



Bundesministerium
für Verkehr,
Innovation und Technologie

NACHHALTIGwirtschaften
k o n k r e t

Grundlegende Untersuchungen zu aufgespritzten Zellulosedämmschichten für Außenfassaden

Grundlagenstudie

Endbericht

Auftragnehmer:
Joanneum Research

Autoren:
DI Michael Mandl, Dr. Arnold Stuhlbacher, Michael Koinigg
Joanneum Research

ao.Univ. Prof. DDr. DI Peter Kautsch, DI Herwig Hengsberger
Institut für Hochbau, TU Graz

Graz, Mai 2001

Ein Projektbericht im  **HAUS**
der Zukunft

Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines beauftragten Projekts aus der ersten Ausschreibung der Programmlinie *Haus der Zukunft* im Rahmen des Impulsprogramms *Nachhaltig Wirtschaften*, welches 1999 als mehrjähriges Forschungs- und Technologieprogramm vom Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie gestartet wurde.

Die Programmlinie *Haus der Zukunft* intendiert, konkrete Wege für innovatives Bauen zu entwickeln und einzuleiten. Aufbauend auf der solaren Niedrigenergiebauweise und dem Passivhaus-Konzept soll eine bessere Energieeffizienz, ein verstärkter Einsatz erneuerbarer Energieträger, nachwachsender und ökologischer Rohstoffe, sowie eine stärkere Berücksichtigung von Nutzungsaspekten bei vergleichbaren Kosten zu konventionellen Bauweisen erreicht werden. Damit werden für die Planung und Realisierung von Wohn- und Bürogebäuden richtungsweisende Schritte hinsichtlich ökoeffizientem Bauen und einer nachhaltigen Wirtschaftsweise in Österreich demonstriert.

Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt dank des überdurchschnittlichen Engagements und der übergreifenden Kooperationen der Auftragnehmer, des aktiven Einsatzes des begleitenden Schirmmanagements durch die Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik und der guten Kooperation mit dem Forschungsförderungsfonds der gewerblichen Wirtschaft bei der Projektabwicklung über unseren Erwartungen und führt bereits jetzt zu konkreten Umsetzungsstrategien von modellhaften Pilotprojekten.

Das Impulsprogramm *Nachhaltig Wirtschaften* verfolgt nicht nur den Anspruch, besonders innovative und richtungsweisende Projekte zu initiieren und zu finanzieren, sondern auch die Ergebnisse offensiv zu verbreiten. Daher werden sie auch in der Schriftenreihe "Nachhaltig Wirtschaften konkret" publiziert, aber auch elektronisch über das Internet unter der Webadresse www.hausderzukunft.at dem Interessierten öffentlich zugänglich gemacht.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Kurzfassung	7
1. Einleitung	9
1.1. Das Forschungsprojekt	9
1.2. Forschungsansatz	11
1.2.1. Der tragfähige Dämmkörper	11
1.2.2. Der verankerte Dämmkörper	11
2. Grundlagen	15
2.1. Einleitung	15
2.2. Wärmedämmung	15
2.3. Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS)	17
2.4. Wärmedämm-Putzsysteme	18
2.5. Papier	20
2.5.1. Entwicklung	20
2.5.2. Papierherstellung	21
2.5.3. Produktionsvolumen in Österreich	22
2.5.4. Altpapier-Recycling	23
3. Papier als Dämmstoff	27
3.1. Dämmen mit Altpapier heute	27
3.2. Papierdämmung im Bauteil	28
3.3. Verarbeitungstechnik	29
3.3.1. Einblasverfahren	30
3.3.2. Compact Spray On (CSO)-Verfahren	31
3.4. Firmenunterlagen	32
3.5. Die Fasern im Vergleich	32
3.5.1. Fasern der Cellulose Produktion Hartberg (CPH)	33
3.5.2. Fasern der International Cellulose Corporation (ICC)	33
3.5.3. ThermoCon-Fasern	34
3.6. Patentsituation	34
3.7. Bindemittel	34
3.7.1. Schaum	34
3.7.2. Pulver	35
3.7.3. Flüssigkeit	35
3.8. Mischvorrichtungen	35
3.8.1. Sprühkopf mit außenliegenden Sprühdüsen	35
3.8.2. Sprühkopf mit innenliegender Sprühdüse	36
3.8.3. Mischkammer	36
3.9. Beurteilung des Zellulose-Sprühverfahrens	36
3.10. WDVS mit Zellulosefasern als Dämmstoff	37

