf/Löschkalkverhältnisses von etwa 60 : 40, wobei zu beachten ist, dass das Verhältnis feuchte Faserrohstoffe mit $w \approx 45 \%$ zugrunde legt. Unter dieser Bedingung entstehen druck- und biegefesten Presswerkstoffe bei Anwendung folgender weiterer Verfahrensparameter:

- Trocknung des Pressgutes (Trockenschrank) auf einen Feuchtegehalt von $w = 3 - 6 \%$, ohne vorherige Dämpfung,
- Nachzerkleinerung des Holz/Löschkalk- bzw. Hanf/Löschkalk-Faserstoffes mit einer Schlagsamenmühle mit Conidur-Austragssieb ($d_A \leq 2 \text{ mm}$),
- Vorwärmung des Pressgutes auf eine Temperatur von $\vartheta_p = 80 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Temperatur der Pressform $\vartheta_{\text{Form}} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Pressdruck $p = 100 \text{ MPa}$,
- Pressdauer $t_p \geq 60 \text{ s}$,
- Pressformkörper-Format 100 x 60 x 18 mm.

Rohstoff	Biegefestigkeit	Druckfestigkeit
	σ_p in MPa	σ_p in MPa
60 % Holz ($w \approx 45 \%$) + 40 % Löschkalk	22,3	191
60 % Hanfstroh ($w \approx 45 \%$) + 40 % Löschkalk	46,4	223

Durch die hohe Temperatur der Pressform werden unter den Bedingungen des anhaltend hohen Pressdruckes mechano-chemische und thermo-chemische Reaktionen ausgelöst, die von festigkeitsprägender Bedeutung sind. Die Biegefestigkeit der Platten ist beim Holz hoch und beim Hanfstroh sogar sehr hoch. Die wichtigste vorteilhafte Eigenschaft ist aber die außergewöhnlich hohe Härte und Druckfestigkeit der Pressformkörper. Die Druckfestigkeit und die Härte ist beträchtlich höher als die von gewachsenem Hartholz, unabhängig davon, ob die σ_p -Prüfung beim Naturholz senkrecht oder parallel zur Faserrichtung durchgeführt wird.

Die Wasserbeständigkeit dieser Pressformkörper mit den oben genannten Eigenschaften ist jedoch unzureichend. Nach einer Wässerungsdauer von etwa einer Stunde sind erste Zerfallserscheinungen erkennbar. Nach einer Wässerungsdauer von drei Stunden sind die Pressformkörper in der Mitte aufgerissen. Die beiden Spalthälften sind in sich noch fest. Dieses Phänomen hat stoffliche und presstechnische Gründe. Verallgemeinernd kann man sa-

gen, dass die Formkörper in ihrer Struktur noch zu viele nicht abgebundene Bindungspotentiale haben, an die sich Wassermoleküle anlagern können. Dadurch kommt es bei der Wässerung zu einer gefügeschädigenden Quellung.

Eine Reduzierung der freien Bindungspotentiale und damit eine Verbesserung der Wasserbeständigkeit konnte durch folgende Maßnahmen erreicht werden:

- Thermische Vorbehandlung des Holz/Löschkalk-Faserstoffes durch Dämpfen bei erhöhten Temperaturen von ≥ 125 °C.
- Verpressung des Holz/Löschkalk-Faserstoffes in einer Pressform, aus der die bei $\vartheta_{Form} = 160$ bis 180 °C entstehenden Gase und der Wasserdampf austreten können. Das kann z.B. durch den Einsatz einer Lochmatrize mit aufgelegten Nullspalt-Siebblech im Bereich des Unterstempels erreicht werden.
- Verpressung des Holz/Löschkalk-Faserstoffes nach einem Pressregime, dass eine partielle Gas- und Dampfabführung durch kurzzeitige Druckentlastung in der Hauptverdichtungsphase sowie durch eine langsamere Rückexpansion am Ende des Verdichtungsprozesses ermöglicht. Bewährt haben sich z.B. folgende Pressregime:

Pressregime 1		Pressregime 2	
t_p in s	p in MPa	t_p in s	p in MPa
0 - 30	100	0 - 15	100
30 - 40	50	15 - 30	50
40 - 100	100	30 - 45	100
100 - 10	60	45 - 60	30
110 - 120	30	60 - 75	5

- Zusatz geringer Mengen an Eiweißen in Form von z.B. 5 %-igem Quarkwasser als Konditionierungsstoff.
- Erhöhung des Wassergehaltes des Pressgutes auf $w = 12,5$ %.

Die Ergebnisse der Versuche, bei denen diese Maßnahmen realisiert wurden, sind in den Bildern 4 und 5 zusammengefasst.

Der Einsatz von Konditionierungsstoffen z.B. in Form von verdünntem Quarkwasser ist vorteilhaft. Der qualitätsverbessernde Effekt ist aber für eine praktische Nutzung zu gering.

In den bislang dargelegten Versuchen erfolgte die Trocknung der konditionierten Faserstoffe auf den Verpressungsfeuchtegehalt stets in einem Trockenschrank bei 100 °C unter den Bedingungen einer überströmten Schicht. Führt man jedoch die Trocknung bei höheren Temperaturen von ≥ 140 °C und unter den Bedingungen einer durchströmten Schicht durch,

so lassen sich noch weitere Qualitätsreserven erschließen (Bild 6). Mögliche Effekte, die bei dieser Art der Trocknung zur Qualitätsverbesserung führen können, wurden bereits genannt. Die Pressformkörper erreichen folgende Biegefestigkeiten:

- vor der Wässerung: $\sigma_b = 52,6 \text{ MPa}$
- nach 24 h Wässerung: $\sigma_b = 43,4 \text{ MPa}$.

Das sind Ergebnisse, die schon erhöhten Ansprüchen genügen. Ein geringer Abfall der σ_b -Werte ist nach langer Wässerung nie zu vermeiden. Die Pressformkörper überstehen die Lagerung im Wasser ohne erkennbare Veränderungen. Es waren keine Risse und keine Veränderungen in den Abmaßen erkennbar. Selbst die scharfen Kanten der Pressformkörper bleiben trotz langer Wässerung sehr fest. Ein vollständiger Schutz kann durch Beschichtung oder Farbanstrich erzielt werden.

Das Optimierungspotential der Technologie zur Herstellung von Pressformkörpern aus Holz bzw. Hanfstroh einerseits und Löschkalk andererseits ist bei jedem Verfahrensschritt noch sehr groß. Eine weitere „Feinoptimierung“ wird dann notwendig werden, wenn dieser neue Werkstoff für spezielle Einsatzgebiete produziert werden soll. Zusammenfassend können als das Ergebnis der bisherigen Untersuchungen folgende optimale Verfahrensbedingungen angegeben werden:

1. Aufschluss und Vermischung von 60 % Holzhackschnitzel oder Hanfstroh ($w \approx 45 \%$) und 40 % Löschkalk (wf) durch Nassaufschlussmahlung mit einem Doppelschneckenzerfaserer bei $\vartheta_M \approx 100 \text{ °C}$.
Der Löschkalk muss vorher mit Wasser aufgeweicht werden.
2. Dämpfung des Faserstoffes (Dampf Temperatur $\geq 130 \text{ °C}$).
3. Trocknung des Faserstoffes in einer durchströmten Schicht mit Trocknungsgasen von $\vartheta \approx 150 \text{ °C}$ (in durchströmter ruhender oder durchströmter bewegter Schicht) auf $w \approx 10$ bis 12% .
4. Nachzerkleinerung des Faserstoffes mit einer Schlagnasenmühle zur Auflockerung von verkrusteten Oberflächen und zur Zerkleinerung von zu grob gebliebenen Fasern (Mühlenaustragssieb $d_A \leq 2 \text{ mm-Conidur}$).

5. Vorwärmung des Gutes auf $\vartheta_p = 80 \text{ °C}$ und Verpressung des Faserstoffes mit Formtemperaturen von $\vartheta_{\text{Form}} \approx 180 \text{ °C}$ (im kontinuierlichen Produktionsprozess keine gesonderte Prozessstufe, weil das Gut bei der Trocknung aufgewärmt wurde).
6. Verpressung nach einem Pressregime mit variabler Druckeinstellung und langsamer Druckentlastung am Ende des Pressprozesses. Maximaler Pressdruck 100 MPa.
7. Verpressung des Faserstoffes in einer Pressform, aus der während des Verdichtungsprozesses Gase und Dämpfe austreten können (z.B. Unterstempel in Form einer Lochmatrize mit aufgelegtem Nullspaltsieb).

Die Bilder 7 und 8 zeigen unter diesen Bedingungen hergestellte Pressformkörper aus Holzhackschnitzeln Fichte bzw. Hanfstroh, die folgende Eigenschaftsmerkmale aufweisen:

1. Sehr hohe Biegefestigkeit.

Die Messwerte variieren im Bereich von (Format 100 x 60 x 18 mm) $\sigma_b \approx 45$ bis 55 MPa.

2. Gute bis sehr gute Wasserbeständigkeit.

Die Pressformkörper haben nach einer Wässerungsdauer von 24 Stunden noch feste Kanten. Sie sind rissfrei und die Abmaße bleiben konstant. Die prozentuale Restbiegefestigkeit beträgt nach 24 h Wässerung $\geq 90 \%$.

3. Sehr hohe Härte.

Die Brinellhärte nach DIN 50651 beträgt $HB \approx 29 - 33$ (Kugeldurchmesser 2,5 mm). Unter vergleichbaren Bedingungen wurde für Eichenholzbretter ein Wert von $HB = 2,8$ ermittelt.

4. Nagelbar, aber nur nach Vorbohren.

5. Rohdichte $\rho_{\text{roh}} \approx 1,65 \text{ g/cm}^3$.

6. Das Bohren oder Sägen ist nur mit diamantbesetzten Werkzeugen möglich.

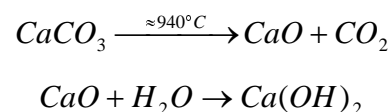
Das Bild 9 zeigt den Sägeschnitt durch drei verleimte Pressformkörper mit den Abmaßen von jeweils 240 x 120 x 10 mm.

7. Sehr fest verleimbar z.B. mit Epoxidleim (Bild 9).

3.3. Pressformkörper aus Holznebenprodukten und Kraftwerksasche

Charakterisierung der Aschen

In den neuen Bundesländern wurden in den letzten Jahren mehrere moderne Kraftwerke in Betrieb genommen. Die Flugaschen dieser mit Weichbraunkohle befeuerten Kraftwerke werden stofflich nur in geringen Mengen genutzt, obwohl es sich um Prozessnebenprodukte handelt, die für eine Verkipfung im Tagebau eigentlich zu schade sind. Die meisten Aschen haben einen mehr oder weniger hohen Anteil an freiem Branntkalk (CaO) und Gips-Anhydrit (CaSO₄). Da diese Rohstoffkomponenten wertvolle Bindestoffe sind, sollte im Rahmen dieses Projektes geprüft werden, ob wenigstens die Braunkohlenfilteraschen mit besonders hohen CaO-Gehalten für die Herstellung von Pressformkörpern aus Holz und Asche geeignet sind. Die Aschen werden als Alternativrohstoff für Löschkalk verwendet, der sich für die Herstellung von Holz/Löschkalk-Werkstoffen bewährt hat. Bei einem positiven Ergebnis würde für die Herstellung der Pressformkörper im Vergleich zur Verfahrensvariante mit Löschkalk Energie gespart, weil die Aschen als Abprodukt direkt im Anfallzustand ohne Veredlung einsetzbar sind. Im Gegensatz dazu wird für die Herstellung von Löschkalk Hochtemperatur-Energie benötigt:



Für die Untersuchungen wurde auf Empfehlung der LAUBAG hauptsächlich Asche aus dem Heizwerk Laubusch verwendet. Des Weiteren wurden Aschen aus den Kraftwerken Lippendorf und Wähltitz getestet. Die ausgewählten Aschen unterscheiden sich in der Entstehung wie folgt:

Asche Laubusch:

Verbrennung von Brennstaub mit $w \approx 9\%$ aus asche- und schwefelarmer miozäner Weichbraunkohle mit erhöhtem Eisengehalt. Vermischung des Brennstaubes vor der Verbrennung mit Löschkalk als Additiv für die Einbindung von Schwefel in die Asche. Verbrennung des Kohlenstaubes in einem Heizwerk.

Asche Lippendorf:

Verbrennung von eozäner Rohbraunkohle mit erhöhtem Schwefelgehalt. Verbrennung der Kohle in einem Großkessel.

Asche Wähilitz:

Verbrennung von eozäner Rohbraunkohle mit erhöhtem Schwefelgehalt in einem Kessel mit zirkulierender Wirbelschicht. Als Additiv für die Schwefeleinbindung in die Asche wird feinkörniger Kalkstein verwendet. Die Kohle wird im Kessel bei einer relativ niedrigen Temperatur von etwa 850 °C verbrannt. Die Verweildauer der Asche (Kohleasche + CaCO₃ - Additiv) ist vergleichsweise sehr groß.

Für die Aschen wurden folgende Oxid-Analysen ermittelt:

Oxide	Heizwerk Laubusch	Kraftwerk Lippendorf	Kraftwerk Wähilitz	
	Staubfeuerung	Mühlenfeuerung	zirkulierende Wirbelschicht	
			Asche - fein	Asche - grob
Oxid-Anteile in %				
MgO	6,17	5,56	2,84	1,23
Al ₂ O ₃	6,52	8,81	6,96	3,02
SiO ₂	7,54	24,26	6,70	9,34
SO ₃	9,09	13,77	29,40	34,57
CaO	49,52	40,96	51,03	50,01
Fe ₂ O ₃	20,1	5,14	3,08	1,83
K ₂ O	0,62	0,64	-	-
TiO ₂	-	0,86	-	-
MnO	0,43	-	-	-

Alle Aschen zeichnen sich durch einen hohen CaO-Gehalt von 40 bis 50 % aus. Das CaO ist zu einem großen Teil mit dem in der Analyse als SO₃ ausgewiesenen Schwefel zu CaSO₄ gebunden. Der SO₃-Gehalt ist bei der Asche Wähilitz besonders hoch. Für die Asche Laubusch wird wenig SO₃ ausgewiesen. Sie zeichnet sich folglich durch einen hohen Gehalt an „freiem CaO“ aus. Das ist der wichtigste Grund für die bevorzugte Verwendung dieser Asche für die Untersuchungen. Die Asche Laubusch hat zudem einen relativ hohen Gehalt an Fe₂O₃.

Die Ergebnisse der Röntgenbeugungsanalyse in Tabelle 1 bestätigen für die Asche Laubusch den hohen Gehalt an freiem CaO. Das CaO ist nur wenig versintert, weil es sich um eine relativ kleine Staubfeuerungsanlage mit kurzer Verweildauer der Asche im Verbrennungsraum und im Vergleich zu Kesseln von Großkraftwerken mit niedrigeren Feuerraumtemperaturen handelt. Das CaO ist deshalb sehr reaktiv und damit für Bindeprozesse direkt nutzbar. Ein Beweis dafür ist die starke Erwärmung der Asche bei Wasserzugabe, wenn das CaO in Ca(OH)₂ umgewandelt wird. Die Asche Laubusch enthält nach Tabelle 1 sogar Löschkalk, der durch die Reaktion von CaO mit Luftfeuchtigkeit entstanden ist. Sie enthält

zudem CaSO_4 (Anhydrit). Der Anteil des Anhydrites ist aber niedriger als bei den anderen genutzten Aschen. Dafür ist das Anhydrit wegen der niedrigen Feuerraumtemperaturen nur wenig versintert und somit bindungsfähiger. Die Asche Laubusch ist für die Herstellung der Pressformkörper besonders geeignet.

Die Asche Lippendorf hat ebenfalls einen hohen Gehalt an freiem CaO (Tabelle 1), das aber wegen der hohen Temperaturen im Großkessel stark versintert (verglast) ist. Ein Beweis dafür ist die ausbleibende Erwärmung der Asche bei der Befeuchtung mit Wasser. Die Asche Lippendorf hat im Vergleich zur Asche Laubusch einen deutlich höheren Gehalt an Gips-Anhydrit, der aber ebenfalls stärker versintert („totgebrannt“) ist. Die Asche Lippendorf erlangt erst dann bindende Eigenschaften, wenn die Versinterung (Verglasung) des CaO und des CaSO_4 durch Intensivzerkleinerung aufgehoben wird.

In den Kraftwerken mit zirkulierender Wirbelschicht fallen durch Separiereffekte Aschen mit sehr unterschiedlicher Feinheit an (Grob- und Feinasche). Beide Aschen bestehen vorwiegend aus Gips-Anhydrit, dessen Anteil in der Feinasche etwas geringer als in der Grobasche ist. Des Weiteren enthalten beide Ascheproben freies CaO . Der Branntkalk und das Anhydrit sind aber viel stärker versintert, als es bei den tiefen Feuerraumtemperaturen zu erwarten wäre. Die starke Versinterung findet trotz der niedrigen Feuerraumtemperaturen von nur ≈ 850 °C statt, weil die Verweildauer der Asche in der heißen Zone sehr lang ist und teilweise über mehrere Stunden andauern kann. Bei der Befeuchtung der Grobasche Wähllitz mit Wasser ist keine Erwärmung feststellbar. Bei der Feinasche ist eine geringe Erwärmung feststellbar. Die Aschen erwärmen sich erst dann bei Wasserzugabe stark, wenn die Versinterung des Branntkalkes und des Anhydrites durch Intensivmahlung zerstört wird.

Die ausgewählten Aschen zeichnen sich durch eine hohe Feinheit aus. Die Grobasche aus dem Kraftwerk Wähllitz hat eine Körnung von $\Delta d = 0$ bis 1,25 mm. Die mittlere Korngröße beträgt $d_m = 0,38$ mm. Alle übrigen Aschen haben eine wesentlich höhere Feinheit. Die Asche Laubusch und die Feinasche Wähllitz haben eine Körnung von etwa 0 bis 100 μm und die Asche Lippendorf von $\Delta d \approx 0$ bis 250 μm . Die Bilder 10 und 11 verdeutlichen die großen Unterschiede in der Feinheit der Aschen.

Das Potential zur Holzmodifizierung sowie das latente Bindevmögen der Aschen kann bei mehr oder weniger starker Versinterung der Stoffe CaO und CaSO_4 erst dann für die Herstellung von Pressformkörpern genutzt werden, wenn die Aschen durch intensive Zerkleinerung aktiviert werden. Es wurden folgende Aktivierungsbedingungen getestet:

1. Dispergierung von Asche und Wasser im Eirich-Intensivmischer bei verlängerter Mischdauer und hoher Drehzahl des Wirblers.
2. Aufschlussmahlung von Asche und Wasser mit der Schwingmühle.

Die wesentlichen Versuchsergebnisse sind:

1. Für die Asche Laubusch genügt der Aufschluss mit dem Eirich-Intensivmischer. Das Mischgut aus Asche und Wasser wird nach kurzer Zeit extrem heiß und bindet danach bei der Lagerung schnell ab. Die wesentlich intensivere Nassaufschlussmahlung in der Schwingmühle wäre vorteilhaft, sie ist aber nicht unbedingt notwendig.
Ähnlich positive Ergebnisse wurden bei der Aktivierung der Feinasche Wähltitz im Eirich-Intensivmischer erzielt. Die Erwärmung war nur etwas geringer.
2. Die Asche Lippendorf und die Grobasche Wähltitz werden nur durch eine Intensivzerkleinerung mit Schwingmühlen aktiviert. Während der Nassaufschlussmahlung in der Schwingmühle erwärmt sich das Mahlgut aus Asche und Wasser stark.

Herstellung der Pressformkörper

Die Untersuchungen haben bestätigt, dass hochfeste Pressformkörper aus Holz und Asche herstellbar sind, wenn

1. das Masseverhältnis von Holz und Asche so eingestellt wird, wie es sich für das Stoffsystem von Holz und Löschkalk bewährt hat:
60 % Holzhackschnitzel ($w \approx 45\%$) + 40 % Asche,
2. die Aufbereitungsbedingungen für den Faserstoff und die Verpressungsbedingungen genauso eingestellt werden, wie sie für das Stoffsystem Holz und Löschkalk ermittelt wurden.

Das Bild 12 enthält Biegefestigkeitswerte von Pressformkörpern aus Holz und Asche Laubusch. Die Herstellungsbedingungen waren:

- Zerfaserung der Holzhackschnitzel (Fichte) im Doppelschneckenzerfaserer unter Zusatz von 40 % Asche (w_f) in Form von Trockenasche bzw. in Form einer aktivierten Suspension (Asche : Wasser = 1 : 1,5).
- Trocknung des Holz/Asche-Faserstoffes im Trockenschrank bei 100 °C unter den Bedingungen einer überströmten Schicht auf optimale Verpressungsfeuchtegehalte von $w = 10 - 12\%$.

- Nachzerkleinerung des getrockneten Faserstoffes zur Auflockerung mit einer Schlagmühle mit Mühlenaustragssieb ($d_A = 1,5 \text{ mm}$ Conidur).
- Vorwärmung des Pressgutes auf die Verpressungstemperatur von $\vartheta_p = 80 \text{ °C}$.
- Temperatur der Pressform und des Oberstempels $\vartheta_{\text{Form}} = 160 \text{ °C}$ und 180 °C .
- Lochmatrize und Nullspaltsieb als Unterstempel ohne Beheizung.
- Verpressung nach dem Pressregime 1: (0 - 30 s: $p = 100 \text{ MPa}$, 30 - 40 s: $p = 50 \text{ MPa}$, 40 - 100 s: $p = 100 \text{ MPa}$, 100 - 110 s: $p = 60 \text{ MPa}$, 110 - 120 s: $p = 30 \text{ MPa}$).
- Format 100 x 60 x 18 mm.

Die Ergebnisse in Bild 12 verdeutlichen die große qualitätsverbessernde Wirkung, die durch die Aktivierung der Asche Laubusch mit Wasser im Eirich-Intensivmischer erschlossen wird. Die Biegefestigkeit der Pressformkörper ist viel geringer, wenn das Holz mit trockener Asche im Doppelschneckenzerfaserer zerkleinert wird. Das ist auch dann der Fall, wenn bei der Zerkleinerung im Doppelschneckenzerfaserer genügend Wasser für die Dispergierung der Asche vorhanden ist.

Die mit aktiver Aschesuspension erzeugten Pressformkörper zeichnen sich trotz fehlender Dämpfung und Durchströmungstrocknung des Faserstoffes insgesamt durch eine hohe Festigkeit und Wasserbeständigkeit aus. Die Biegefestigkeit verringert sich auch nach einer Wässerungsdauer von 24 Stunden nicht. Teilweise ist sogar eine geringe Erhöhung der σ_b -Werte durch die Wässerung feststellbar.

In weiteren Versuchen zur Pressformkörperherstellung wurden neben der Asche Laubusch auch die Aschen aus den Kraftwerken Lippendorf und Währlitz einbezogen. Die Ergebnisse enthält das Bild 13. Alle Aschen wurden als Suspensionen eingesetzt. Bei den Aschen Laubusch und Feinasche Währlitz genügte die Dispergierung im Intensivmischer zur Aktivierung (Asche/Wasser = 1 : 1,5). Für die Asche Lippendorf und die Grobasche Währlitz war dieser Aufschlussprozess allein nicht ausreichend. Deshalb wurden diese Aschen vor der Dispergierung in Wasser zusätzlich trocken in der Schwingmühle aktiviert. Im Unterschied zu den im Bild 12 ausgewerteten Versuchen erfolgte die Trocknung des ungedämpften Faserstoffes in der durchströmten Schicht bei 150 °C . Nach 2 Tagen Lagerung wurden an den ungewässerten bzw. 6 h oder 48 h gewässerten Pressformkörpern folgende Biegefestigkeiten gemessen:

Biegefestigkeit	Ascheart			
	Laubusch	Lippendorf	Feinasche Währlitz	Grobasche Währlitz
σ_b in MPa	42,3	37,2	50,2	42,4
σ_{b6} in MPa	36,7	33,2	44,2	40,5
σ_{b48} in MPa	34,2	27,2	37,2	30,2

Die wichtigsten, von diesen Ergebnissen abzuleitenden allgemeinen Erkenntnisse sind:

- Die Biegefestigkeit der Pressformkörper erhöht sich um etwa 15 bis 20 %, wenn die Holz/Asche-Faserstoffe statt in einer überströmten Schicht bei 100 °C in einer durchströmten Schicht bei 150 °C getrocknet werden.
- Mit allen getesteten Aschen können Pressformkörper mit hoher Biegefestigkeit und guter Wasserbeständigkeit erzeugt werden. Besonders feste Pressformkörper entstehen beim Zusatz der Asche Laubusch und der Feinasche Wähllitz. Die Biegefestigkeit der Pressformkörper ist aber auch beim Zusatz der Aschen Lippendorf und Grobasche Wähllitz noch hoch.
- Die Verlängerung der Lagerungsdauer von 2 auf 7 Tage hat auf die Biegefestigkeit der Pressformkörper im Gesamtdurchschnitt keinen großen Einfluss. Die Pressformkörper benötigen keine lange Nachhärtungsphase.
- Alle Pressformkörper zeichnen sich durch eine gute bis sehr gute Wasserbeständigkeit aus. Nach einer Wässerungsdauer von 48 Stunden ist keine Expansion, keine Rissbildung und keine Auflockerung der Kanten der Pressformkörper feststellbar. Mit den Aschen Laubusch und Wähllitz (Feinasche) wurden diesbezüglich die besten Ergebnisse erzielt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass alle untersuchten Aschen im aktivierten und dispergierten Zustand sehr hochwertige Modifizierungs-, Füll- und Bindestoffe für die Herstellung von Pressformkörpern aus Holz sind. Die Festigkeit und Wasserbeständigkeit der Pressformkörper ist unter vergleichbaren Bedingungen nur wenig geringer als bei der Verwendung von Löschkalk. Die billigeren Aschen sind für dieses Anwendungsgebiet zum Löschkalk eine fast gleichwertige Alternative. Es ist zu erwarten, dass durch Dämpfen der Holz/Asche-Faserstoffe vor der Durchströmungstrocknung noch eine weitere Qualitätsreserve für die Pressformkörper erschlossen werden kann.

Ausgewählte Eigenschaften der Pressformkörper

Zur Bestimmung ausgewählter Eigenschaftsmerkmale wurde eine größere Anzahl Pressformkörper aus Holzhackschnitzeln Fichte und Asche Laubusch hergestellt.

Herstellungsbedingungen:

- Aktivierung der Asche mit Wasser (Asche : Wasser = 1 : 1,5) im Eirich-Mischer.
- Zerkleinerung und Vermischung im Doppelschneckenzerfaserer. Mengenverhältnis 60 % Hackschnitzel ($w \approx 45\%$), 40 % Asche (wf) zugesetzt als Suspension.
- Trocknung des Holz/Asche-Faserstoffes in der durchströmten Schicht bei $\vartheta_{Tr} \approx 150\text{ °C}$ auf $w = 11,2\%$ und Nachzerkleinerung mit der Schlaghasenmühle, $d_A = 1,25\text{ mm}$,
- Verpressung: $\vartheta_p = 80\text{ °C}$, $\vartheta_{Form} = 180\text{ °C}$, Lochmatrize und Nullspaltsieb als Unterstempel ohne Beheizung, Verdichtung nach Pressregime (0 - 15 s: $p = 100\text{ MPa}$, 15 - 30 s: $p = 50\text{ MPa}$, 30 - 45 s: $p = 100\text{ MPa}$, 45 - 60 s: $p = 30\text{ MPa}$, 60 - 75 s: $p = 5\text{ MPa}$).
- Format 240 x 120 x 25 mm.

Eigenschaftsmerkmale:

1. Biegefestigkeit $\sigma_b = 39,4\text{ MPa}$.

Die Biegespannung steigt von Beginn an nahezu linear bis zum Bruch ohne plastische Verformung. Es wurde ein E-Modul von 1571 MPa ermittelt. Die Dehnung bei der Biegebeanspruchung beträgt 1.11 %.

2. Biegefestigkeit nach 24 Stunden Wässerung $\sigma_{b24} = 35,7\text{ MPa}$.

3. Biegefestigkeit nach 6 Wochen Lagerung $\sigma_{b6W} = 38,5\text{ MPa}$.

4. Biegefestigkeit nach Aufheizung auf 100 °C (2 Stunden), Messung bei der Prüfkörpertemperatur von 100 °C: $\sigma_{b100} = 32,7\text{ MPa}$.

5. Biegefestigkeit nach Aufheizung bis 100 °C (2 Stunden), Messung nach Abkühlung: $\sigma_{b100/20} = 39,5\text{ MPa}$.

6. Biegefestigkeit nach Abkühlung auf -18 °C, Messung bei einer Prüfkörpertemperatur von -18 °C: $\sigma_{b(-18)} = 28,9\text{ MPa}$.

7. Rohdichte $\rho_{roh} = 1,48\text{ g/cm}^3$.

8. Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wurde mit beidseitig überlappenden Prüfstempeln ermittelt, wie es bei der Prüfung von Baustoffen üblich ist. Wegen der großen Druckfläche von 240 x 120 mm

waren bei einer begrenzten Belastbarkeit der Prüfpresse von $F_{\max} = 500 \text{ kN}$ die Prüfkörper nur bis $\sigma \approx 17,5 \text{ MPa}$ beanspruchbar. Bei dieser trotzdem hohen Druckspannung (1750 t/m^2) blieben alle Prüfkörper rissfrei.

Bei der Prüfung wurden jeweils 3 übereinander gestapelte Prüfkörper mit einer Gesamthöhe von $h \approx 115 \text{ mm}$ gedrückt, weil die einzelnen Pressformkörper zu flach sind.

Das Bild 14 zeigt die Kennlinie $\sigma = f(s)$, die bei der Druckbelastung der Prüfkörper aufgenommen wurde. Für den Vergleich ist auch die Kennlinie für die Pressformkörper mit Löschkalk eingetragen. Der Druckanstieg ist bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit des Prüfstempels in beiden Fällen zunächst gleich. Während der Anfangsbelastung werden vor allem die geringen Fugenabstände zwischen den 3 Pressformkörpern vermindert. Ab $s \approx 1 \text{ mm}$ beginnt die eigentliche Feststoffkompression mit einem nahezu linearen Anstieg der σ - s -Kennlinien. Bei $s = 4,6 \text{ mm}$ bzw. $s = 4,1 \text{ mm}$ schaltet die Prüfpresse kurz vor F_{\max} ab. Die Pressformkörper mit einer anfänglichen Gesamtstärke von $h = 115 \text{ mm}$ werden bei der sich hier einstellenden Druckbelastung von $\sigma_{\max} \approx 17,5 \text{ MPa}$ bzw. $16,5 \text{ MPa}$ nur um etwa 3 % komprimiert. Während des Rücklaufes bleibt der Stempel in der Rückexpansionsphase bis $s = 1,5 \text{ mm}$ bzw. $s = 2,0 \text{ mm}$ bei nur geringem Druckabfall belastet. Danach wird die Rücklaufgeschwindigkeit des Prüfstempels größer als die Rückexpansionsgeschwindigkeit der Prüfkörper. Der Prüfstempel löst sich vom Prüfkörper. Die Rückexpansion ist in dieser Phase nicht beendet. Sie ist insgesamt nur wenig kleiner als die vorherige Kompression. Die Verdichtung bei Druckbelastung ist zumindestens bis $\sigma_{\max} = 17,5 \text{ MPa}$ bzw. $\sigma_{\max} = 16,5 \text{ MPa}$ praktisch vollständig reversibel.

9. Die Holz/Asche-Pressformkörper haben eine besonders hohe Härte. Die Brinellhärte nach DIN 50651 beträgt bei einem Kugeldurchmesser von $2,5 \text{ mm}$ $HB = 31,3$.

Unter vergleichbaren Prüfbedingungen beträgt die Brinellhärte für Eichenholzbretter $HB = 2,8$.

10. Für die Pressformkörper wurde eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,433 \text{ W/mK}$ ermittelt. Bei einem Holzanteil von 60 % ist dieser λ -Wert überraschend groß. Durch die intensive Verdichtung erlangt die Asche für die Wärmeleitfähigkeit eine dominierende Bedeutung. Das ist offenbar auch deshalb der Fall, weil die Asche mit dem Holz durchgängig vermischt ist. Dazu kommt, dass auch das Holz seine Dämmwirkung zunehmend verliert, wenn es zu einer fast porenfreien Substanz verdichtet wird.

11. Beim Bohren entstehen glatte Bohrlöcher ohne Ausbrüche auf der Ein- und Austrittsseite des Bohrers.

12. Die Pressformkörper sind z.B. mit Epoxydharz verleimbar. Außerdem lassen sie sich nach unterschiedlichen Verfahren beschichten:

Bild 15: Beschichtung mit UV-Klarlack (Perlmutter-Flitter)

Bild 16: Beschichtung mit Möbelfolie

Bild 17: Beschichtung mit Lefa-Material

Bild 18: Beschichtung mit Siebdruckauftrag

Bild 19: Beschichtung mit Rindsleder.

13. Heißfestigkeit

Aus Kostengründen wurde keine DIN-gerechte Prüfung durchgeführt. Das ist aber spätestens vor einem konkreten praktischen Einsatz der Pressformkörper erforderlich. Die Testversuche wurden mit einem Prüfofen (Eigenbau) zur Ermittlung der Heißfestigkeit von Agglomeraten durchgeführt (Bild 20). In den Prüfofen wurde jeweils ein Pressformkörper 240 x 120 x 30 mm auf die Längskante eingestellt. Beidseitig vom Pressformkörper sind regelbare Heizstäbe installiert. Die entstehenden Gase werden im Ofen von Heizspiralen gezündet. Folgende thermischen Prüfbedingungen wurden eingestellt:

- Aufheizung von 20 °C auf 500 °C mit einer Aufheizgeschwindigkeit von 10 K/min,
- 1 Stunde Beheizung bei 500 °C,
- Luftzufuhr in den Ofen zur Zündung von Gasen.

Prüfergebnis:

- ab etwa 390 °C leichte Qualmbildung,
- ab 420 °C Zündung erster kleiner lokaler Flammen mit einer Länge von ca. 15 mm,
- ab 420 °C bis zur Beendigung des Versuches nach 1 Stunde bei 500 °C weitere Ausbildung von lokal brennenden Flammen mit einer Länge von max. 25 mm; die Flammen wandern periodisch über die obere Längskante des Pressformkörpers; die Ausbreitung der Flammen über die gesamte Länge des Pressformkörpers findet nicht statt,
- Erlöschen der Flammen nach Ausschalten der Heizspiralen und Abkühlung der Heizkammer auf ≤ 470 °C.

Das Bild 21 zeigt die Seitenansicht eines Pressformkörpers nach der einstündigen Aufheizung bei 500 °C. Die Seitenflächen sind stark geschwärzt und aufgerissen. Bei mechanischer Beanspruchung fallen folienartige Flächenstücke ab. Der Formkörper ist im Inneren noch stabil, aber im Vergleich zu der sehr hohen Ausgangsfestigkeit deutlich geschwächt.

4. Niederdruckverdichtung von Holznebenprodukten und anorganischen Rohstoffen zu Formkörpern mit Bau- und Werkstoffeigenschaften

4.1. Charakterisierung des Verfahrens

Eine wichtige Voraussetzung für niedrigen Energieeinsatz sind Technologien, die aus wenigen und einfachen Prozessstufen bestehen. Es müssen Prozessstufen ohne Bedarf an Hochtemperaturenergie sein. Des Weiteren wäre es von Vorteil, wenn keine hohen Pressdrücke angewandt werden müssen. Die Einfachheit der Technologie darf jedoch nicht zu stark zu Lasten der Produktqualität gehen, weil neue Baustoffe nur dann eine Marktchance bekommen, wenn ihre Eigenschaften besser als die der vergleichbaren etablierten Baustoffe sind. Für die Pressformkörper aus Holznebenprodukten bedeutet das, dass sie eine hinreichende Biege- und Stoßfestigkeit, eine hohe Druckfestigkeit mit geringer Kompressions- und Kriechverformung bei Druckbelastung, eine hohe Wasser- und Wetterfestigkeit sowie gute Wärmedämmeigenschaften haben müssen.

Für die Entwicklung des Verfahrens der Niederdruckverdichtung, das im Vergleich zur Verfahrensentwicklung im Punkt 3 mit wesentlich geringeren Pressdrücken auskommen soll, wurde folgender Kompromiss vorgegeben:

1. Begrenzung des Pressdruckes bei der Herstellung der Formkörper auf $p \leq 25 \text{ MPa}$, damit Pressenergie eingespart wird und nach Möglichkeit kontinuierlich arbeitende Schneckenpressen oder Bandpressen zum Einsatz kommen können.
2. Herstellung von Pressformkörpern mit folgenden Mindestanforderungen:
 - Biegefestigkeit $\sigma_b \geq 3 \text{ MPa}$
 - Druckfestigkeit $\sigma_p \geq 30 \text{ MPa}$
 - Wasserbeständigkeit prozentuale Restbiegefestigkeit von $\geq 90 \%$
 - Wärmeleitfähigkeit $\lambda \approx 0,25 \text{ W/mK}$.

Als Füllstoff, Bindestoff und Modifikator für den Holzfaserstoff wird Kraftwerksasche eingesetzt, die sich als Alternative zum Löschkalk in den vorangegangenen Untersuchungen bereits bewährt hat. Das Verfahren der Niederdruckverdichtung umfasst folgende Verfahrensschritte:

1. Hydromechanische Aktivierung der Aschen

Die Aschen werden durch Nassaufschlussmahlung aktiviert. Geeignete Verfahren dafür sind z.B. die Nassaufschlussmahlung mit Schwingmühlen oder eine Rührdispergierung in einem Intensivmischer. Die notwendige mechanische Beanspruchung zur Aktivierung ist von der Zusammensetzung der Asche und von der Intensität der Versinterung der bindungsfähigen Aschebestandteile abhängig. Nach der hydromechanischen Aktivierung muss die Asche sofort verarbeitet werden, weil sie schnell abbindet.

2. Umwandlung der Holznebenprodukte in ein Zerfaserungsprodukt mit sehr guten Binde- und Verdichtungseigenschaften

Die Zerfaserung erfolgt mit dem Doppelschneckenzerfaserer. Die mit diesem Apparat zu erzielenden Effekte sowie die erreichbare Qualität des Holzfaserstoffes sind in Punkt 3.1. erläutert.

3. Dämpfung des Holzfaserstoffes

Es werden Dämpfungstemperaturen von ≥ 130 °C angewandt. Die Effekte der Dämpfung sind im Punkt 3.1. erläutert.

4. Vermischung des gedämpften Holzfaserstoffes mit dem Aschebrei

Um eine hohe Mischungshomogenität zu erzielen, müssen Intensivmischer eingesetzt werden. Es ist wichtig, dass die Holzfasern mit gelöster und kolloidal dispergierter Asche durchtränkt werden.

5. Pressformgebung des feuchten Mischgutes aus Holzfaserstoff und aktivierter Asche

Für das Verfahren der Niederdruckverdichtung ist markant, dass das Mischgut aus gedämpften feuchten Faserstoffen und hydromechanisch aktivierter Asche ohne vorherige Trocknung mit Wassergehalten von etwa 45 bis 55 % verdichtet wird. Das bietet den großen Vorteil, dass die Porosität des Formkörpers während und nach der Pressverdichtung immer vollständig mit Wasser ausgefüllt bleibt und chemische Abbindeprozesse in der Asche sowie zwischen Aschebestandteilen und den Faserstoffen in idealer Weise ausgelöst werden können. Das ist eine wichtige Voraussetzung für die Reduzierung des Pressdruckes auf $p \leq 25$ MPa. Bei der Verpressung von getrockneten Holz/Asche-Faserstoffen

mit einem Wassergehalt von $w \approx 5$ bis 12 % sind Pressdrücke von $p \geq 100$ MPa unerlässlich.

Das Mischgut aus feuchten Faserstoffen und hydromechanisch aktivierter Asche verwandelt sich unter den Bedingungen der Pressverdichtung von einem „Feststoff mit Flüssigkeit“ in eine fließfähige Masse aus „Flüssigkeit mit dispergiertem Feststoff“. Der Eigenschaftsumschlag des Pressgutes verschlechtert bei der Verwendung von geschlossenen Pressformen die Presslingsqualität unabhängig davon, ob die gesamte Masse oder nur Teile von ihr fließfähig werden. Dieser Nachteil entfällt, wenn die überschüssige Flüssigkeit ohne Feststoff gesteuert abfließen kann. Diese Anforderung wird erfüllt durch:

- Einstellung eines Feuchtegehaltes für das Mischgut, bei dem mit dem jeweils vorgegebenen Pressdruck auf jeden Fall Wasser ausgepresst wird, aber möglichst wenig Wasser. Geeignete Maßnahmen dafür sind die Festlegung eines optimalen Asche/Wasser-Verhältnisses bei der hydromechanischen Aktivierung und die Begrenzung des Wassergehaltes des Faserstoffes,
- Verwendung einer Pressform mit einem Unterstempel, bei dem das Wasser über ein Nullspaltsieb und eine Lochmatrize abgesaugt wird.

Derartige Verpressungsbedingungen lassen sich auch mit Bandpressen erzielen.

6. Trocknung der Formkörper mit Niedertemperaturwärme

Nach der chemischen Aushärtung der bindenden Mineralphasen werden die Formkörper, deren Porosität immer noch freies Wasser enthält, getrocknet. Während der Trocknung werden weitere Bindekräfte durch Auskristallisation von anorganischen und/oder organischen Stoffen ausgelöst. Von qualitätsprägender Bedeutung sind des Weiteren die vielfältigen Reaktionen, die durch die Erwärmung und durch den Wasserentzug in den Faserstoffen sowie zwischen Bestandteilen der aktivierten Asche und den Stoffgruppen der Faserstoffe ausgelöst werden. Das verleiht den Formkörpern die gewünschte Festigkeit und andere vorteilhafte Eigenschaften, wie z.B. einen hohen Brandwiderstand und eine hohe Resistenz gegen biologischen Abbau.

Das Bild 22 zeigt das Verfahrensschema für die Herstellung der Formkörper aus hydromechanisch aktivierter Asche und Faserstoffen durch Niederdruckverdichtung.

4.2. Formkörper aus Holzhackschnitzeln und Kraftwerksasche

Es wurden umfangreiche Laboruntersuchungen zur Ermittlung der optimalen Prozessbedingungen durchgeführt. In diesem Bericht werden nur die wichtigsten Resultate vorgestellt. Durch die Untersuchungen wurde bestätigt, dass alle getesteten und in Pkt. 3.3. näher beschriebenen Aschen aus Braunkohlenkraftwerken für die Herstellung von festen Formkörpern geeignet sind, wenn die Aschen jeweils rohstoffspezifisch optimal aktiviert werden. Besonders gut geeignet ist die Asche aus dem Heizwerk Laubusch. Bei ihr ist der erforderliche Aufwand für die Aktivierung des Bindevermögens relativ gering, und es können mit ihr aufgrund des hohen Gehaltes an freiem CaO und CaSO₄-Anhydrit Formkörper mit hoher Festigkeit hergestellt werden.

Um mit niedrigen Pressdrücken qualitätsgerechte Formkörper aus Holzhackschnitzeln und Kraftwerksasche herstellen zu können, muss das Bindevermögen der Asche stärker in Anspruch genommen werden. Das heißt, der Ascheanteil muss im Vergleich zur Hochdruckverpressung wesentlich größer sein. Dabei bildet die Asche die Formkörpermatrix, in die die Holzfasern eingebettet sind. Die Holzfasern wirken als festigkeitsverstärkender Armierungsstoff.

Herstellungsbedingungen

Im Bild 23 und 25 sind ausgewählte Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt. Die Herstellungsbedingungen für die Formkörper waren:

- Asche Laubusch
Aktivierung: - 5 min Schwingmühle, Asche : Wasser = 45 : 55
 - 5 min Intensivmischer, Asche : Wasser = 45 : 55

- Hackschnitzel Fichte (Waldhackschnitzel)
Zerfaserung mit dem Doppelschneckenzerfaserer
Einsatzzustand: - vorgetrocknet und nachzerkleinert, w = 8,6 %
 - 10 min bei 130 °C gedämpft, w = 49,6 %

- Vermischung von Aschebrei und Faserstoff im Intensivmischer
Mengenverhältnisse: Faserstoff 18 bis 25 %
 Aschebrei 82 bis 75 %

- Verpressung
 - Pressdruck $p = 10 - 28 \text{ MPa}$
 - Pressguttemperatur $\vartheta_G = 20 \text{ °C}$
 - Pressformtemperatur $\vartheta_{\text{Form}} = 20 \text{ bzw. } 120 \text{ °C}$
 - Pressform: Lochmatrize und Nullspaltsieb als Unterstempel
 - Format $100 \times 60 \times 30 \text{ mm}$ und $100 \times 60 \times 60 \text{ mm}$

- Formkörper Trocknung
 - Trockenschrank bei 100 °C
 - Endfeuchtegehalt $w = 8 \text{ bis } 12 \text{ \%}$.

Die Versuche liefern hinsichtlich optimaler Herstellungsbedingungen folgende Erkenntnisse:

1. Hinreichend feste und vollständig wasserbeständige Formkörper entstehen nur dann, wenn die aktivierte Asche (Aschebrei) mit feuchten und zusätzlich gedämpften Holzfasern ($w = 49,6 \text{ \%}$) vermischt wird. Beim Zusatz von getrockneten Holzfasern haben die Formkörper eine geringe Biegefestigkeit, eine hohe Elastizität bei der Druckbelastung und eine schlechte Wasserbeständigkeit. Die Formkörper zerfallen bei der Wässerung schon während einer Wässerungsdauer von $\leq 1 \text{ Stunde}$.

2. Der optimale Anteil der feuchten und gedämpften Fasern (bezogen auf Masse Mahlbrei plus Feuchtfasern) beträgt etwa 18 bis 25 Ma.-%. Der höhere Faseranteil von 25 % ist zu bevorzugen, wenn die Formkörper eine möglichst niedrige Wärmeleitfähigkeit haben sollen. Bei Faseranteilen von weniger als 18 Ma.-% wird zu viel Wasser aus der Pressform gedrückt. Im Bereich von $a_{\text{Faser}} \approx 7 \text{ bis } 18 \text{ \%}$ ist nur noch eine Stampfverdichtung möglich.

3. Es ist von Vorteil, wenn die Pressform auf 120 °C erwärmt wird. Durch die Verdichtung des kalten Mischgutes in einer heißen Pressform entstehen optisch besser aussehende und beim Aufschlag auf eine feste Unterlage härter klingende Formsteine. Infolge der Gutaufheizung in der Pressform werden die Kompressionseigenschaften des Pressgutes verbessert, und die gewünschten chemischen Reaktionen laufen schneller ab.

4. Für die Feuchtverpressung von Aschebrei und gedämpften Holzfasern wurde ein optimaler Pressdruck von $p = 25 \text{ MPa}$ ermittelt. Bei höheren Pressdrücken treten in der Pressform zu starke Fließströmungen auf. Bei niedrigeren Pressdrücken ist der unabdingbar notwendige intensive Feststoffkontakt von Asche und Holzfasern zu gering.

5. Im Fall der Asche Laubusch hat die Art und Weise der Aktivierung nur wenig Einfluss auf die Formkörperqualität (Bild 25). Es ist ein großer Vorteil hinsichtlich des Aufwandes der Formkörperherstellung, dass bei dieser Asche die Rührdispergierung in einem Intensivmischer ausreichend ist.

Formkörperqualität

Die Formkörper mit 25 % feuchten und gedämpften Holzfasern erreichen unter optimalen Verfahrensbedingungen folgende Biege- und Druckfestigkeiten (Bild 23):

Biegefestigkeit: $\sigma_b = 3,4 \text{ MPa}$

Druckfestigkeit: $\sigma_p = 48,2 \text{ MPa}$

Restbiegefestigkeit nach 24 h Wässerung und Rücktrocknung: $\sigma_{b24} = 3,1 \text{ MPa}$.

Die Druckfestigkeit wurde mit einem die Formatfläche überlappenden Prüfstempel an Formkörpern mit einer Dicke von 60 mm gemessen.

Bei der Wässerung der Formkörper ist keine Quellung feststellbar. Des Weiteren ist kein Kantenabfall feststellbar.

Die vorgegebenen Ziele von $\sigma_b \geq 3 \text{ MPa}$, $\sigma_p \geq 30 \text{ MPa}$ und prozentuale Restbiegefestigkeit nach der Wässerung $\geq 90 \%$ wurden erreicht, aber noch nicht wesentlich übertroffen. Die Formkörperfestigkeit ist durch weitere Optimierung der Herstellungsbedingungen noch steigerbar.

Das Bild 24 zeigt Druckspannungs-Weg-Kennlinien für die Formkörper, die bei der Druckfestigkeitsprüfung ermittelt wurden. Es handelt sich um die Kennlinien für drei Formkörper, die unter unterschiedlichen Bedingungen hergestellt worden waren. Für alle Kurven ist charakteristisch, dass die Druckspannung mit zunehmender Verdichtung zunächst relativ flach und danach ein längeres Stück nahezu linear ansteigt. Danach kommt es ohne größere plastische Verformung zum Bruch.

Der wichtigste Unterschied im Kurvenverlauf besteht darin, dass die Kurve 1 für die Formkörper, bei denen der Aschebrei mit getrockneten Holzfasern vermischt wurde, wesentlich flacher als bei den beiden anderen Kennlinien ansteigt. Die Kurven 2 und 3 betreffen die Formkörper, bei denen der Aschebrei mit feuchten und gedämpften Holzfasern vermischt wurde. Bei der Vermischung des Aschebreies mit getrocknetem Holzfaserstoff entstehen stark komprimierbare und unzureichend wasserbeständige Formkörper. Folgende Kompres-

sionswerte kennzeichnen die großen Unterschiede in der Formstabilität (Format 100 x 60 x 60 mm):

Kennlinie	Prozessparameter	Kompression bei Druckbelastung in %		
		ε bei $p = 10\text{MPa}$	ε bei $p = 25\text{MPa}$	ε bei $p = 40\text{MPa}$
1	Holzfaserstoff getrocknet $\vartheta_{\text{Form}} = 20\text{ °C}$	15,5	20,7	25,3
2	Holzfaserstoff feucht und gedämpft $\vartheta_{\text{Form}} = 20\text{ °C}$	7,0	11,7	15,8
3	Holzfaserstoff feucht und gedämpft $\vartheta_{\text{Form}} = 120\text{ °C}$	5,0	8,5	11,2

Die geringen Unterschiede im Verlauf der Druckspannungs-Weg-Kennlinien in Bild 26 bestätigen die Feststellung, dass die Art und Weise der Aktivierung der Asche Laubusch nur wenig Einfluss auf die Formkörperqualität hat.

Für die Formkörper aus Aschebrei Laubusch und 25 % feuchten, gedämpften Holzfasern wurden weitere Eigenschaftsmerkmale ermittelt:

- mit Stahlnägeln nagelbar,
- gute Annahme von Tapetenleim (Ankleben von Papier),
- verleimbar mit Harzleim,
- beim Bohren Ausbildung eines glatten Bohrloches ohne Ausbrüche auf der Ein- und Austrittsseite,
- nach 4 h Wärmebestrahlung und Aufheizung der äußeren Oberfläche auf etwa 90 °C kein Zerfall feststellbar,
- gutes Haftvermögen für Putz,
- Rohdichte $\rho_{\text{roh}} \approx 1,20\text{ g/cm}^3$,
- Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,299\text{ W/mK}$.

Der vorgegebene λ -Wert von 0,250 W/mK wurde noch nicht erreicht. Durch den Zusatz des Holzes entsteht aber im Vergleich zu Baustoffen, die nur aus anorganischen Rohstoffen hergestellt werden, ein Produkt mit deutlich abgesenktem λ -Wert. Aus der Fachliteratur wurden folgende Vergleichswerte übernommen:

- Mauerwerk $\lambda = 0,56\text{ W/mK}$
- Kalkmörtel $\lambda = 0,87\text{ W/mK}$
- Zementmörtel $\lambda = 1,40\text{ W/mK}$
- Gipsfaserplatten $\lambda = 0,36\text{ W/mK}$.

Die λ -Werte der Formkörper aus Asche und Holzfasern liegen in etwa in dem Bereich von Gipsfaserplatten.

4.3. Formkörper aus Holz/Kohle-Faserstoff bzw. Xylit und Kraftwerksasche

Xylit ist ein Begleitstoff von Niederlausitzer Weichbraunkohle. Es handelt sich um durch den Inkohlungsprozess stark modifiziertes Holz. Im Vergleich zu Holzfasern sind Xylitfasern zum Teil reißfester und wesentlich weniger elastisch. Bei beiden Faserstoffen wird die Elastizität durch Dämpfen in starkem Maße vermindert.

Holz/Kohle-Faserstoff entsteht durch gemeinsame Beanspruchung von feuchten Holzhackschnitzeln und Rohbraunkohle im Doppelschneckenzerfaserer. Die Durchträngung der Holzfasern mit der ligninähnlichen Kohlesubstanz wird durch die hohen Temperaturen und Drücke, durch die die Beanspruchung gekennzeichnet ist, sowie durch die Anwesenheit von Wasser erreicht. Sowohl der Xylitfaserstoff als auch der Holz/Kohle-Faserstoff ist im Vergleich zu normalen Holzfasern wesentlich resistenter gegenüber Abbau durch Mikroorganismen und nach der Trocknung auch wesentlich weniger hydrophil. Das waren die Hauptgründe für den Einbezug dieser alternativen Faserstoffe in die Untersuchungen.

Die Formkörper wurden unter folgenden Bedingungen hergestellt:

- Asche Laubusch
Aktivierung: 5 min Schwingmühle, Asche : Wasser = 45 : 55.
- Xylitfaserstoff
Rohfaserxylit ($w \approx 50\%$) zerfasert mit dem Doppelschneckenzerfaserer
Einsatzzustand: - vorgetrocknet und nachzerkleinert, $w = 12,9\%$
- 10 min bei 130 °C gedämpft, $w = 49,8\%$.
- Holz/Kohle-Faserstoff
Holzhackschnitzel Fichte ($w \approx 45\%$) 70 %
Rohbraunkohle ROMONTA ($w \approx 50\%$) 30 %
gemeinsame Beanspruchung im Doppelschneckenzerfaserer
Einsatzzustand: - vorgetrocknet und nachzerkleinert, $w = 8,8\%$
- 10 min bei 130 °C gedämpft, $w = 53,2\%$.

- Vermischung von Aschebrei und Faserstoff im Intensivmischer
Mengenverhältnis: Faserstoff 25 %
Aschebrei 75 %.
- Verpressung
Pressdruck $p = 25 \text{ MPa}$
Pressguttemperatur $\vartheta_G = 20 \text{ °C}$
Pressformtemperatur $\vartheta_{\text{Form}} = 20 \text{ °C}$
Pressform: Lochmatrize und Nullspaltsieb als Unterstempel
Format 100 x 60 x 30 mm.

Qualitätsmerkmale der Formkörper sind in den Bildern 27 und 28 dargestellt. Die wichtigsten Ergebnisse der Versuche sind:

1. Die alternativen Faserstoffe (Xylit, Holz/Kohle-Verbundfaserstoff) sind für die Herstellung hochwertiger Formkörper mit der Asche Laubusch auch geeignet. Allerdings müssen Abstriche an der Formkörperdruckfestigkeit im Vergleich zum Einsatz von reinen Holzfasern gemacht werden.

Faserstoff	Biegefestigkeit in MPa		Druckfestigkeit
	σ_b	σ_{b24}	σ_p
Holzfaserstoff	3,6	2,9	42,4
Holz/Kohle-Faserstoff (70 : 30)	3,9	2,9	19,7
Faserxylit	3,1	2,8	24,7

2. Hochwertige Formkörper entstehen mit den alternativen Faserstoffen nur dann, wenn diese im feuchten und gedämpften Zustand eingesetzt werden. Diese Erkenntnis gilt für alle pflanzenstämmigen Faserstoffe. Bei der Verwendung von getrockneten Faserstoffen verringert sich die Biegefestigkeit und verschlechtert sich die Wasserbeständigkeit der Formkörper.
3. Die Formkörper mit Faserxylit bzw. Holz/Kohle-Faserstoff verhalten sich bei der Druckbelastung starrer, so dass sie weniger komprimiert werden als die Formkörper mit normalen Holzfasern (Bild 28).

Die Untersuchungen zur Anwendung des Verfahrens der Niederdruckverdichtung haben insgesamt gezeigt, dass aus Fasern von Holznebenprodukten sowie aus Xylitfasern bzw. Holz/Kohle-Fasern im Verbund mit Kraftwerksasche Formkörper mit guter bis sehr guter Qualität hergestellt werden können. Durch weitere Optimierung sind weitere Qualitätsreserven erschließbar. Da die Versuchsarbeiten im Labor aber extrem aufwändig sind, können die Bemühungen zur Perfektionierung dieser Technologie erst dann in Angriff genommen werden, wenn eine praktische Nutzung erwogen wird.

5. Herstellung von Baustoffgranulaten aus biostämmigen Rohstoffen und anorganischen Prozessnebenprodukten

5.1. Charakterisierung des Verfahrens

Die Untersuchungen zur Herstellung von Baustoffgranulaten wurden außerplanmäßig in das Forschungsprogramm aufgenommen, weil es einen Bedarf an schüttfähigen Baustoffen mit wärmedämmenden Eigenschaften gibt und erste Testversuche gezeigt haben, dass die Granulierttechnologie für die Erfüllung der Ziele des Forschungsvorhabens sehr erfolgversprechend ist.

Eine wichtige Voraussetzung für die Erzeugung von qualitativ hochwertigen Granulaten ist die Auswahl von dafür geeigneten Rohstoffen oder Rohstoffgemischen. Im Interesse der Kosten müssen die Ausgangsrohstoffe billig und ohne großen Energiebedarf für Aufbereitungsprozesse direkt nutzbar sein. Diese Anforderung erfüllen in besonderer Weise:

- Jungtertiäre Weichbraunkohlen,
- Holznebenprodukte,
- Kraftwerksfilteraschen aus Braunkohle.

Die jungtertiäre Weichbraunkohle ist ein Umwandlungsprodukt, das vorwiegend durch biochemische Prozesse aus dem Lignin der früheren Phytomasse entstanden ist [3]. Sie enthält zusätzlich hochwertige Faserstoffe (Xylit) für das Auslösen von formschlüssigen Bindungen sowie Wachse und Harze für Binde- und Hydrophobierungsprozesse [4]. Die makromolekularen Strukturen von Weichbraunkohle in Bild 29 verdeutlichen die Vielfalt für das Verknüpfen von Bindekräften. Durch die hohe Anzahl an Carboxyl- und Hydroxylgruppen können unter geeigneten Aufschluss- und Reaktionsbedingungen aus Hauptvalenzbindungen ausgelöst werden. Die verschiedenen Bindungen sind durch eine hydromechanische Aktivierung in bedeutendem Maße intensivierbar. Die im Rohzustand stark hydrophile Weichbraunkohle besitzt zudem die vorteilhafte Eigenschaft, dass sie sich bei der Trocknung durch das Auslö-

sen von Bindekräften und durch die Mobilisierung von Wachsen und Harzen in einen ausgesprochenen hydrophoben Stoff mit hoher Wasserbeständigkeit umwandelt [5].

Das Holz besteht hauptsächlich aus Zellulose, Hemizellulose und Lignin. Alle drei Stoffgruppen haben aufgrund ihrer speziellen chemischen Struktur ein hohes Bindevormögen, wenn das Holz z.B. durch hydromechanische Aufschlussverfahren zerkleinert und bindungsmäßig aktiviert wird. Das zerkleinerte Holz eignet sich zudem zur Ausbildung fester formschlüssiger Verbunde in den Granulatkörnern. Die für die Granulatherstellung auch getestete Baumrinde ist ein korkähnlicher Rohstoff mit hohen Dämmeigenschaften nach einer Trocknung auf Wassergehalte von $w \leq 12\%$. Sie hat einen im Vergleich zu Holz erhöhten Brandwiderstand und ist durch ihren Gehalt an Gerbsäuren gegenüber Mikroorganismen resistenter.

Die Eigenschaftsmerkmale der verwendeten Kraftwerksfilteraschen wurden im Kapitel 3.3. bereits ausführlich dargelegt. Die Aschen haben aufgrund ihres Gehalts an bindungsfähigen Komponenten bereits im Ausgangszustand ein gutes Bindevormögen. Die Bindungsreaktionen können durch hydromechanischen Aufschluss noch weiter aktiviert werden. Bei einigen Aschen aus kleineren Heizwerken mit nicht so hohen Feuerraumtemperaturen ist der dafür erforderliche Aufwand relativ gering.

Für die Herstellung von Baustoffgranulaten hoher Qualität sind folgende Verfahrensschritte notwendig:

1. Vorzerkleinerung und Vormischung

Die Vorzerkleinerung ist notwendig, um die Rohfeinkohle auf eine Körnung von $\Delta d \leq 4/0$ mm mit hohem Feinkornanteil < 1 mm zu bringen. Holzhackschnitzel und Rinde müssen zerkleinert und die Fasern nachzerkleinert werden. Die maximale Faser/Span-Länge sollte 4 mm nicht übersteigen. Beim Einsatz von Holzmehl ist eine Vorzerkleinerung nicht erforderlich. Die Aschen haben ebenfalls die erforderliche Feinheit zumeist schon im Ausgangszustand. Für die Vorzerkleinerung der Rohstoffe eignen sich Schlägermühlen oder Doppelschneckenzerfaserer. Der Doppelschneckenzerfaserer hat den Vorteil, dass neben der Zerkleinerung bereits eine Vormischung und intensive Vorkontaktierung der Feststoffphasen erreicht wird. Durch die Zerkleinerungsbeanspruchung werden die Rohstoffe mechanisch aktiviert, was wichtig ist für eine hohe Granulatqualität. Die vorzerkleinerten Rohstoffe bzw. Rohstoffmischungen sollten eine Körnung von $\Delta d \leq 4/0$ mm haben mit hohen Anteilen an Partikeln < 1 mm.

2. Mischgranulierung

Die Granulatbildung erfolgt unter Wasserzusatz in einem Granuliermischer (Bild 30). Dieser Apparat realisiert gleichzeitig die Prozesse Mischen, Homogenisieren, Aktivieren der Bindekräfte und Bindemechanismen sowie die Formgebung der Rohstoffe zu kugelförmigen Granulatkörnern. Wegen der Multifunktionalität ist der Mischgranulator die Schlüsselmaschine für die Granulatherstellung. Die Bildung der Granulatkörner erfolgt nach dem Prinzip der Aufbauagglomeration. Dabei werden unter gleichzeitiger Gutverdichtung vorrangig Nebenvalenzbindungen an den Feststoffoberflächen, Kapillarkräfte im Porensystem und formschlüssige Verbindungen ausgelöst. Es entstehen feuchte Rohgranulate, deren Festigkeit noch relativ gering ist. Der Feuchtegehalt der Rohgranulate ist abhängig von der Rohstoffmischung. Er beträgt bei Granulaten auf Braunkohlenbasis 55 - 65 % und bei Granulaten auf Aschebasis ca. 19 - 20 %. Die Rohgranulate haben alle notwendigen Voraussetzungen für eine nachfolgende starke Verfestigung.

3. Trocknung der Rohgranulate

Während der Trocknung findet die Aushärtung der Rohgranulate statt. Es kommt zur nutzbringenden Verknüpfung der durch die Aktivierung erhöhten Bindungspotentiale. Dabei entstehen Festkörperbrücken, in denen Van-der-Waals-Kräfte, Wasserstoffbrücken und auch Atombindungen und Ionenbindungen wirksam sind. Bei den Granulaten auf Aschebasis ist die Bildung von Festkörperbrücken durch Hydratation der hydrationsfähigen Komponenten (z.B. CaSO_4 , verschiedene Silikate) der hauptsächliche Bindemechanismus. Im Fall der Granulate auf Weichbraunkohlenbasis sind die Bindungsreaktionen sehr komplexer Natur [5,6]. Das Wasser der Rohgranulate enthält gelöste und kolloidal dispergierte Kohlenstoffsubstanzen, deren Konzentration durch die mechanische Aktivierung erhöht ist. Durch die Wasserverdunstung bei der Trocknung tritt eine Übersättigung dieser bindungsaktiven Substanzen in der flüssigen Phase ein. Da das Wasser zuletzt aus den feineren Kapillaren und von den Kontaktstellen der Partikel entfernt wird, kommt es hier zur Aufkonzentration dieser Substanzen, bis im Verlauf der weiteren Austrocknung durch Aggregation und Kristallisation sehr stabile Festkörperbrücken entstehen. Außerdem kommt es während der Trocknung in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur zu thermo-chemischen Reaktionen zwischen Kohlenbestandteilen, die durch die vorherige mechanische Aktivierung ermöglicht und beschleunigt werden. Die dabei entstehenden Reaktionsverbände sind für die Qualität der Granulate auf Braunkohlenbasis ebenfalls von großer Bedeutung.

Der wesentliche Vorteil der nach dem Verfahren der Feuchtagglomeration mit nachfolgender Agglomerattrocknung realisierten Bindungen besteht unabhängig vom Stoff darin, dass eine fast vollständige Absättigung der Bindungspotentiale im entstehenden Agglomeratverbund

erreicht wird. Es handelt sich um intensive, irreversible Bindungen, die durch nachträglichen Wasserzutritt nicht wieder gesprengt werden. Die Granulate erreichen deshalb eine hohe Festigkeit und Wasserbeständigkeit, auch wenn ihre Porosität hoch ist. Die mechanische Stabilität der Granulate wird verstärkt, wenn bei Anwesenheit von Holzfasern oder Rindenspänen die Festkörperbrücken noch zusätzlich durch die von den Fasern oder Spänen ausgehenden formschlüssigen Verbindungen ergänzt werden.

Für die Trocknung der Granulate können Bandtrockner, Kontakttrockner (z.B. Röhrentrockner) sowie Trockner mit pneumatisch oder mechanisch erzeugter Wirbelschicht eingesetzt werden.

4. Klassierung

In diesem Verfahrensschritt wird das getrocknete Granulat auf die gewünschte Körnung klassiert bzw. fraktioniert. Nach der beschriebenen Granuliermethode entstehen Granulatkörner vorzugsweise im Größenbereich von ca. 0,5 - 5 mm. Der Anfall an Feinkorn < 0,5 mm ist gering. Feiner Staub wird fast vollständig über den Mechanismus der Aufbauagglomeration in die Struktur größerer Granulatkörner eingebunden. Für die angestrebte Verwendung als schüttbarer Baustoff mit guten Dämmeigenschaften ist zum Beispiel eine Granulatkörnung von 0,5 - 4 mm vorteilhaft. Die Ausbeute an Granulatkörnern in diesem Größenspektrum liegt bei über 80 %. Das Unterkorn kann problemlos in den Granuliermischer zurückgeführt werden. Es dient als harter Keim für den Granulataufbau. Die Klassierung lässt sich mit üblicher Klassiertechnik (z.B. Mehretagensiebe) durchführen.

Das technologische Grundschema für die Herstellung von Baustoffgranulat enthält das Bild 31. Das Verfahren kann als äußerst kostengünstig eingestuft werden. Eine der Hauptgründe hierfür ist, dass nur wenige Verfahrensstufen benötigt werden. Außerdem ist entscheidend, dass der Energiebedarf besonders gering ist. Für die notwendige Trocknung der Granulate wird nur Niedertemperaturwärme benötigt.

Aus den Rohstoffen Weichbraunkohle, Holznebenprodukte und Kraftwerksasche können hochwertige Baustoffgranulate erzeugt werden, die sich durch hohe Festigkeit, gute Wasserbeständigkeit, hohe Resistenz gegenüber biologischem Abbau und gute Dämmeigenschaften auszeichnen. Das sind Eigenschaftsmerkmale, die ein nach anderer Verfahrensweise erzeugter Baustoff zumeist nicht vollständig oder nur mit sehr hohem Verfahrensaufwand erreicht. Die guten Dämmeigenschaften sind auch beim Granulat auf Aschebasis vorhanden. Sie resultieren zu einem großen Teil aus dem Porenvolumen zwischen den Granulatkörnern, das bei optimaler Korngrößenverteilung der Granulatschüttung groß und auch feinporig ist.

Die Granulate haben auch eine hohe innere Porosität und sind dennoch sehr druckfest. Das ist ein wichtiger Vorteil gegenüber vielen großformatigen Dämmstoffen, bei denen Festigkeit und Porosität zwei gegenläufige Eigenschaftsmerkmale sind, für die Kompromisslösungen zu finden schwierig ist. Die Porosität der Granulatkörner und der Granulatschüttung lässt sich durch Verändern der Rohstofffeinheit und der Parameter des Granulierprozesses in relativ großen Bereichen einstellen. Dabei ist es wichtig, eine optimale Korngrößenverteilung der Granulatkörner zu realisieren.

5.2. Herstellung der Granulate

Aus den Rohstoffen Weichbraunkohle, Asche und Holznebenprodukte sowie dem Füllstoff REA-Gips wurden folgende Granulate hergestellt:

1. Granulate aus 100 % miozäner Weichbraunkohle (Lausitzer Braunkohle) mit Körnungen von $\Delta d = 1 - 5$ mm und $\Delta d = 0,1 - 2$ mm bzw. $\Delta d = 0,5 - 2$ mm (G1 und G2).
2. Granulat aus 85 % Lausitzer Braunkohle und 15 % REA-Gips-Dihydrat mit der Körnung $\Delta d = 1 - 6,3$ mm (G3).
3. Granulat aus 50 % Lausitzer Braunkohle und 50 % Fichtenrinde mit der Körnung $\Delta d = 0,5 - 5$ mm (G4).
4. Granulat aus 100 % Asche Laubusch mit der Körnung $\Delta d = 1 - 6,3$ mm (G5).
5. Granulat aus 90 % Asche aus dem Heizwerk Laubusch und 10 % Holzmehl; Körnung des Granulates $\Delta d = 1 - 4$ mm (G6).

Mit dem Gipszusatz war eine Unterdrückung der Zünd- und Brennbarkeit der Braunkohlengranulate beabsichtigt. Die konkreten Herstellungsbedingungen waren:

Granulate 1, 2 und 3

Ausgangrohstoffe:

- * Weichbraunkohle (LAUBAG), $\Delta d \approx 6/0$ mm, $w \approx 55$ %
- * REA-Gips (ROMONTA), $w \approx 12$ %.

Vorzerkleinerung der Braunkohle:

Schlagnasenmühle mit 4 mm-Austragssieb oder Doppelschneckenzerfaserer.

Granulierbedingungen:

Aufgabe der Braunkohle und des REA-Gipses in den Eirich-Granuliermischer in der genannten Reihenfolge. Granulataufbau bei zunehmendem Wasserzusatz und Einstellung folgender Maschinenparameter:

- * Drehzahl der 5 l-Schüssel 40 min^{-1}
- * Drehzahl des Wirblers 900 min^{-1}
- * Granuliertdauer 3 min

Wasserzusatz: ca. 10 %

Wassergehalt der Rohgranulate ca. 65 %.

Trocknung der Rohgranulate:

Elektrisch beheizter Durchströmungstrockner

Temperatur der Trocknungsluft $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Endfeuchtegehalt des Granulates $\leq 12 \%$

Trocknungsdauer 20 min.

Granulat 4

Ausgangsrohstoffe:

- * Weichbraunkohle (LAUBAG), $\Delta d \approx 6/0 \text{ mm}$, $w \approx 55 \%$
- * Fichtenrinde, $w \approx 50 \%$

Vorzerkleinerung der Braunkohle und der Rinde:

Schlagnasenmühle mit 4 mm-Austragssieb

Granulierbedingungen:

Aufgabe der Braunkohle und der Fichtenrinde in den Eirich-Granuliermischer in der genannten Reihenfolge. Granulataufbau bei zunehmendem Wasserzusatz und Einstellung folgender Maschinenparameter:

- * Drehzahl der 5 l-Schüssel 40 min^{-1}
- * Drehzahl des Wirblers 900 min^{-1}
- * Granuliertdauer 3 min

Wasserzusatz: ca. 10 %

Wassergehalt der Rohgranulate ca. 60 %.

Trocknung der Rohgranulate:

Elektrisch beheizter Durchströmungstrockner

Temperatur der Trocknungsluft 120 °C
Endfeuchtegehalt des Granulates ca. 5 %
Trocknungsdauer 20 min.

Granulate 5 und 6

Ausgangsrohstoffe:

- * Kraftwerksasche Laubusch , $\Delta d < 1/0$ mm, $w \approx 1$ %
- * Holzmehl, $\Delta d < 1/0$ mm, $w \approx 5$ %

Granulierbedingungen:

Aufgabe der Asche und des Holzmehles in den Eirich-Granuliermischer in der genannten Reihenfolge. Granulataufbau bei zunehmendem Wasserzusatz und Einstellung folgender Maschinenparameter:

- * Drehzahl der 5 l-Schüssel 40 min^{-1}
- * Drehzahl des Wirblers 900 min^{-1}
- * Granulierdauer 3 min

Wasserzusatz: 23 %

Wassergehalt (freies Wasser) des Rohgranulates 10 %.

Trocknung der Rohgranulate:

Lufttrocknung

Endfeuchtegehalt des Granulates ≤ 5 % (freie Feuchte).

In Bild 32 zeigt die Kurve der Summenhäufigkeitsverteilung von getrocknetem Kohlegranulat (100 % Weichbraunkohle), dass bei einer Vorzerkleinerung der Rohkohle auf $\Delta d \approx 4/0$ mm ein Granulatprodukt mit einer Körnung von $\Delta d = 5/1$ mm entsteht, wobei der Feingutanteil < 1 mm weniger als 5 % beträgt. Für die Herstellung eines feineren Granulatproduktes mit einer Körnung von z.B. $\Delta d = 2/0,2$ mm muss die Rohbraunkohle stärker vorzerkleinert werden, was z.B. mit Hilfe eines Doppelschneckenapparates möglich ist. Für die Qualitätsuntersuchungen wurden Granulate mit den oben angegebenen Korngrößenklassen verwendet. Die Absiebung von Unter- und Überkorn erfolgte mit Laborsiebmaschinen. Die Kraftwerksasche lässt sich auch mit einem 10 %-igen Holzmehlzusatz leicht unter den genannten Granulierbedingungen zu einem staubfreien und festen Granulat der Körnung 1 - 4 mm bzw. 1 - 6,3 mm verarbeiten. Die verwendete Asche Laubusch hat einen besonders hohen Anteil an wenig versintertem Branntkalk und Gips-Anhydrit. Durch die Umwandlung des freien CaO bei

der Wasserbedüsung zu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ wird das Granuliertgut im Mischgranulator sofort auf etwa 100 °C erwärmt. Die Aufheizung ist so stark, dass der größte Teil des noch freien Wassers im Rohgranulat schnell an der Luft abtrocknet. Die Form und Farbe der Kohle- und Aschegranulate zeigen die Bilder 33 - 35.

5.3. Eigenschaften der Granulate

5.3.1. Sturzfestigkeit und Schüttdichte

Für folgende Granulate wurden die Schütt- und Rütteldichten und die Sturzfestigkeit ermittelt:

1. Granulat aus 100 % Weichbraunkohle LAUBAG

a) $\Delta d = 1 - 5 \text{ mm}$: Abkürzung G1

b) $\Delta d = 0,1 - 2 \text{ mm}$: Abkürzung G2

2. Granulat aus 85 % Weichbraunkohle LAUBAG und 15 % REA-Gips-Dihydrat

$\Delta d = 1 - 6,3 \text{ mm}$: Abkürzung G3

3. Granulat aus 50 % Weichbraunkohle LAUBAG und 50 % Fichtenrinde

$\Delta d = 0,5 - 5 \text{ mm}$: Abkürzung G4

4. Granulat aus 100 % Asche Heizwerk Laubusch

$\Delta d = 1 - 6,3 \text{ mm}$: Abkürzung G5

5. Granulat aus 90 % Asche Heizwerk Laubusch und 10 % Holzmehl ($\Delta d = 1/0 \text{ mm}$)

$\Delta d = 1 - 4 \text{ mm}$: Abkürzung G6.

Für den Vergleich wurden zwei als Dämmstoff produzierte Granulate mit den Markenbezeichnungen „Ceralith-Wärmedämmstoff“ und „Ceralith-Ausgleichsschüttung“ verwendet. Die genannten Dämmstoffe werden hauptsächlich aus Roggenmehl, Löschkalk und Molke hergestellt.

Es handelt sich um Blähgranulate

- Ceralith-Wärmedämmstoff: Abkürzung GI

- Ceralith-Ausgleichsschüttung: Abkürzung GII

Für die genannten Granulate wurden folgende Schütt- und Rütteldichten sowie Sturzfestigkeiten ermittelt:

Kenngrößen	G1	G2	G3	G4	G5	G6	GI	GII
w in %	11,5	11,5	10,2	5,0	5,0	4,1	n.b.	n.b.
$\rho_{\text{schütt}}$ in g/cm ³	0,49	0,66	0,60	0,32	1,09	0,80	0,12	0,20
$\rho_{\text{rütt}}$ in g/cm ³	0,56	0,75	0,68	0,40	1,25	0,90	0,14	0,22
Sturzfestigkeit $St_i(300)$ in %	96,2	94,6	97,2	92,0	98,8	97,6	96,1 ¹⁾	96,0
Sturzfestigkeit n. 24 h Wässerung u. Rücktrocknung; $St_i(100)$ in %	97,2	96,4	97,0	n.b.	98,2	98,8	Zerfall	
Sturzfestigkeit n. Aufheizung auf 300 °C in der Retorte; 1 h bei 300 °C; $St_{i/300^\circ\text{C}}(100)$ in %	95,8	88,1	96,2	n.b.	98,7	96,4	Zerfall	

¹⁾ Absiebung von Feingut mit $d \leq 2$ mm

Die Sturzfestigkeit wurde mit einem rotierenden Sturzrohr (Bild 36) ermittelt. Die Zahl in den Klammern gibt die Anzahl der Rohrumdrehungen an. Nach Beendigung der Sturzbeanspruchung wird der prozentuale Rückstand auf dem Bezugssieb mit der Öffnungsweite i bestimmt. Die Öffnungsweite i entspricht der jeweiligen unteren Korngröße der Körnungen.

Alle auf der Basis von Weichbraunkohle oder Asche hergestellten Granulate G1 bis G6 zeichnen sich durch eine hohe Sturzfestigkeit aus. Die Sturzfestigkeiten $St_i(300)$ für die Ceralith-Granulate GI und GII sind auch sehr hoch, was hier aber weniger auf eine hohe Strukturfestigkeit, sondern auf die geringe Sturzbeanspruchung dieser extrem leichten Stoffe im Sturzrohr zurückzuführen ist. Bei der Probe GI musste vor der Sturzbeanspruchung 16,2 % Feingut mit $d \leq 2$ mm abgetrennt werden. Das Unterkorn war durch Kornzerfall beim Transport entstanden.

Eine vorteilhafte Eigenschaft aller Granulate G1 bis G6 ist die sehr hohe Wasserbeständigkeit. Nach einer Wässerungsdauer von 24 h ist kein Kornzerfall feststellbar. Die Sturzfestigkeit bleibt unverändert hoch. Die Ceralith-Granulate sind dagegen nach 24 h Wässerung vollständig zerfallen oder stark aufgeweicht.

Die Granulate G1 bis G6 zeichnen sich zudem durch eine hohe Thermobeständigkeit aus, wenn sie in einer Retorte mit einer Inertgasatmosphäre auf 300 °C aufgeheizt werden. Die Aufheizgeschwindigkeit betrug 2,8 K/min und die Ausstehdauer bei 300 °C jeweils 1 Stunde

in den Tests. Trotz dieser beachtlichen Wärmebeanspruchung haben die Granulate eine unverändert hohe Sturzfestigkeit. Ein geringer Abfall ist nur beim Granulat G2 feststellbar. Die Ceralith-Granulate GI und GII sind dagegen nach der Aufheizung bis 300 °C stark verkohlt und weitgehend zerfallen.

Die Bilder 33 bis 35 bestätigen die hohe Thermobeständigkeit der Granulate. Die Fotos zeigen die Granulate vor und nach 1 Stunde Erwärmung bei 300 °C.

5.3.2. Verdichtungsverhalten der Kornschüttung bei Druckbelastung

Für den Einsatz von Granulaten als Ausgleichsschüttung oder als Dämmstoff in Wänden sind die Druckfestigkeit und das Verdichtungsverhalten der Granulatkörner weitere wichtige Qualitätsmerkmale. Diese Eigenschaften wurden mit Hilfe eines „Drucktopfes“ ermittelt. Es handelt sich um ein zylindrisches Stahlgefäß mit einem Durchmesser von 57 mm und einer Höhe von 57 mm (Bild 37). In diesem Prüfgefäß wird das Granulat mit einem Stempel mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_{St} = 10 \text{ mm/min}$ bis zum vorgegebenen Belastungsdruck p_{max} oder bis zur vorgegebenen Stauchung s der Schüttung verdichtet. Gemessen wurden die Verdichtungseigenschaften durch die Aufnahme der Kennlinie $s = f(p)$ sowie nach dem Ausstoßen des Schüttgutes aus dem Drucktopf der Kornzerfall und die Agglomerationseigenschaften des Schüttgutes.

Die für den Vergleich herangezogenen Ceralith-Granulate werden bei der Druckbelastung stark verdichtet (Bild 38). Besonders leicht verdichtbar ist der Ceralith-Wärmedämmstoff. Bei einer Druckbelastung von $p_{max} = 0,5 \text{ MPa}$ und $p_{max} = 1 \text{ MPa}$ (50 bzw. 100 t/m²) wurden für beide Ceralith-Granulate folgende prozentuale Stauchungen s_{St} ermittelt:

	s_{St} bei $p = 0,5 \text{ MPa}$	s_{St} bei $p = 1 \text{ MPa}$
GI: Wärmedämmstoff	39 %	57 %
GI: Ausgleichsschüttung	23 %	37 %

Das Bild 39 zeigt die Granulatschüttungen nach der Druckbelastung mit $p_{max} = 1 \text{ MPa}$ (100 t/m²). Die Granulatkörner werden bei der Druckverdichtung stark deformiert und zu einem stabilen Formkörper verdichtet. Der Ceralith-Wärmedämmstoff hat besonders gute Agglomerationseigenschaften.

Im Vergleich zu den Ceralith-Granulaten zeichnen sich die Granulate aus der Weichbraunkohle und der Asche Laubusch durch eine hohe Kornfestigkeit und einen hohen Verdichtungswiderstand aus (Bild 40). Für die untersuchten Granulate wurden bei der maximalen Druckbelastung von $p_{\max} = 1 \text{ MPa}$ folgende prozentuale Stauchungen s_{St} ermittelt:

Granulat		s_{St} in % bei $p_{\max} = 1 \text{ MPa}$
GI	Ceralith-Wärmedämmstoff	57
GII	Ceralith-Ausgleichsschüttung	37
G1	Weichbraunkohle, $\Delta d = 1 - 5 \text{ mm}$	13,1
G2	Weichbraunkohle, $\Delta d = 0,1 - 2 \text{ mm}$	6,6
G3	85% Weichbraunkohle + 15% REA-Gips-Dihydrat, $\Delta d = 1 - 6,3 \text{ mm}$	15,6
G5	Asche Laubusch, $\Delta d = 1 - 6,3 \text{ mm}$	2,4
G6	90 % Asche Laubusch + 10 % Holzmehl, $\Delta d = 1 - 4 \text{ mm}$	7,7

Der hohe Verdichtungswiderstand und die geringe Stauchung der Granulate G1 bis G6 bei einer relativ hohen Druckbelastung von $p_{\max} = 1 \text{ MPa}$ (entspr. 100 t/m^2) sind für den Einsatz als Dämmstoff oder als Ausgleichsschüttgut von großem Vorteil. Die Granulatkörner sind so fest, dass durch die Druckbelastung praktisch kein Kornzerfall stattfindet (Bilder 41 und 42). Die Feinheit des Granulates erhöht sich durch die Druckbelastung nur wenig. Des Weiteren treten bei der Verdichtung im Drucktopf keine Agglomerationseffekte auf. Alle untersuchten Granulate sind nach der Druckbelastung mit $p_{\max} = 1 \text{ MPa}$ noch gut rieselfähige Kornhaufwerke.

5.3.3. Wasserdurchlässigkeit und Trocknungsverhalten der Granulatschüttung

Viele körnige oder fasrige Dämmstoffe haben den Nachteil, dass sie das in das Schüttgut eindringende Wasser so fest binden, dass eine Trocknung nur mit großem Aufwand gelingt. Das Entfernen des Wassers aus der Schüttung ist insbesondere dann sehr schwierig, wenn die Feuchtigkeit durch Aufsaugen fest gebunden ist und/oder durch starke Quellung aus einem Dämmstoff-Schüttgut ein dichter Pfropfen wird. Die Eignung von Granulaten als Dämmstoff oder als Ausgleichsschüttung verbessert sich beträchtlich, wenn das in die Schüttung eindringende Wasser allein und möglichst vollständig abfließt und das Granulat sehr einfach durch Einblasen von Warmluft getrocknet werden kann.

Für die Versuche wurde die im Bild 43 skizzierte Apparatur gebaut. Folgende Messungen wurden bei konstanter Höhe der Granulatschüttungen durchgeführt:

- 1a) Ermittlung des Durchflussverhaltens einer konstanten Wassermenge bei geöffnetem Auslaufventil; Bestimmung der abfließenden und der im Granulat verbleibenden Wassermenge.
- 1b) Ermittlung der Trocknungseigenschaften der Granulatschüttungen beim Einblasen von Luft mit einer Temperatur von 70 °C in den Auslaufstutzen (Bild 43).
- 1c) Wiederholung der unter Pkt. 1a) genannten Messung nach der vorherigen Rücktrocknung der Granulatschüttung.
- 2a) Ermittlung des Abflussverhaltens des Wassers aus der Granulatschüttung eine Stunde nach der Wasseraufgabe. Bestimmung der abfließenden und der im Granulat verbleibenden Wassermenge.
- 2b) Trocknung des Granulates mit durchströmender Warmluft.
- 2c) Wiederholung der unter Pkt. 2a) genannten Messung nach vorheriger Rücktrocknung der Granulatschüttung.

Bei allen Versuchen wurde zudem geprüft, ob Kornzerfall eintritt und ob das Wasser beim Durchfluss sauber bleibt.

Die Versuchsergebnisse sind in den Tabellen 2 und 3 zusammengestellt. Folgende wichtige Erkenntnisse wurden gewonnen:

- 1. Bei allen Granulaten fließt das aufgegebenes Wasser schnell durch die Granulatschüttung ab, wenn das Abschlussventil geöffnet ist. Das ist eine sehr vorteilhafte Eigenschaft für die Verwendung der Granulate als Dämmstoffe.

Ein Teil des aufgegebenen Wassers verbleibt durch die Benetzung der Granulatoberflächen und als Zwickelwasser zwischen den Granulatkörnern in der Schüttung:

Granulat		Wasseranteil in Schüttung
G1	Weichbraunkohle	3,3 %
G3	85 % Weichbraunkohle + 15 % REA-Gips	8,8 %
G5	Asche Laubusch	12,0 %
G6	90 % Asche Laubusch + 10 % Holzmehl	22,0 %

Das Granulat aus Weichbraunkohle hat schlechte Benetzungseigenschaften. Diese vorteilhafte Eigenschaft bleibt auch dann weitgehend erhalten, wenn die Weichbraunkohle im Gemisch mit 15 % REA-Gips granuliert wird.

Das Granulat aus Asche ist viel besser benetzbar. Trotzdem verbleibt nur 12 % des aufgegebenen Wassers in der Granulatschüttung. Durch den Zusatz von 10 % Holzmehl erhöht sich das Wasserrückhaltevermögen des Granulates auf 22 %.

2. Die befeuchtete Granulatschüttung trocknet schnell und vollständig aus, wenn sie von Warmluft durchströmt wird. Es ist ein großer Vorteil, dass die Granulate gut durchströmbare Schüttgüter sind und das auch nach dem Wasserzufluss bleiben. Im Gegensatz dazu haben Dämmstoffe aus Faserstoffen schlechte Trocknungseigenschaften. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn die Stoffe quellfähig sind und nach der Befeuchtung eine dichte Pfropfenmasse bilden.

Die Trocknungsdauer ist von der im Granulat verbleibenden Wassermenge abhängig. Bei den Versuchen wurde solange getrocknet, bis das Granulat seine Ausgangsmasse erreicht hat. Die Trocknungsdauer variiert zwischen 25 bis 55 Minuten (Tabelle 2).

3. Das Wasser fließt auch nach der Rücktrocknung des befeuchteten Granulates schnell durch die Schüttung. Die im Granulat verbleibende Wassermenge verändert sich im Vergleich zur ersten Befeuchtung nicht (Tabelle 2).
4. Das Wasser fließt auch dann schnell aus der Granulatschüttung ab, wenn das Wasser vorher 1 Stunde in der Schüttung stand. Der Anteil des Wassers, der nicht aus der Granulatschüttung abfließt, ist höher als bei den Versuchen, bei denen der Abfluss sofort möglich war. Der Anstieg der im Granulat verbleibenden Wassermenge ist besonders bei dem Granulat aus Weichbraunkohle groß, weil genügend Zeit für die Benetzung der hydrophoben Kohlekörner zur Verfügung steht. Die Wassermenge, die in der Schüttung verbleibt, ist unter diesen Versuchsbedingungen bei allen untersuchten Granulaten in etwa gleich hoch. Der Anstieg der im Granulat nach dem Abfluss verbleibenden Wassermenge ist kein Nachteil, weil die Schüttung mit Warmluft schnell ausgetrocknet werden kann.
5. Bei der Befeuchtung der Granulatschüttung konnte kein Kornzerfall festgestellt werden.
6. Das aus der Granulatschüttung abfließende Wasser ist völlig sauber, wenn die Granulate aus Weichbraunkohle, aus 85 % Weichbraunkohle und 15 % REA-Gips oder aus 50 % Weichbraunkohle und 50 % Rinde hergestellt werden. Bei den Granulaten aus Asche war eine leichte Graufärbung nur beim ersten Durchfluss feststellbar. Dieser Nachteil kann im Bedarfsfall noch beseitigt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Granulate bei einer Verwendung als Dämmstoff den Vorteil bieten, dass bei einem versehentlichen Zutritt von Wasser in die Dämmschicht dieses problemlos durch Schaffung einer Abflussöffnung und durch Trocknung mit Warmluft beseitigt werden kann. Zweckmäßig ist der Einbau einer ständig geöffneten Abflussstelle, damit eventuell entstehendes Kondenswasser abfließen kann.

5.3.4. Zündverhalten der Granulate

Das Zündverhalten der Granulate wurde mit dem in Bild 20 dargestellten Prüfofen ermittelt. Die Granulate wurden in einen Käfig (220 x 80 x 80 mm) aus Stahldraht gefüllt und in die Ofenkammer eingesetzt. Der Ofenraum wurde von Luft durchströmt und mit den seitlich angeordneten Heizstäben mit 10 K/min bis 500 °C aufgeheizt. Die Versuche wurden abgebrochen, wenn das Granulat über die gesamte Länge des Drahtkäfigs brannte. Das ist keine DIN-gerechte Prüfung, die Ergebnisse ermöglichen aber eine erste Bewertung.

Ergebnisse:

1. Granulat aus 100 % Lausitzer Braunkohle (G1)

- Beginn leichter Qualmbildung $\vartheta_{\text{Of}} = 180 \text{ °C}$
- starke Qualmbildung $\vartheta_{\text{Of}} \approx 390 \text{ °C}$
- Zündung und schnelle Flammenausbreitung $\vartheta_{\text{Of}} = 459 \text{ °C}$
über die gesamte Länge des Probengefäßes.

2. Granulat aus 85 % Lausitzer Braunkohle + 15 % REA-Gips (G3)

- Beginn leichter Qualmbildung $\vartheta_{\text{Of}} = 205 \text{ °C}$
- starke Qualmbildung $\vartheta_{\text{Of}} \approx 395 \text{ °C}$
- Zündung und langsame Flammenausbreitung $\vartheta_{\text{Of}} = 485 \text{ °C}$.

3. Granulat aus 100 % Asche Laubusch (G5)

Nach Aufheizung bis 500 °C und einer Stunde Ausstehdauer bei 500 °C nur geringer Kornzerfall.

4. Granulat aus 90 % Asche Laubusch und 10 % Holzmehl (G6)

Bis 500 °C keine Zündung. Nur leichte Qualmbildung und geringe Schwarzfärbung des Granulates. Geringfügiger Kornzerfall nach Aufheizung bis 500 °C und 1 h Ausstehdauer.

Die Testversuche haben gezeigt, dass sogar das Granulat aus Braunkohle erst bei relativ hohen Temperaturen zündet. Durch den Zusatz von optimalen Anteilen an REA-Gips oder von Aschen kann die Zündtemperatur noch weiter erhöht werden, so dass die Einsatzmöglichkeiten als Dämmstoff auch aus dieser Sicht zu verbessern sind. Die Aschegranulate sind nicht entzündbar, solange der Holzanteil $\leq 10\%$ beträgt.

5.3.5. Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität

Die Wärmeleitfähigkeit wurde nach DIN EN 993-14 nach dem Heißdraht-(Kreuz)-Verfahren ermittelt. Die Wärmekapazitätsmessungen erfolgten bei einer Temperatur von $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Granulat		λ in W/m·K
G1	100 % Weichbraunkohle Lausitz	0,100
G3	85 % Weichbraunkohle Lausitz + 15 % REA-Gips-Dihydrat	0,101
G4	50 % Weichbraunkohle Lausitz + 50 % Fichtenrinde	0,093
G5	100 % Asche Laubusch	0,230
G6	90 % Asche Laubusch + 10 % Holzmehl	0,163
GI	Ceralith-Wärmedämmstoff	0,071
GII	Ceralith-Ausgleichsschüttung	0,083
Granulat		c_p in kJ/kg K
G1	100 % Weichbraunkohle Lausitz, $w = 11,5\%$	1,467
G3	85 % Weichbraunkohle Lausitz + 15 % REA-Gips-Dihydrat, $w = 10,2\%$	1,371
G5	100 % Asche Laubusch, $w = 5,0\%$	1,142
G6	90 % Asche Laubusch + 10 % Holzmehl, $w = 4,1\%$	1,104

Vergleichswerte aus Fachbüchern [7]:

- Holzbretter, $\rho_{\text{roh}} = 600\text{ kg/m}^3$, $w \approx 15\%$: $\lambda = 0,13\text{ W/mK}$, $c_p = 1,5\text{ kJ/kg K}$
- Spanplatten, $\rho_{\text{roh}} = 700\text{ kg/m}^3$: $\lambda = 0,13\text{ W/mK}$, -
- Gipsfaserplatten, $\rho_{\text{roh}} = 1200\text{ kg/m}^3$: $\lambda = 0,36\text{ W/mK}$, -
- Mauerwerk (Ziegel): $\lambda = 0,56\text{ W/mK}$, $c_p = 0,84\text{ kJ/kg K}$.

Im Vergleich zu den Ceralith-Dämmstoffen haben die Granulate aus Weichbraunkohle bzw. aus 85 % Weichbraunkohle und 15 % REA-Gips eine höhere Wärmeleitfähigkeit. Dieser Nachteil kann in der Praxis durch eine Vergrößerung der Schichtdicke kompensiert werden. Die λ -Werte dieser beiden Granulate liegen aber deutlich unter den Vergleichswerten für

getrocknete Holzbretter und für Spanplatten ($\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$), deren gute Dämmwirkung im Bauwesen geschätzt werden.

Bekanntlich werden für das energiesparende Bauen Baustoffe benötigt, die eine ausreichend geringe Wärmeleitfähigkeit und zugleich eine möglichst hohe spezifische Wärmekapazität haben. Das Ziel ist, vor allem in Übergangszeiten (Frühjahr, Herbst), wenn die Lufttemperatur stärker schwankt, eine Energieeinsparung sowie ein angenehmes Raumklima durch Absorption von Sonnenstrahlung zu erreichen. Die Kohlegranulate G1 und G3 erweisen sich in dieser Hinsicht dem Holzbaustoff als mindestens ebenbürtig. Alle Versuchsgranulate G1 bis G6 haben, wenn sie als Baustoffschüttung eingesetzt würden, unter diesem Aspekt wesentlich günstigere bauphysikalische Eigenschaften als z.B. Ziegelmauerwerk.

5.3.6. Dämmwirkung der Granulate in einer Versuchswand

Versuchsstand und Versuchsdurchführung

Zur Durchführung der Messungen wurde eine in Eigenleistung gebaute kippbare Versuchswand mit drei in der Tiefe verstellbaren Kammern (Bild 44) benutzt. Bild 44 zeigt den Versuchsstand mit einer Doppelglasscheibe vom Typ Dia-Star N1,1 (Float 4 mm Diastar N4 mm) als Vorderwand. Das Doppelglas soll nach Auskunft des Herstellers eine gute Dämmwirkung gegen Wärmerückfluss haben.

Die Vorderwand wird entweder mit Lichtstrahlern künstlich erwärmt (Hochsommer-Variante) oder durch eine vorgeschaltete thermostatisierte Kühlplatte gekühlt (Winter-Variante). In den Kammern befinden sich insgesamt 5 Messebenen mit jeweils 5 Messpunkten zur Bestimmung der orts- und zeitabhängigen Temperaturen. Das Zeitintervall zwischen den Messungen betrug 5 min. Die Anordnung der Messebenen sowie der Messpunkte pro Messebene geht aus den Bildern 46 und 47 hervor. Bei der Auswertung sind aus Gründen der Übersichtlichkeit Temperaturverschiebungen innerhalb der Messebenen eliminiert worden, indem für jeden Zeitpunkt der Mittelwert aus den Messwerten einer Ebene berechnet wurde. Zur Ermittlung der Dämmeigenschaften wurde die erste Kammer hinter der auswechselbaren Vorderwand mit dem jeweiligen Prüfgut befüllt (1. Schicht). Der mittlere Zwischenraum (2. Schicht) enthielt dagegen getrockneten Feinsand, mit dem eine Wand mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit simuliert werden sollte ($\lambda_{\text{Sand}} = 0,225 \text{ W/mK}$). Der Sand besitzt den Vorteil, dass er keine Hohlräume bildet und somit die Messstellen vollständig einhüllt. Die dritte Kammer stellte den Innenraum hinter der Außenwand dar und blieb demzufolge leer. Als Vorderwand

wurde bei den meisten Versuchen die o.g. Doppelglasscheibe verwendet. Für Vergleichsuntersuchungen kamen außerdem Fichtenholz-Spundbretter (Dicke 22 mm) und Edelstahlblech (Dicke 2 mm) als Vorderwand zum Einsatz. Folgende Granulate wurden getestet:

- Ceralith-Wärmedämmstoff (G1)
- 100 % Weichbraunkohle LAUBAG mit den Körnungen
 - $\Delta d = 1 - 5 \text{ mm}$ (G1)
 - $\Delta d = 0,5 - 2 \text{ mm}$ (G2)
- 100 % Asche Laubusch (G5)
- 90 % Asche Laubusch plus 10 % Holzmehl (G6).

Temperaturverlauf bei Wärmebestrahlung

Im Bild 48 ist der typische Verlauf der Temperaturkennlinien für die ersten drei Messebenen am Beispiel von Wärmedämmstoff Ceralith und Braunkohlengranulat dargestellt. Konstante Parameter waren bei diesen Messungen der Abstand der Strahler von der Vorderwand mit 150 mm und die Bestrahlungsdauer von 4 Stunden. In der ersten Messebene nahe der Doppelglasscheibe steigt die Temperatur mit zunehmender Bestrahlungsdauer schnell an und erreicht mit dem Abschalten der Strahler ein Maximum von 77 °C bzw. 68 °C. Ein ähnlicher Temperaturverlauf ergibt sich für die 2. Messebene, wobei die Maxima um ca. 22 °C bzw. 17 °C tiefer liegen. Nach 8 Stunden Versuchsdauer, also 6 Stunden nach Abschalten der Strahler, haben sich die Temperaturdifferenzen zwischen den Messebenen 1 und 2 wieder verringert. Die Kennlinie der dritten Messebene, die die Temperatur in der mit Feinsand gefüllten Kammer widerspiegelt, verläuft wesentlich flacher. Ihr Maximum stellt sich deutlich zeitversetzt zu den beiden anderen Messebenen ein, wobei der Temperaturabfall nach Überschreiten des Maximums sehr flach verläuft.

Ein Vergleich der Temperaturkurven im Bild 48 zeigt, dass das Ceralith-Granulat gemäß seinem kleineren λ -Wert eine höhere Dämmwirkung als das Braunkohlengranulat hat. Das Ceralith-Granulat heizt sich wesentlich stärker auf, gibt die Wärme aber nach Beendigung der Bestrahlung schnell über die Vorderwand an die äußere Umgebung wieder ab, so dass ein stärkerer Temperaturabfall in der ersten und zweiten Messebene und eine geringere Erwärmung des Sandes in der zweiten Kammer (Ebene 3) zu verzeichnen sind. Demgegenüber speichert das Braunkohlengranulat mehr Wärme und verursacht durch Wärmeeinleitung eine stärkere Temperaturerhöhung des Feinsandes.

Für die maximale Energieeinsparung ist es wichtig, dass der an der Außenwand angebrachte Dämmstoff nicht nur den Wärmeabfluss aus den Innenräumen nach außen unterbindet,

sondern auch einen dosierten Wärmefluss von außen in die Räume ermöglicht. Dafür muss der Dämmstoff eine möglichst hohe Wärmespeicherkapazität und eine niedrige, aber keinesfalls extrem niedrige Wärmeleitfähigkeit haben. Unter diesen Bedingungen wird es möglich, insbesondere in den Übergangszeiten (Frühjahr, Herbst), wenn die Sonneneinstrahlung schon bzw. noch hoch ist, aber die Außentemperaturen niedrig sind und stark schwanken, Sonnenenergie für die Wohnraumheizung optimal zu nutzen. Gleichzeitig wird mit einem Dämmstoff, der diese Eigenschaften hat, in den heißen Sommertagen die Innentemperatur und auch die Schwankungsbreite der Innentemperatur vermindert und auf diese Weise ein angenehmes Wohnklima geschaffen. Das Braunkohlengranulat hat in dieser Hinsicht bessere bauphysikalische Eigenschaften als das Ceralith-Granulat. Die Einsatzchancen des Braunkohlengranulates sind demzufolge besonders dann groß, wenn auf der Basis der Jahresgesamtenenergiebilanz eines Gebäudes eine Energieeinsparung erzielt werden soll.

Das Verfahren der Feuchtgranulierung mit nachfolgender Trocknung der Rohagglomerate bietet die Möglichkeit, die Korngröße und Korngrößenverteilung des Granulates und damit seine Schüttdichte und die davon abhängige Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherkapazität zu verändern. Damit lassen sich die Dämmeigenschaften des Granulatproduktes in gewissem Rahmen den Erfordernissen anpassen. Im Fall des Braunkohlengranulates deuten die Temperaturkurven im Bild 49 an, dass bei einer Reduzierung der Körnung von $\Delta d = 1 - 5$ mm auf $\Delta d = 0,5 - 2$ mm der Wärmeeintrag in die Sandschicht sich etwas erhöht.

Durch einen Zusatz von REA-Gips (Dihydrat) wird die Entzündbarkeit von Braunkohlengranulat vermindert. Erfreulich ist zudem, dass sich seine Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherfähigkeit nicht wesentlich ändern, wenn der Zusatz des anorganischen Stoffes 15 Ma.-% nicht übersteigt. Das wird auch durch die Temperaturkurven im Bild 50 bestätigt, die für die beiden Granulate (mit und ohne REA-Gips) nahezu deckungsgleich verlaufen.

Mit einer Leitfähigkeit der Schüttung von $\lambda = 0,230$ W/mK gehört das Granulat aus der Kraftwerksasche Laubusch definitionsgemäß sicher nicht zu den Dämmstoffen. Beim Vergleich mit dem Ceralith-Dämmstoff (Bild 51) zeigt sich das ganz deutlich in der geringeren Aufheizung in der Versuchswand und in einem stärkeren Einleiten von Wärme in die Sandschicht. Bauphysikalisch ist das Aschegranulat trotzdem ein interessantes Produkt, weil es zum Beispiel im Vergleich zu Ziegelmauerwerk besser dämmt und Wärme stärker speichert. Es könnte sich deshalb sehr gut für das einschalige Bauen eignen, wenn die Dicke der Granulatschicht den Gebäudeanforderungen angepasst wird. Ein großer Vorteil ist die überaus hohe mechanische Stabilität des Aschegranulates. Damit empfiehlt sich seine Anwendung auch als Ausgleichsschüttung. Es ist außerdem völlig feuersicher. Wenn Bedarf besteht,

lässt sich die Dämmwirkung des Aschegranulates durch einen Zusatz von Holzmehl wirkungsvoll erhöhen. So bewirkt ein 10 %-iger Holzmehlzusatz eine Reduzierung des λ -Wertes von 0,230 auf 0,163 W/mK und eine starke Anhebung der Temperaturverlaufskurve in der 1. und 2. Messebene (Bild 52).

Der prinzipielle Temperaturverlauf in den Messebenen 1, 2 und 3 verändert sich nicht, wenn als Vorderwand statt der Doppelglasscheibe eine 22 mm dicke Fichtenholz-Spundbretterwand oder ein 2 mm dickes Edelstahlblech eingesetzt werden (Bilder 53 und 54). Deutliche Unterschiede bestehen aber in der Temperaturhöhe im Granulat und im Wärmefluss in die zweite Kammerwand. Da Holz selbst ein guter Isolierstoff ist, wird das als Versuchsmaterial eingesetzte Braunkohlengranulat hinter der Holzwand erwartungsgemäß viel weniger erwärmt. Die geringere Erwärmung der Granulatschüttung bedeutet aber auch, dass der Wärmefluss in die zweite Wandkammer niedriger ist (Bild 53). Eine weitere Verringerung der Temperaturmaxima in der ersten Kammer wird durch die Verwendung eines Edelstahlbleches als Vorderwand erzielt, obwohl derartige Bleche hohe Wärmeleitfähigkeiten besitzen. Bei diesem glänzenden Blech wird der überwiegende Teil der Wärmestrahlung an der hellen Blechoberfläche reflektiert, so dass sich die Granulatschüttung in der dahinter liegenden ersten Kammer wenig erwärmt. Es besteht somit die Möglichkeit, die Temperaturverläufe in den mit Granulat gefüllten Dämmwänden durch die Materialauswahl für die Vorderwand gezielt zu beeinflussen. Daraus lassen sich vielfältige Einsatzchancen für die Granulate ableiten.

Temperaturverlauf bei Kühlung

Wenn es auf die Unterbindung des Wärmestromes vom Innenraum nach außen ankommt, sind Dämmstoffe mit möglichst geringem λ -Wert, wie zum Beispiel der Ceralith-Dämmstoff ($\lambda = 0,071$ W/mK), gefragt. In den Versuchen mit vorgeschalteter Kühlplatte wurden neben dem Ceralith-Granulat (G1) Braunkohlengranulat (G1) sowie Granulat aus 90 % Asche Laubusch und 10 % Holzfasern (G6) in die erste Kammer der Versuchswand eingesetzt. Die Kühldauer betrug 8 Stunden. Das heißt, nach 8 h Kühlbetrieb wurden der Thermostat und die Umwälzpumpe für das Kühlmittel abgeschaltet. Der sich in Richtung Kühlplatte einstellende Wärmestrom führt zu einer Temperaturabsenkung in den Messebenen. Die Temperaturverlaufskurven enthalten die Bilder 55 bis 57. Unter den angewandten Versuchsbedingungen sind die Unterschiede in der an der Temperaturabsenkung messbaren Isolierwirkung zwischen den getesteten Granulaten nicht bedeutsam. Bei längerer Kühldauer müsste der Vorteil des Ceralith-Granulates im Dämmverhalten jedoch deutlich anhand einer geringeren Temperaturabsenkung hervortreten. Die Isolierwirkung der Kohle- und Aschegranulate lässt sich durch

Erhöhen der Schichtdicke auf das erforderliche Maß einstellen. Angesichts der niedrigen Herstellungskosten ist das auch praktisch realistisch.

6. Veredlung von Holznebenprodukten zu mineralisierten Faserstoffen

6.1. Charakterisierung des Verfahrens

Eine weitere, zusätzlich in das Forschungsprogramm aufgenommene Variante zur Veredlung von Holznebenprodukten nach energiesparenden Technologien ist die Herstellung von mineralisierten Faserstoffen. Das Ziel der Produktentwicklung sind Faserstoffe mit folgenden Eigenschaften:

- dünne, aber dennoch reißfeste Fasern mit wattiger Struktur,
- gute Dämmwirkung,
- hohe Resistenz gegenüber biologischem Abbau bei Einwirkung von Feuchtigkeit,
- hoher Brandwiderstand.

Auf üblichem Weg hergestellte, unbehandelte Holzfasern erfüllen diese Anforderungen nicht.

Die Zerfaserung von Holz wird gegenwärtig großtechnisch durch schleifenden Aufschluss (Schleifstein-Verfahren) oder durch Zerkleinerung mit Refinern durchgeführt. Bei diesen Verfahren wird das Holz ohne vorherige Delignifizierung zu Holzschliff bzw. Holzstoff zerfasert. Der technologische Aufwand und der Energiebedarf sind bei beiden Zerfaserungsverfahren enorm hoch, so dass der Einsatz dieser Faserstoffe nur für die Veredlung zu Papieren, Kartonagen und Pappen in Betracht kommt. Ein weiterer Nachteil des Schleif- oder Refiner-aufschlusses besteht darin, dass die weitere Veredlung der Fasern durch Mineralisierung in einer zusätzlichen Prozessstufe realisiert werden müsste.

Für die Herstellung von mineralisierten Holzfasern muss die Verfahrenstechnik folgende Bedingungen erfüllen:

- geringer Aufwand für Anlagentechnik,
- niedriger spezifischer Energiebedarf,
- Zerfaserung der Holznebenprodukte in hoher Flexibilität auf die jeweils notwendige Feinheit. Dafür können im Vergleich zu Refinern weniger intensiv aufschließende Maschinen eingesetzt werden, weil für die geplanten Einsatzgebiete Faserstoffe benötigt werden, die nicht so fein wie bei der Herstellung von Papieren oder Kartonagen sein müssen,
- Verwendung von Zerfaserungsmaschinen, die in einem Arbeitsgang gleichzeitig mehrere Grundoperationen ausführen können.

Die Herstellung von Faserstoffen aus Holznebenprodukten, die die genannten Qualitätsanforderungen erfüllen, ist unter der Bedingung eines reduzierten Energie- und Verfahrensaufwandes möglich, wenn folgende Verfahrensschritte eingehalten werden:

1. Aktivierende und modifizierende Zerfaserung der Holznebenprodukte

Die Zerfaserung des Holzes auf die erforderliche Feinheit muss durch einen länger andauernden Zerkleinerungsprozess unter hydrothermalen Bedingungen bei Temperaturen ≥ 100 °C erfolgen, damit ein weicher Faserstoff entsteht, dessen Resistenz gegenüber mikrobiellem Abbau durch Denaturierungsprozesse erhöht ist. Neben Wasser ist die Anwesenheit von reaktiven Modifizierungsstoffen (organische und/oder anorganische Reaktionsstoffe) im Zerfaserungsraum erforderlich, um gezielte Veränderungen der Fasereigenschaften durch Reaktionen auf der Basis von Neben- und Hauptvalenzbindungen zu erreichen. Dazu ist es erforderlich, dass der entstehende Faserstoff durchgängig mit den modifizierenden Stoffen bis in die Fasermitteln durchtränkt wird und zudem die Reaktionsbedingungen für das Auslösen von Neben- und Hauptvalenzbindungen zwischen den Stoffgruppen des Holzes einerseits und den Zusatzstoffen andererseits bestehen. Wichtige Voraussetzungen dafür sind besonders intensive und längere Zeit auf das Gut einwirkende Druck- und Scherbeanspruchungen sowie der Aufschluss und die intensive Vermischung der Stoffe in einem nur mit Wasser und Feststoff ausgefülltem Reaktionsraum bei Überdruck, erhöhten Temperaturen und im Interesse eines intensiven Feststoffkontaktes bei einem hohen Feststoff/Wasser-Verhältnis.

Die gleichzeitige Realisierung dieser komplexen Prozesse ist mit Hilfe von Schleifmaschinen oder Refinern wegen des schnellen Durchlaufes des Feststoffes in hoher Verdünnung nicht möglich. Hierfür hat sich in den Untersuchungen der Doppelschneckenzerfaserer (Bild 1) bewährt, dessen Arbeitsweise und Funktionsprinzip bei der Holzerfaserung unter Zusatz von Reaktionsstoffen in Abschnitt 3. bereits ausführlich erläutert worden ist. Der Doppelschneckenzerfaserer ist eine Schlüsselmaschine für die effiziente Herstellung von hochwertigen mineralisierten Faserstoffen.

2. Trocknung der modifizierten Holzfasern

Der den Doppelschneckenzerfaserer verlassende feuchte Faserstoff muss auf Feuchtegehalte von $w = 7 - 12$ % heruntergetrocknet werden. Es hat sich bewährt, die Trocknung in einem Durchströmungstrockner durchzuführen. Die schnelle allseitige Erwärmung und Trocknung der Fasern, die nur mit einem solchen Trocknungsprinzip realisiert werden kann,

intensiviert die gewünschten Modifizierungseffekte. Feststoffaggregation und Festkörperreaktionen bei der Trocknung prägen in starkem Maße die Qualität der mineralisierten Holzfasern. Damit diese Prozesse schnell und mit hoher Intensität ablaufen können, sollte die Temperatur des Trocknungsmediums unter Wahrung der Betriebssicherheit des Trockners ≥ 120 °C betragen. Als technische Trocknungsapparate kommen z.B. Bandtrockner, Strömungstrockner oder Wirbelschichttrockner in Frage.

3. Nachbehandlung der modifizierten Holzfasern

Durch Nachzerkleinern mittels Schlagmaschinen lassen sich die modifizierten Holzfasern auf die gewünschte Feinheit bis hin zu einer wattigen Struktur bringen. Der Zerkleinerungsprozess kann auch genutzt werden, um Hydrophobierungsmittel auf der Faseroberfläche zu verteilen. Hierzu werden Hydrophobierungsmittel und Faserstoff gemeinsam dem Zerkleinerungsapparat aufgegeben. Eine Abtrennung der durch physikalische und chemische Reaktionen fest an die Holzsubstanz gebundenen Modifizierungsstoffe infolge der Zerkleinerungsbeanspruchung ist nicht zu befürchten. Ablösbar ist nur der geringe überschüssige Anteil des Zusatzstoffes, der nicht von der inneren Porosität und der äußeren Oberfläche der Fasern aufgenommen wurde.

Das Bild 58 zeigt das Verfahrensschema für die Faserstoffherstellung. Bild 59 ist die Mikroskopaufnahme von mineralisiertem Faserstoff, der aus Holzhackschnitzeln und REA-Gips (Dihydrat) hergestellt worden ist. Der REA-Gips bildet nicht nur eine fest anhaftende, homogene Schicht an der Faseroberfläche aus, die stark brandhemmend wirkt, sondern verursacht eine durchgängige Modifizierung der Holzsubstanz, in dem gelöste Ca-Ionen und kolloidal dispergierte Dihydratpartikel in die Faserporen und Faserwände eindringen und dort mit verschiedenen Stoffgruppen des Holzes reagieren. Aufgrund der stabilen Verbindung zwischen Holz und anorganischem Zusatz kann das Produkt als Verbundfaserstoff bezeichnet werden. Durch Auswahl der Zusatzstoffe können den Faserstoffen unterschiedliche Eigenschaften verliehen werden. Auf diese Weise werden für die Verbundfaserstoffe neue Einsatzgebiete erschlossen.

Folgende Fasereigenschaften sind von praktischem Interesse:

- hoher Brandwiderstand,
- hohe Resistenz gegenüber unerwünschtem biologischen Abbau unter feuchten Klimabedingungen,
- hohes Bindevermögen (hohe Klebwirkung und/oder Ausbildung formschlüssiger Verbindungen) zur Verwendung als Agglomerationshilfs- oder Bewehrungsstoff,

- schlechte Wärmeleitfähigkeit bzw. Einstellung bestimmter λ -Werte,
- hohe Wärmespeicherkapazität,
- gute Dosier- und Mischeigenschaften,
- spezielle Adsorptionseigenschaften gegenüber Flüssigkeiten, Ölen oder Gaskomponenten (bei der Aufnahme von Gaskomponenten kann eine physikalische Adsorption und/oder eine Chemisorption erwünscht sein),
- hydrophobes Verhalten (durch die Hydrophobierung wird z.B. die Wasserbeständigkeit von faserhaltigen Werkstoffen erhöht),
- geruchlos bzw. Verbreitung spezieller Gerüche (z.B. zur Verhinderung von Tierfraß oder zum Einfangen von Insekten),
- Klebrigkeit zum Einfangen von Insekten.

Durch die gezielte Eigenschaftseinstellung erschließen sich für die aus Holznebenprodukten hergestellten Verbundfaserstoffe z.B. folgende Einsatzgebiete:

- Bewehrungs- und Bindestoffe für die Herstellung neuartiger Bau- und Werkstoffe z.B. unter den Bedingungen der Hochdruckverdichtung,
- Herstellung neuartiger Dämmstoffe aus brandsicheren und wasserabweisenden Faserstoffen,
 - Einsatzvarianten: - Faserspritzverfahren
 - Einstampfung in Hohlräume
 - Herstellung konfektionierter Faserstoff-Dämmstoffe (z.B. Matten)
 - Pressformkörper
- Einsatz als Bewehrungs- und Dämmstoff für das ökologische Bauen (holzfaserhaltige Ton- oder Lehmbaustoffe),
- Faserstoff als Bindemittel z.B. für die Pelletierung von Braun- und Steinkohlen (ökologisch verbrennende Brennstoffe),
- Einstreuprodukte mit tierspezifischen Eigenschaften für die Kleintierhaltung oder für Zoo-Anlagen,
- Faserstoffe für Innen- und Außenputzmörtel; Verbesserung des Haftvermögens der Mörtel beim Spritzverfahren und Erhöhung der Dämmwirkung gegenüber Wärme und Schall,
- Faserstoffe für Bitumenbauelemente, Bitumenfolien,
- Faserstoffe für die Herstellung wetterfester Pappen,
- Herstellung von flammendämmenden Werk- und Baustoffen,
- Faserstoffe zur Bewehrung von Rohziegeln oder als Porenbildner für Ziegel mit hoher Dämmwirkung,
- Faserstoffe mit der Funktion als Torfersatzstoff oder Bodenverbesserungsstoff.

6.2. Herstellung eines Holz/Asche- und Holz/Löschkalk-Faserstoffes mit erhöhtem Brandwiderstand

6.2.1. Verfahrensbedingungen

In Anlehnung an das technologische Schema in Bild 58 wurden drei Holz/Asche-Faserstoffe sowie ein Holz/Löschkalk-Faserstoff unter folgenden konkreten Verfahrensbedingungen hergestellt:

- Rohstoffe:
 - Waldhackschnitzel Fichte, $w \approx 45\%$
 - Asche Heizwerk Laubusch
 - Asche Kraftwerk Lippendorf
 - Feinasche Kraftwerk Währlitz
 - handelsüblicher Löschkalk
- Aktivierung der Kraftwerksaschen im Eirich-Mischer durch Dispergierung in Wasser, Asche : Wasser = 1 : 2,
- Aktivierung des Löschkalkes in einer Schwingmühle bei Anwesenheit von Wasser, Löschkalk : Wasser = 1 : 2,
- Vorvermischung von Hackschnitzel und Asche- bzw. Löschkalkdispersion im Eirich-Mischer

Mengenverhältnisse:

- * 60 % Holz ($w \approx 45\%$) + 40 % Asche Laubusch, trocken (HF/Lau)
- * 60 % Holz ($w \approx 45\%$) + 40 % Asche Lippendorf, trocken (HF/Li)
- * 60 % Holz ($w \approx 45\%$) + 40 % Asche Währlitz, trocken (HF/Wä)
- * 60 % Holz ($w \approx 45\%$) + 40 % Löschkalk, trocken (HF/LK)
- Zerkleinerung, Mischung und hydromechanische Aktivierung der Vormischungen im Doppelschneckenzerfaserer,
- Trocknung des Faserstoffes im Durchströmungstrockner auf $w = 7 - 12\%$ mit 120 °C heißer Trocknungsluft,
- Nachzerkleinerung des getrockneten Faserstoffes mit der Schlagnasenmühle, Austrags-sieb $d_A = 1,5\text{ mm}$.

6.2.2. Eigenschaften der Verbundfaserstoffe

Bei allen vier Stoffvarianten entsteht durch die Aktivierung der Asche, durch die speziellen Aufschluss- und Reaktionsbedingungen im Doppelschneckenzerfaserer sowie durch die Trocknung ein stabiler Verbund aus Holz und Asche bzw. Holz und Löschkalk. Der Verbund basiert hauptsächlich auf Haupt- und Nebervalenzbindekräften. Die organischen Zuschlagstoffe sind zum Teil in der inneren Porosität des Holzes eingelagert. Nach der Trocknung liegen Faserstoffe vor, bei denen keine Entmischungserscheinungen feststellbar sind. Die Staubaufwirbelung ist bei Umschlagsprozessen sehr gering.

Durch die Nachzerkleinerung der getrockneten Verbundfaserstoffe mit der Schlagnasenmühle ($d_A = 1,5 \text{ mm}$) entsteht ein wattiger und bei Handlingsprozessen etwas mehr staubender Faserstoff. Durch den stabilen Verbund von Holz und anorganischen Zusatzstoffen wird nur an der Faseroberfläche etwas Asche bzw. Löschkalk abgetrennt.

Die nachzerkleinerten Verbundfaserstoffe zeichnen sich unter den Bedingungen der Handverdichtung durch eine hohe Wärmedämmwirkung aus. Nach DIN EN 993-14 wurden nach dem Heißdraht-(Kreuz)-Verfahren für die mit Hand vorverdichteten Verbundfaserstoffe ($w \approx 10 \%$, $\rho \approx 0,3 \text{ g/cm}^3$) folgende λ -Werte ermittelt:

Verbundfaserstoff ($\rho \approx 0,3 \text{ g/cm}^3$)	Kurzbezeichnung	λ in W/mK
60 % Holz + 40 % Asche Laubusch	HF/Lau	0,068
60 % Holz + 40 % Asche Lippendorf	HF/Li	0,075
60 % Holz + 40 % Feinasche Wählitz	HF/Wä	0,068
60 % Holz + 40 % Löschkalk	HF/LK	0,067

Die Faserstoffe können als Dämmstoffe genutzt werden. Sie haben aber gegenüber Granulaten den Nachteil, dass sie schlecht austrocknen, wenn in die Dämmschicht versehentlich Wasser eingedrungen ist.

Alle Verbundfaserstoffe können trotz des hohen Anteiles von 60 Ma.-% Holz (der Volumenanteil ist viel größer) in ein Granulat mit der Körnung $\Delta d \approx 1$ bis 6,3 mm überführt werden. Voraussetzung dafür ist, dass das Mischgut aus 60 % Holz und 40 % Asche (bzw. Löschkalk) sofort nach dem Doppelschneckenzerfaserer im feuchten Zustand mit dem Eirichmischer granuliert wird. Die Granulate mit der Körnung 1 bis 6,3 mm sind nach der Trocknung auf $w \approx 8 - 15 \%$ fest und vor allem auch wasserbeständig. Letzteres ist bei dem hohen Anteil an Holzfaserstoff ein besonders bemerkenswertes Ergebnis. Für die Granulate wurden

vor und nach 24 Stunden Wässerung folgende hohe Sturzfestigkeiten (Sturzrohr; Bild 36) gemessen:

Verbundfaserstoff	Kurzbezeichnung	Sturzfestigkeit St1(100) in %	
		vor Wässerung	nach 24 h Wässerung
60 % Holz + 40 % Asche Laubusch	HF/Lau	98,2	98,6
60 % Holz + 40 % Asche Lippendorf	HF/Li	95,2	94,6
60 % Holz + 40 % Feinasche Wählietz	HF/Wä	96,2	93,5
60 % Holz + 40 % Löschkalk	HF/LK	95,2	90,4

Die Granulate sind hart und haben bei der Druckbelastung einen relativ hohen Verdichtungswiderstand (Bild 60). Der Verdichtungswiderstand ist am größten, wenn die Asche aus dem Heizwerk Laubusch zum Einsatz kommt. Beim Zusatz von Löschkalk ist der Verdichtungswiderstand deutlich geringer, weil der Löschkalk erst dann hart wird, wenn er sich nach längerer Zeit mit CO_2 in CaCO_3 umgewandelt hat. Im Fall der Asche Laubusch führt der hohe Anteil an Gips-Anhydrit nach sehr kurzer Zeit zur Verfestigung. Bei der Druckbelastung im Drucktopf mit $p_{\text{max}} = 1 \text{ MPa}$ werden die Granulate zu einem wenig festen Formkörper verdichtet, der aber schon bei geringer mechanischer Beanspruchung (zumeist schon beim Ausstoßen aus der Verdichtungskammer) in ein körniges Granulat zerfällt. Die Kornzerstörung bei der Druckbeanspruchung ist sehr gering.

Die Entzündbarkeit der Verbundfaserstoffe wird trotz des hohen Holzanteiles von 60 Ma.-% ($w \approx 45 \%$) durch den Zusatz von 40 % Asche bzw. Löschkalk sehr wirksam unterdrückt. Die Testversuche zum Zünd- und Brandverhalten wurden mit dem Werner-Ofen (Bild 20) durchgeführt. Die Probegüter werden bei dieser Testmethode in einen Drahtkäfig gefüllt und per Hand verdichtet ($\rho \approx 0,3 \text{ g/cm}^3$). Der Aufheizprozess in der mit Luft gespülten Ofenkammer erfolgte mit einer Aufheizgeschwindigkeit von 10 K/min bis 500 °C. Danach wurde der Ofenraum 1 Stunde bei 500 °C auf Temperatur gehalten, bevor die Beheizung abgebrochen wurde. Die Holzfasern ohne Zusatzstoffe zünden bei einer Ofentemperatur von $\approx 376 \text{ °C}$. Mit der Zündung wird ein schneller Abbrand der Holzfasern mit langer Flammenbildung eingeleitet. Die Verbundfaserstoffe mit 40 % Asche oder 40 % Löschkalk erfahren im Temperaturbereich von 195 bis 220 °C eine zunehmende Schwarzfärbung an den Seitenflächen des Drahtkäfigs und auf der Oberfläche. Eine Zündung mit nachfolgendem Abbrand des Probegutes war bei keiner Probe feststellbar. Vereinzelt wurden kleine Flammen gezündet, die sofort erloschen. Aus der Sicht des Brandschutzes wären die Verbundfaserstoffe hochwertige Dämmstoffe, z.B. für das Einfüllen in Hohlräume.

Die Verbundfaserstoffe wurden befeuchtet und 6 Monate in Blumentöpfen gelagert. Die Faserstoffe haben eine hohe Resistenz gegenüber biologischem Abbau. Strukturelle Veränderungen, Schimmelbildung oder Geruchsentwicklung waren nicht erkennbar.

6.3. Herstellung eines Holz/Löschkalk-Faserstoffes für die Gasreinigung

Unter den im Punkt 6.2.1. angegebenen Verfahrensbedingungen wurde ein Faserstoff aus 80 % Holzhackschnitzeln und 20 % Löschkalk hergestellt, der sich sehr gut als durchströmbarer Sorptionsstoff für die Bindung von sauren Schadgasen (H_2S , SO_2 , HCl , NO_3 , H_3P u.a.) aus Abgasen eignet.

Löschkalk ist bekanntermaßen ein billiger Sorptionsstoff für die Gasreinigung. Er reagiert aber nur dann schnell und vollständig mit den Schadgasen, wenn er feucht ist. Feuchter Löschkalk allein ist in der Schüttung von Gasen nur schwer durchströmbar. Die Schüttung verkrustet sehr schnell infolge von Reaktionen des Löschkalkes mit den Schadgasen zu einer nahezu undurchlässigen Masse. Das ist vor allem bei der Reaktion von feuchtem Löschkalk mit SO_2 der Fall, weil der entstehende Gips die Kalkpartikel verbindet. Das Problem wird gelöst, wenn der Löschkalk im Zuge der Faserherstellung fest mit den Holzfasern verbunden wird (Bild 2). Die Holzfasern sind dann der Träger- und Dispergierstoff für den Löschkalk. Der Holz/Löschkalk-Faserstoff bleibt durchströmbar und kann gute Sorptionsergebnisse erreichen, wenn der Löschkalkanteil $\leq 30\%$ beträgt.

Das Bild 61 zeigt z.B. die in einer Filterapparatur gemessene Aufnahme von SO_2 durch den wiederbefeuchteten Faserstoff mit 20 % Löschkalk ($w \approx 40\%$) bei einer Schwefeldioxydkonzentration des Rohgases von 4000 ppm und einer Sorptionstemperatur von $23\text{ }^\circ\text{C}$.

Der Löschkalk wird vollständig in CaSO_3 bzw. CaSO_4 umgewandelt, wenn der Faserstoff während des Sorptionsprozesses hinreichend feucht bleibt. Der Holz/Löschkalk-Faserstoff ist vor allem für die Verminderung von Emissionen aus Kleinanlagen bei Raumtemperatur des Abgases nutzbar (Mülldeponien, Kompostieranlagen, Klärwerke u.a.). Die Entsorgung des beladenen Faserstoffes ist in Kraftwerken oder Müllverbrennungsanlagen mit REA-Anlagen möglich. Das Gut kann gelagert werden, weil die Schadstoffe chemisch gebunden sind und keine Desorption stattfindet.

6.4. Herstellung eines Holz/Kohle-Faserstoffes

6.4.1. Verfahrensbedingungen

Faserstoffe aus Holz (Bild 62, oben) haben den Nachteil, dass sie stark hygroskopisch sind, sich durch den Aufschluss der inneren Porosität beim Zerfaserungsprozess schnell mit Wasser voll saugen und dadurch im Wasser absinken. Sie sind außerdem gegenüber biologischem Abbau unter feuchten Bedingungen wenig resistent. Die genannten Nachteile werden weitgehend beseitigt, wenn das Holz gemeinsam mit möglichst bitumenreicher Weichbraunkohle im Doppelschneckenzerfaserer zerfasert wird. Durch den intensiven hydrothermalen Aufschluss der Rohstoffe und die günstigen Reaktionsbedingungen im Doppelschneckenzerfaserer entsteht ein Faserstoff, der kein normales Gemisch aus Holzfasern und Weichbraunkohle ist, sondern ein stabiler Holz/Kohle-Verbundfaserstoff, bei dem der überwiegende Teil der aktivierten Braunkohle stabil mit den Holzfasern verbunden ist. Der Verbund basiert auf Neben- und Hauptvalenzbindungen. Das Holz wird im Doppelschneckenzerfaserer mit der ligninstämmigen Weichbraunkohle künstlich „lignifiziert“ und dadurch vorteilhaft veredelt.

In Anlehnung an das technologische Schema in Bild 58 wurde ein Holz/Kohle-Verbundfaserstoff unter folgenden konkreten Verfahrensbedingungen hergestellt:

- Rohstoffe: * Rohbraunkohle ROMONTA, $w \approx 55\%$
 - * Waldhackschnitzel Fichte, $w \approx 45\%$
- Zerfaserung, Mischung und hydromechanische Aktivierung im Doppelschneckenzerfaserer;
gemeinsame Aufgabe von Hackschnitzeln und Kohle
Mengenverhältnis: 70 % Hackschnitzel
30 % Rohbraunkohle
- Trocknung des Faserstoffes im Durchströmungstrockner auf $w \approx 10\%$ mit 120 °C heißer Trocknungsluft,
- Nachzerkleinerung des getrockneten Faserstoffes mit der Schlaghasenmühle, Austrags-sieb $d_A = 1,5\text{ mm}$.

Das Bild 62, unten, zeigt den Holz/Kohle-Faserstoff als Mikroskopaufnahme. Es sind keine Braunkohlenpartikel zu sehen. Die Braunkohle scheint vollkommen in die Holzfasern eingearbeitet zu sein. Der Zusatzstoff ist nur an der etwas dunkleren Färbung des Faserstoffes zu erkennen.

6.4.2. Eigenschaften des Holz/Kohle-Verbundfaserstoffes

Der neue Holz/Kohle-Verbundfaserstoff hat z.B. folgende Eigenschaften:

- wesentlich verringerte Hygroskopizität,
- keine Wasseraufsaugung beim Kontakt mit Wasser durch partielle Hydrophobierung und durch Verschluss von Porenöffnungen,
- auf Wasser über Monate schwimmfähig.

Er ist ein relativ billiges und vielseitig nutzbares Produkt, für den ohne Zweifel noch viele Einsatzgebiete erschlossen werden können. Erprobte oder sich in der Erprobung befindende Einsatzgebiete sind z.B.:

- Verwendung als Bodenbedeckungsstoff (Verhinderung von Graswuchs, von zu schneller Austrocknung sowie von Überhitzung oder Auskühlung von Böden),
- Herstellung von Holz/Kohle-Werkstoffen,
- Verwendung als Bindemittel z.B. für die Agglomeration von Feinsteinkohlen,
- Verwendung als Dämmstoff z.B. in konfektionierter Form,
- Bewehrungsstoff für Bau- und/oder Werkstoffe u.a.m.

Ein Beispiel zum letzten Anwendungspunkt sind Pressformkörper aus REA-Gips, in denen Holz/Kohle-Verbundfasern als Armierungsmittel fungieren. In den Kraftwerken fallen großen Mengen an REA-Gips an. Der Absatz in den verschiedenen Bereichen der Baustoffindustrie ist begrenzt, weil für die bekannten Einsatzgebiete für Gips der Markt gesättigt ist. Anhand von Testversuchen kann bestätigt werden, dass die Qualität von Formkörpern aus reaktiviertem REA-Gips (Halbhydrat) durch den Zusatz an Holz/Kohle-Fasern wesentlich verbessert wird. Die Formkörper wurden unter folgenden Verfahrensbedingungen hergestellt:

- Zumischung von 15 % Holz/Kohle-Faserstoff (Holz/Kohle = 70/30),
- Zumischung von 13 % Wasser oder Quarkwasser (Rohquark : Wasser = 20 : 80),
- Guttemperatur bei der Verpressung $\vartheta_p = 20 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Temperatur der Pressform $\vartheta_{\text{Form}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Pressdruck $p = 100 \text{ MPa}$,
- Pressdauer $t_p = 60 \text{ s}$,
- Presslingsformat 100 x 60 x 18 mm.

Zum Vergleich wurden unter analogen Verpressungsbedingungen auch Pressformkörper aus REA-Halbhydrat und kohlefreiem, im Doppelschneckenzerfaserer erzeugten Holzfaserverstoff sowie ohne Holzfaserverstoff hergestellt.

Bei der Verpressung des Gipses ohne Faserstoffe entstehen relativ feste, aber auch leicht zerbrechliche Pressformkörper. Etwa 30 % der Pressformkörper zerbrechen schon beim Ausstoßen aus der Pressform, weil sie bei dem hohen Pressdruck sehr fest in der Form eingespannt sind. Diese hohe Ausschussquote ist allein schon ein Grund dafür, dass die Herstellung von Pressformkörpern aus reinem REA-Halbhydrat von geringem praktischen Interesse ist.

Durch den Zusatz von Faserstoffen als Bewehrungsstoff erhöht sich die Biegefestigkeit der Gipspresslinge ein ansprechendes Niveau. Des Weiteren werden keine Presslinge mehr beim Ausstoßen aus der Pressform beschädigt. Nach den Ergebnissen im Bild 63 werden folgende wesentliche Ergebnisse erzielt:

- Die Höhe der Biegefestigkeit der Pressformkörper wird durch die Art des zugesetzten Faserstoffes nur wenig beeinflusst.
- Die Biegefestigkeit der Pressformkörper fällt bei einer 3-stündigen Wässerung aber stark ab, wenn als Faserstoff reines Holz und als Anmachflüssigkeit Wasser verwendet werden.
- Die Wasserbeständigkeit der Pressformkörper ist deutlich besser, wenn
 - * als Faserstoff statt reines Holz der wesentlich weniger hydrophile Holz/Kohle-Verbundfaserstoff verwendet wird und
 - * als Anmachflüssigkeit statt Wasser 20 %iges Quarkwasser verwendet wird.

Zwischen Quarksubstanz und Gips, der Holzsubstanz und der Kohle laufen thermochemische Reaktionen bei der Trocknung ab, die zur Ausbildung wasserbeständiger Reaktionsverbunde führen.

Die Pressformkörper haben den großen Vorteil, dass sie für den gleichen Einsatzfall recyclebar sind. Die Gipswerkstoffe aus

15 % Holz/Kohle-Verbundfaserstoff
85 % Gips-Halbhydrat
<hr/>
+ 13 % Quarkwasser (20%ig)

wurden nach dem Abbinden erneut zerkleinert und in der Trockenröhre bei einer Heizflächentemperatur von $\vartheta = 180 \text{ °C}$ wieder kalziniert. Dabei wird das mit Quarkwasser abgebundene Gips-Dihydrat wieder in bindungsfähiges Gips-Halbhydrat umgewandelt. Das Gemisch aus reaktiviertem Gips und Holz/Kohle-Faserstoff (von Erstverpressung) wurde erneut mit 13 % Quarkwasser (20 %-ig) verpresst. Bei der Zweitverpressung wurden unter sonst vergleichbaren Bedingungen folgende Ergebnisse erzielt:

	Erstverpressung	Zweitverpressung nach Reaktivierung
σ_b in MPa	10,8	9,4
σ_{b3} in MPa (nach 3 h Wässerung)	9,4	10,1

6.5. Herstellung eines Xylitfaserstoffes

Xylit ist ein Begleitrohstoff der Braunkohle, bei dem die Faserstruktur der ursprünglichen Pflanzen noch erhalten ist. Aus ihm lässt sich wie aus Holz ein Faserstoff mit wattiger Struktur durch Auffasern im Doppelschneckenzerfaserer und Nachzerkleinern mit einer Schlagnasenmühle mit Austragsieb gewinnen. Infolge des Inkohlungsprozesses haben die Xylitfasern jedoch einige Vorteile gegenüber Holzfasern:

- höhere Reißfestigkeit,
- höhere Wasserbeständigkeit,
- hydrophober im getrockneten Zustand,
- höhere Resistenz gegenüber Mikroorganismen,
- geringere Entzünd- und Brennbarkeit.

Deswegen wurde der Xylit in die Untersuchungen einbezogen. In Anlehnung an das technologische Schema in Bild 58 wurde ein reiner Xylitfaserstoff und ein Verbundfaserstoff aus 70 % Xylit und 30 % REA-Gips (Dihydrat) unter folgenden konkreten Verfahrensbedingungen hergestellt:

- Rohstoffe: * Faserxylit LAUBAG, $w \approx 50$ %
* REA-Gips MIBRAG, $w \approx 14$ % (Filterkuchen)
- Zerfaserung, Mischung und hydromechanische Aktivierung im Doppelschneckenzerfaserer
 - * Aufgabe von reinem Faserxylit,
 - * gemeinsame Aufgabe von Faserxylit und REA-Gips
Mengenverhältnis: 70 % Xylit
30 % REA-Gips,
- Trocknung des Faserstoffes im Durchströmungstrockner auf $w = 10 - 15$ % mit 120 °C heißer Trocknungsluft,
- Nachzerkleinerung des getrockneten Faserstoffes mit der Schlagnasenmühle, Austragsieb $d_A = 1,5$ mm.

Bei der Eigenschaftsermittlung der Xylitfaserstoffe stand das Zünd- und Brennverhalten im Vordergrund. Die Proben wurden hierzu wie im Abschnitt 6.2.2. beschrieben im Werner-

Prüfofen bis auf 500 °C erhitzt. Danach wurde der Ofenraum bei 500 °C auf Temperatur gehalten. Es war folgendes zu beobachten:

1. zerfaserter Braunkohlenxylylit $w \approx 15$ % ohne Zusätze

- Ofenraumtemperatur 230 °C: Beginn Qualmbildung
- Ofenraumtemperatur 374 °C Zündung, danach schnelle Ausbreitung der Flammen über das gesamte Probegut; Abbrand mit ca. 200 mm langen Flammen.

2. Verbundfaserstoff aus 70 % Braunkohlenxylylit und 30 % REA-Gips

- Ofenraumtemperatur 265 °C Beginn Qualmbildung
- Ofenraumtemperatur 500 °C gelegentliche Ausbildung von kleinen Flammen, die aber selbst erlöschen.
- Ofenraumtemperatur 500 °C (Ausstehdauer 1 h) kein Abbrand, nur kurzzeitiges Aufflammen; Ausbildung von Glimmnestern in der Probe.

Die angewandte Prüfmethode zum Zünd- und Brennverhalten ist nicht DIN-gerecht. Positive Ergebnisse mit dem Werner-Ofen lassen jedoch erfahrungsgemäß erwarten, dass bei der Prüfung nach DIN-Vorschriften sehr gute Resultate erzielt werden. Entscheidend ist vorerst der Befund, dass durch den Zusatz von REA-Gips die Neigung des Xylites zur Entzündung beträchtlich unterdrückt wird.

7. Energetische und wirtschaftliche Bewertung der Verfahren

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen mit den entsprechenden technologischen Fließbildern, Stoffströmen und Kostenkalkulationen wurden beispielhaft für folgende Produkte angestellt:

- hochverdichtete Pressformkörper aus 60 % Holzhackschnitzel ($w \approx 45$ %) und 40 % Kraftwerksasche,
- niedrigverdichtete Pressformkörper aus 25 % Holzfaserverstoff ($w \approx 50$ %) und 75 % Aschebrei ($w \approx 55,5$ %),
- Granulat aus 85 % Rohbraunkohle ($w \approx 55$ %) und 15 % REA-Gips ($w = 12$ %),
- Granulat aus 90 % Kraftwerksasche und 10 % Holzmehl ($w = 5$ %),
- Faserstoff aus 60 % Holzhackschnitzel ($w = 45$ %) und 40 % Kraftwerksasche.

Die zugrunde gelegten technologischen Schemata entsprechen den in den Kapiteln 3. - 6. unterbreiteten Verfahrensvorschlägen. Die Ergebnisse sind in den Anlagen 1 - 5 zusammen-

gefasst. Es wurde das für Chemieanlagen übliche Kalkulationsschema angewandt, weil ein analoges für verfahrenstechnische Anlagen nicht zur Verfügung stand. Bei verfahrenstechnischen Anlagen ist der Aufwand für Nebengeräte, das sind insbesondere Stahlbau, Förder-technik, Mess- und Automatisierungstechnik, nicht so hoch wie für Chemieanlagen. Es wurde deshalb eine Reduzierung dieses Kostenpunktes von über 50 % (Chemieanlagen) auf 20 % bezogen auf die Investitionen für die Hauptaggregate vorgenommen.

Zur Herstellung der Produkte ist mit Ausnahme des Aschegranulates ein hoher Trocknungsaufwand erforderlich. Eine ausreichend schnelle Trocknung ist mit Abwärme (z.B. 150 °C heiße Luft) möglich. Es wurde angenommen, dass für die Bereitstellung der Abwärme keine Kosten anfallen.

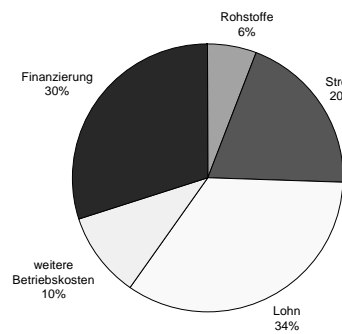
Ziel der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist es, neben den Gesamtproduktionskosten die Energiekosten für die Herstellung auszuweisen. Diese ergeben sich, wenn man die Trocknungswärme nicht mit berücksichtigt, insbesondere aus den Stromkosten. Aber auch in den Rohstoffkosten stecken zu über 60 % der für die Gewinnung und Aufbereitung benötigte Energieaufwand. Es wird deshalb vorgeschlagen, zur energetischen Bewertung der neuen Verfahren Stromkosten und Rohstoffkosten in Summe zu betrachten. Das Ziel der Produktentwicklung sind niedrige Gesamtkosten, die die Marktfähigkeit bestimmen, sowie ein niedriger Kostenanteil für den Energieverbrauch, der für die Schonung der Umwelt und die Sicherung einer nachhaltigen Entwicklung wichtig ist. Unter diesem Aspekt sollen die neuen Produkte zunächst im Vergleich zueinander und im nächsten Kapitel auch im Vergleich zu bekannten Baustoffen bewertet werden.

Die Anlagen sind als Pilotanlagen mit relativ geringen Durchsätzen ausgelegt worden, um die gesamte Anlagentechnik übersichtlich im Sinne der Maschinenanzahl zu halten. Dabei wurden Maschinen ausgewählt, deren Wirkprinzip sich in den experimentellen Untersuchungen zur Herstellung der Produkte bereits bewährt hatte.

1. Hochverdichtete Pressformkörper aus Holzhackschnitzeln und Kraftwerksasche (Anlage 1)

Das Kernstück der Anlage sind zwei 8000 kN-Säulenstempelpressen, mit denen bei einer Mindestpressdauer von 2 min ein Produktdurchsatz von 0,5 t/h Formkörper (Ziegelsteinformat) realisierbar ist. Die notwendige hohe Pressdauer für die Hochdruckverdichtung ist durchsatzbegrenzend, was die Produktionskosten in die Höhe treibt.

Übersicht Gesamtkosten für hochverdichtete Pressformkörper



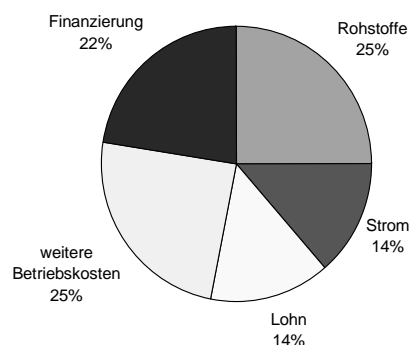
geschätzte Herstellungskosten: 438,13 EUR/t
657,21 EUR/m³
46,00 EUR/m².

Die hohen Herstellungskosten erschweren die Vermarktung des Produktes. Daran ändert auch die Tatsache nichts, dass mit 26 % die Summe von Rohstoff- und Stromkosten in dieser Relation auf ein energiesparendes Verfahren hinweist.

2. Niedrigverdichtete Pressformkörper aus Holzfaserstoff und Aschebrei (Anlage 2)

Zur Herstellung der niedrigverdichteten Pressformkörper muss keine verlängerte Pressdauer angewandt werden. Der Pressvorgang ist mit Erreichen des Maximaldruckes praktisch abgeschlossen. Dieser Umstand sowie die Anwendung niedriger Pressdrücke ermöglicht den Einsatz von Bandpressen, wobei von einem bei der Faserplattenherstellung üblichen Bandvortrieb (10 m/min) ausgegangen werden kann. Durch den Übergang von der diskontinuierlichen Stempelpresse zur kontinuierlichen Bandpresse mit wesentlich höheren Durchsätzen reduzieren sich die Herstellungskosten dramatisch.

Übersicht Gesamtkosten für niedrigverdichtete Pressformkörper



geschätzte Herstellungskosten: 18,10 EUR/t
21,72 EUR/m³
0,87 EUR/m².

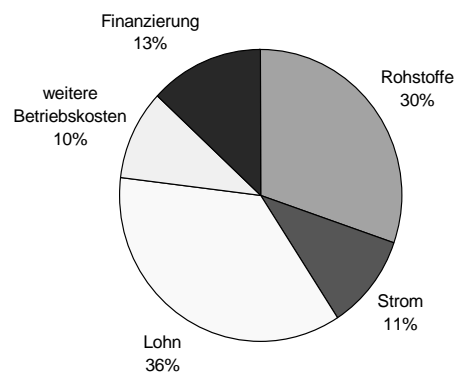
Der Preis für die Bandpresse dieser Kleinanlage musste geschätzt werden, da entsprechende Angaben von den Herstellern nicht zu erhalten waren. Aber selbst wenn die Presse wesentlich teurer wäre und auch die Kosten der für die Konditionierung des Holzfaserstoffes benötigten Dämpfer nicht in der 20 %-Pauschale untergebracht werden könnten, blieben die Gesamtkosten dennoch sehr niedrig. Würden zum Beispiel die Investitionskosten von den angenommenen 3,5 Mio. EUR auf 11 Mio. EUR steigen, hätte das nur einen Anstieg der Tonnenkosten auf ca. 26 EUR und der Quadratmeterkosten auf ca. 1,2 EUR zur Folge.

Die Kostenanalyse bestätigt für das Produkt ein hohes praktisches Nutzungspotential. Mit 39 % erfüllt die Summe von Rohstoffkosten und Stromkosten auch den Anspruch an ein energiesparendes Verfahren.

3. Granulat aus Rohbraunkohle und REA-Gips (Anlage 3)

Da für die Herstellung von Braunkohlengranulat mit REA-Gips-Zusatz nur wenig Verfahrensschritte erforderlich sind, werden die Herstellungskosten von den Rohstoffkosten und den Lohnkosten dominiert.

Übersicht Gesamtkosten für das Braunkohlengranulat



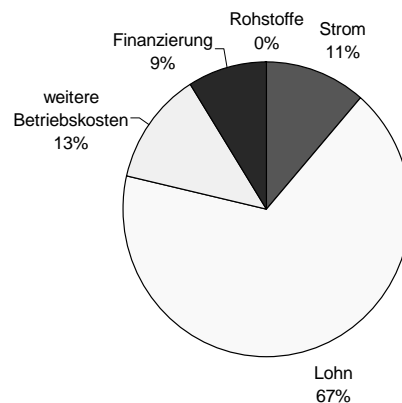
geschätzte Herstellungskosten: 41,68 EUR/t
 25,01 EUR/m³.

Aufgrund der guten bauphysikalischen Eigenschaften und der vergleichsweise geringen Herstellungskosten kann dieses Granulat für einen Einsatz als schüttbarer Baustoff mit Dämmwirkung, wie er zum Beispiel zum Ausgleich von Fußböden benötigt wird, empfohlen werden. Die Summe von Rohstoff und Stromkosten beträgt 41 %. Damit wird ein relativ niedriger Energieeinsatz ausgewiesen.

4. Granulat aus Kraftwerksasche und Holzmehl (Anlage 4)

Nach dieses Verfahren können Baustoffgranulate besonders kostengünstig hergestellt werden. Bei der Kostenkalkulation wurde für die Kraftwerksasche ein Entsorgungspreis (Deponiekosten) von 5 EUR/t angenommen, der dem Granulathersteller gutgeschrieben werden kann. Daraus resultiert ein Minusbetrag für die Rohstoffgesamtkosten. Das Rohgranulat muss nicht nachgetrocknet werden, da das Wasser zum größten Teil durch die hydratationsfähigen Aschebestandteile gebunden wird. Damit kann der Bandrockner entfallen. Infolge der geringen Rohstoff- und Investitionskosten werden die Gesamtkosten durch den Lohn dominiert.

Übersicht Gesamtkosten für das Aschegranulat



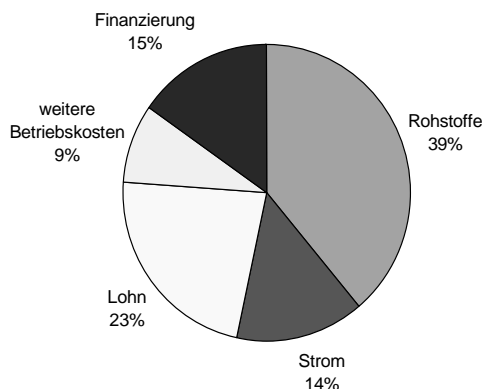
geschätzte Herstellungskosten: 21,73 EUR/t
 17,38 EUR/m³.

Da in einem Kreisdiagramm ein Negativwert nicht dargestellt werden kann, wurden die Rohstoffkosten mit Null Prozent angesetzt. Dadurch werden die Kostenrelationen im vorliegenden Fall aber nur wenig verzerrt. Die Summe von Rohstoff- und Stromkosten von nur 11 % weisen das Verfahren auch als besonders energiesparend aus.

5. Faserstoff aus Holzhackschnitzel und Kraftwerksasche (Anlage 5)

Das Kernstück der Anlage bilden die beiden Doppelschneckenzerfaserer und der Bandrockner. Als Faserrohstoff können z.B. Waldhackschnitzel eingesetzt werden, für die ein Preis von 38 EUR/t ermittelt wurde. Mit diesem Preis liefern die Rohstoffe den höchsten Beitrag an den Gesamtkosten.

Übersicht Gesamtkosten für den Faserstoff aus Holzhackschnitzeln



geschätzte Herstellungskosten: 66,19 EUR/t
 19,86 EUR/m³.

Im Vergleich zu den Preisen handelsüblicher organischer und anorganischer Faserstoffe, die in der Baubranche als Dämmstoffe eingesetzt werden, sind die Tonnen- und Kubikmeterkosten für den Faserstoff aus Holzabfall und Kraftwerksasche sehr niedrig. Zusammen mit den vorteilhaften bauphysikalischen Eigenschaften kann hieraus ein hohes Potential für die praktische Anwendung abgeleitet werden. Trotz der relativ hohen Summe von Rohstoff- und Stromkosten von 53 % kann das Verfahren im Vergleich zu bekannten Methoden der Holzfaserstoffgewinnung auch als energiesparend bezeichnet werden.

Die hier vorgenommenen Kostenanalysen für die fünf Produkte stellen Kostenschätzungen dar. Eine genaue Kostenaufschlüsselung wird erst möglich, wenn alle Details der Herstellungsverfahren bekannt sind. Das ist frühestens dann der Fall, wenn die Überführung der Verfahrensvorschläge in den technischen Maßstab abgeschlossen ist. Die Kostenschätzungen geben aber wichtige Vorinformationen über die zu erwartende Größenordnung der Aufwendungen und über die Aufwandsrelationen.

Beim Kostenvergleich ist des Weiteren zu berücksichtigen, dass bei größeren Anlagen mit höheren Durchsätzen die produktmengenbezogenen Aufwendungen in der Regel wesentlich niedriger sind.

8. Nutzen und Verwertungspotential der Forschungsergebnisse

Das Verwertungspotential der nach den neuen Verfahrenskonzepten hergestellten Produkte auf dem Bausektor wird neben ihren bauphysikalischen Eigenschaften in erster Linie durch den Preis bestimmt. Aus diesem Grund ist ein Preis/Kosten-Vergleich mit traditionellen Baustoffen unerlässlich. In der nachfolgenden Tabelle sind die geschätzten Kosten für die neuen Pressformkörper den Handelspreisen von Ziegelsteinen, Spanplatten und Faserplatten gegenübergestellt:

	hochverd. Formkörper Holz/Asche	niedrigverd. Formkörper Holz/Asche	Planziegel ¹⁾	Blockziegel ¹⁾	Spanplatte ¹⁾	Faserplatte ¹⁾
Typ			SX11	SH13	Rohspanpl.	Roh-MDF-Platte
Dichte [g/cm ³]	1,5	1,2	0,60	0,70	0,54	0,65
Preis/Kosten						
EUR/t	438	18	241	152	511	538
EUR/m ³	657	22	145	107	276	350

¹⁾ Literaturstelle [8]

Ein unmittelbarer Vergleich der Produkte ist wegen der unterschiedlichen bauphysikalischen Eigenschaften und der daraus resultierenden unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten nicht möglich. Außerdem ist zu beachten, dass die Handelspreise um etwa ein Drittel höher sind als die Herstellungskosten. Dennoch ist der Zahlenvergleich prinzipiell aussagefähig. Er besagt, dass eine praktische Nutzung der hochverdichteten Pressformkörper nur im Ausnahmefall wirtschaftlich sein wird. Es müssten hier spezielle Anwendungen in Nischenbereichen gefunden werden, wo die besonderen Eigenschaftsmerkmale, wie z.B. die sehr hohen Druck- und Biegefestigkeiten oder das sehr gute Bearbeitungsvermögen der Formkörper, unbedingt gebraucht werden und daraus der Herstellungsaufwand sich rechtfertigt. Demgegenüber kann für die niedrigverdichteten Formkörper aus Holz und Asche ein hohes Anwendungspotential festgestellt werden. Sie sind etwa gleich fest wie gute Ziegelsteine, haben aber eine bedeutend geringere Wärmeleitfähigkeit (0,3 W/mK gegenüber ca. 0,6 W/mK) und würden sich daher besonders gut für das einschalige Bauen eignen. Im Preis können sie alle vergleichbaren Baustoffe schlagen.

Die nächste Tabelle ermöglicht einen Kosten/Preis-Vergleich auf dem Gebiet der Baustoffgranulate:

	Granulat Braunkohle/ REA-Gips	Granulat Asche/Holzmehl	Ceralith ¹⁾ Ausgleichsschüttung	Liapor ¹⁾ (Blähton)	Fermacell ¹⁾ (mineralisch)	Schaumglas ²⁾
Schüttdichte [g/cm ³]	0,60	0,80	0,14	0,3 - 0,5	0,37	0,11 - 0,17
λ-Werte [W/mK]	0,101	0,163	0,08	0,10 - 0,14	0,09	0,04 - 0,06
Preis/Kosten EUR/t	42	22	928	408	551	2071
EUR/m ³	25	17	130	163	204	290

¹⁾ Literaturstelle [8]

²⁾ Literaturstelle [9]

Die Granulate aus Braunkohle und REA-Gips sowie aus Asche und Holzmehl sind seitens ihrer bauphysikalischen Eigenschaften am ehesten mit handelsüblichen Blähtonen vergleichbar. Sie haben aber einen vielfach geringeren Herstellungsaufwand. Die neuen Granulate sind keine ausgesprochenen Dämmgranulate. Dafür ist der λ-Wert ihrer Schüttungen zu hoch. Sie zeichnen sich jedoch gegenüber den meisten handelsüblichen Dämmgranulaten durch eine wesentlich höhere Druckfestigkeit aus, was zum Beispiel sehr vorteilhaft für einen Einsatz als trittfeste Fußbodenausgleichsschicht ist. Ein weiterer Vorteil insbesondere gegenüber reinen mineralischen Produkten ist ihr relativ hohes Wärmespeichervermögen. Zusammen mit den niedrigen λ-Werten der Schüttung ergeben sich daraus interessante Möglichkeiten für ein energiesparendes Bauen.

Auch die Herstellung des neuen Faserstoffes aus Holzabfällen und Asche ist wesentlich kostengünstiger im Vergleich zu handelsüblichen Faserstoffen.

	Faserstoff Holz/Asche	Holzwolle ¹⁾	Flachs ¹⁾	Baumwolle ¹⁾	Mineralwolle ¹⁾
Dichte [g/cm ³]	0,30	0,36 - 0,48	0,020 - 0,080	0,025 - 0,030	0,13 - 0,20
λ-Werte [W/mK]	0,068	0,09	0,04 - 0,045	0,04	0,035 - 0,040
Preis/Kosten EUR/t	66	369	3400	3636	545
EUR/m ³	20	155	170	100	90

¹⁾ Literaturstelle [9]

Der Vergleich bietet sich zunächst mit der Holzwolle an. Diese hat eine etwas höhere Dichte und höhere Wärmeleitfähigkeit sowie einen vielfach höheren Herstellungsaufwand. Letzteres

trifft auch auf solche Naturfaserstoffe wie Flachs und Baumwolle zu. Die bessere Dämmwirkung von Flachs und Baumwolle ließe sich deshalb durch eine höhere Schichtdicke bei dem neuen Holz/Asche-Faserstoff ohne Kostennachteil ausgleichen. Gegenüber allen Naturfaserstoffen hat der Holz/Asche-Faserstoff den Vorteil der Resistenz gegen mikrobiellen Abbau, so dass er auch mit der beständigen Mineralwolle konkurrieren könnte.

Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass aufgrund des geringen Herstellungsaufwandes und der vorteilhaften bauphysikalischen Eigenschaften für die Produkte

- niedrig verdichtete Formkörper,
- Granulate und
- Faserstoff

ein hohes Nutzungspotential im Baustoffsektor besteht. Die geringen Gesamtkosten sowie der geringe Anteil an diesen infolge Rohstoffeinsatz und Stromverbrauch weisen die neuen Herstellungsverfahren zugleich als energiesparende Verfahren aus. Für die energetische Bewertung sollten außerdem die Beiträge zur Energieeinsparung mit herangezogen werden, die bei der Anwendung und Entsorgung der Produkte zu erzielen sind. Sie resultieren zum Beispiel aus der Dämmwirkung und dem Wärmespeichervermögen, aus dem vorhandenen Formwert, der eine Nachbearbeitung erübrigt, aus der Möglichkeit einer thermischen Entsorgung. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die neuen Produkte zum überwiegenden Teil aus bislang nur unzureichend genutzten Abfallstoffen bzw. Reststoffen erzeugt werden und keine Stoffumwandlungsverluste und Schadstoffemissionen bei der Herstellung auftreten. Mit der Überführung der Verfahren in die Praxis könnte somit ein effektiver Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung geleistet werden.

Die Basisrohstoffe für die neuen Produkte sind Holznebenprodukte (Hackschnitzel, Sägespäne), Kraftwerksasche, Löschkalk, REA-Gips und Braunkohle. Darauf begründet sich eine wesentliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für diejenigen Unternehmen, die diese Rohstoffe produzieren (Forstwirtschaftsbetriebe, Kraftwerke, Braunkohlenwerke) und an einer höherwertigen Veredlung interessiert sind. Nutzer der Forschungsergebnisse sollen insbesondere mittelständische Unternehmen sein, die die neuen Verfahrensprinzipien zur Herstellung der Veredlungsprodukte anwenden. Die neuen Produkte eröffnen neue Einsatzgebiete für die Rohstoffe und schaffen neue Betätigungsfelder.

Bedeutung haben die Forschungsergebnisse des Weiteren für die mittelständischen Unternehmen auf dem Baustoffsektor, die bestrebt sind, in verstärktem Maße alternative Rohstoffe als Dämmmaterialien, Werkstoffe und Konstruktionselemente einzusetzen. Der angesichts steigender Preise von Öl und Gas gegenwärtig stark zunehmende Trend der alternativen

und energiesparenden Rohstoffnutzung könnte durch die Forschungsergebnisse maßgeblich unterstützt werden.

Die Forschungsergebnisse sind außerdem von Nutzen für Firmen, die Zerkleinerungs- und Zerfaserungsapparate, Mischer, Trockner und Pressen herstellen. Die Realisierung der erarbeiteten Verfahrensvorschläge ist mit anlagentechnischen Entwicklungen verbunden, von denen wertvolle Impulse für den Anlagenbau und Maschinenbau ausgehen. Für den Einsatz der Platten, Granulate und Faserstoffe kommt vordergründig der heimische Baustoffsektor in Betracht. Das erarbeitete Know-how könnte aber auch für Entwicklungsländer von Interesse sein, so dass sich eventuell auch Exportchancen für den Maschinenbau eröffnen.

Das Ziel der Forschungsarbeiten, energiesparende Verfahren zur Veredlung der genannten Rohstoffe zu konzipieren und Produktqualitäten in Abhängigkeit von der Stoffrezeptur und von den verfahrenstechnischen Parametern der Herstellung zu erkunden, ist erreicht worden. Damit wurde eine Informationsbasis für die Entwicklung von marktfähigen Produkten geschaffen. Die konkrete Produktkonfektionierung für den Markt ist gemeinsam mit Praxisfachleuten durchzuführen. Die experimentellen Untersuchungen, die im Rahmen des Forschungsprojektes zunächst im Labormaßstab und Technikumsmaßstab durchgeführt worden sind, liefern grundsätzliche Informationen über die anzuwendenden Verfahrensbedingungen zur Herstellung der Produkte. Die Technologiestufen können nun in Zusammenarbeit mit Praxispartnern so weit unter Technikumsbedingungen weiter erprobt werden, dass danach kontinuierliche Pilotanlagen konzipiert werden können.

Unabhängig von der praktischen Nutzung wird der Transfer der wissenschaftlichen Erkenntnisse durch Vorträge bei Interessenten, Vorlesungen und Seminare, Fachtagungen, Publikationen in Fachzeitschriften sowie durch Präsentation von Produktmustern gewährleistet.

9. Zusammenfassung

Aus der Basis experimenteller Untersuchungen im Labor- und Technikumsmaßstab wurden Verfahren zur Veredlung von Holznebenprodukten und Kraftwerksasche entwickelt. Neben diesen schwerpunktmäßig verwendeten Rohstoffen wurden Rohbraunkohle, REA-Gips, Löschkalk und Braunkohlenxylyl in die Veredlungskonzepte einbezogen. Aus den Rohstoffen wurden hochverdichtete Pressformkörper und niedrigverdichtete Pressformkörper in Form von Platten, kugelförmige Granulate im Korngrößenbereich von 0,2 - 6 mm sowie Faserstoffe hergestellt, für die es ein Nutzungspotential im Baustoffsektor gibt. Neben der Ermittlung

optimaler Verfahrensparameter für die Herstellung wurden umfangreiche Untersuchungen zur Charakterisierung bauphysikalischer Eigenschaften der Produkte durchgeführt. Herausragende Qualitätsmerkmale sind zum Beispiel sehr hohe Druck- und Biegefestigkeit (hochverdichtete Pressformkörper), hohe Festigkeit und gute Dämmeigenschaften (niedrigverdichtete Pressformkörper), hohe Druckfestigkeit, gute Dämmeigenschaften und hohes Wärmespeichervermögen (Granulate), hohe Dämmwirkung und Resistenz gegen mikrobiellen Abbau (Faserstoffe). Um Einsatzchancen abzuschätzen, wurde eine Schätzung der Herstellungskosten vorgenommen. Sie zeigt, dass insbesondere für die niedrigverdichteten Pressformkörper, die Granulate und die Faserstoffe ein hohes Potential für eine praktische Nutzung besteht. Das Ziel des Forschungsprojektes, energiesparende Verfahren zu entwickeln, wurde erreicht. Die niedrigen Herstellungskosten für die zuletzt genannten Produkte und die geringen Anteile an den Gesamtkosten verursacht durch Rohstoffeinsatz und Stromverbrauch weisen die neuen Verfahren als energiesparend aus. Ein weiterer Vorteil dieser Verfahren besteht darin, dass keine Stoffwandlungsverluste und Schadstoffemissionen auftreten. Mit ihrer Überführung in die Praxis könnte somit ein Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung geleistet werden.