4.	Simulationsberechnung	39
4.1.	Einleitung	39
4.2.	Programmbeschreibung	39
4.3.	Interpretation	43
5.	Bindemittel (Dr. Arnold Stuhlbacher, Michael Koinigg)	45
5.1.	Einleitung	45
5.2.	Bindemittel biogenen Ursprungs	45
5.2.1.	Guar-Gum	45
5.2.2.	Stärke	48
5.2.3.	Modifizierte Stärke	50
5.2.4.	Casein	51
5.2.5.	Casein-Kunststoffe	52
5.2.6.	Polyhydroxyalkanoate PHA	52
5.3.	Bindemittel auf petrochemischer Basis (thermoplastische Polymere)	54
5.3.1.	Polyethylen PE	54
5.3.2.	Polypropylene PP	57
5.4.	Bindemittel auf petrochemischer Basis (lösliche Polymere)	59
5.4.1.	Polyvinylalkohol PVAL	59
5.4.2.	Carboxymethylcellulose CMC	60
5.5.	Bindemittel auf mineralischer Basis	61
5.5.1.	Wasserglas	61
5.5.2.	Zement	62
5.5.3.	Magnesiumoxid (Kauster)	64
5.6.	Zusammenfassung	65
6.	Aufspritzversuche	67
6.1.	Einleitung	67
6.2.	Versuchsaufbau	67
6.3.	Verwendete Maschinen und Geräte	68
6.3.1.	Einblasmaschinen	68
6.3.2.	Sprühköpfe	69
6.4.	Beurteilung der ersten Versuchsergebnisse	70
6.4.1.	Durchmischung der Flocken mit dem flüssigen Medium	70
6.4.2.	Beurteilung der Feuchte beim Aufspritzversuch	70
6.5.	Probleme beim Aufspritzverfahren	71
6.5.1.	Austrocknungszeit	71
6.5.2.	Reduktion des Over-Sprays	71
6.5.3.	Mischungsproblematik am Sprühkopf	71
6.5.4.	Förderungstechnik	71
6.5.5.	Kleber- bzw. Bindemittelmischungen	72

6.6.	Lösungsansätze	72
6.6.1.	Verbesserung der Aufspritstechnik	72
6.6.2.	Verbesserungsansätze im Bereich Over-Spray	72
6.6.3.	Neue Düsen	73
6.6.4.	Ausrüstung der Zelluloseflocken mit pulverförmigem Bindemittel	74
6.6.5.	Verbesserungen der Kontinuität des Förderstroms	75
6.7.	Klebewirkung verschiedener Bindemittel	76
6.7.1.	Mineralische Bindemittel	76
6.7.2.	Organische Bindemittel	77
6.7.3.	Thermoplastische Bindemittel	77
6.8.	Austrocknungsverhalten einer 8 cm dicken Zellulosedämmschicht	77
7.	Probekörper	79
7.1.	Herstellung von Rohlingen für Prüfkörper	79
7.1.1.	Herstellung von Proben mittels Bedampfung im Labor	79
7.1.2.	Herstellung von Proben im Auspritzenverfahren	80
7.1.3.	Trocknung der Rohlinge	82
7.2.	Gewinnung der Prüfkörper aus den Rohlingen	83
8.	Materialprüfung	85
8.1.	Grundlagen	85
8.2.	Versuchsdurchführung	86
8.3.	Ergebnisse	88
8.4.	Zugversuche normal zur Probenebene	90
9.	Anputzversuche	95
9.1.	Herstellung der Putzflächen	95
9.2.	Charakteristik der einzelnen Putzarten	97
9.3.	In-situ Haftzugversuche an den angeputzten Versuchswänden	98
9.3.1.	Ergebnisse der Abzugversuche	100
10.	Ausblick	105
10.1.	Weitere Forschungsstrategie	105
10.2.	Weitere Anwendungsgebiete	105
11.	Zusammenfassung	107
12.	Normen	113
13.	Patente	117
14.	Literatur	119

Anhang

Wärmedämm-Verbundsysteme _____	A 1
1. Ausführung _____	A 1
2. Wirkungsweise _____	A 3
3. Putze auf WDVS _____	A 4
4. Putzarten _____	A 5
5. Thermische Beanspruchungen _____	A 8
Faserlängenverteilungen _____	A 12
Daten zu den Klimaparametern _____	A 13
Klimadatensatz „IBP 1991.wet“ _____	A 14
Materialkennwerte Außenputz _____	A 16
Materialkennwerte Zellulose _____	A 17
Materialkennwerte Ziegel _____	A 18
Materialkennwerte Beton _____	A 19
Materialkennwerte Innenputz _____	A 20
Temperatur- u. Feuchteverläufe, Wärmeströme - Variante 1 _____	A 21
Feuchtigkeitsbilanz der Varianten 1 - 5 _____	A 23
Festigkeitsprüfungen _____	A 26

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Bindemittelverstärkter Dämmkörper _____	11
Abb. 2	Dämmschichte mit Tragkonstruktion für den Putz _____	11
Abb. 3	Thomas Jefferson, Monticello, Louisiana; Ansicht _____	16
Abb. 4	Gesamt Dämmstoffmarkt in Deutschland nach Produkten _____	16
Abb. 5	Aufteilung der „sonstigen“ Dämmstoffe aus Abb. 4 _____	16
Abb. 6	Die erste Papiermaschine, 1799 _____	20
Abb. 7	Papiermaschine im sappi-Werk Gratkorn _____	20
Abb. 8	Papiererzeugung _____	21
Abb. 9	Zeitreihen zum Deutschen Altpapiermarkt _____	24
Abb. 10	Winddichtung aus Zeitungspapier und Wärmedämmung aus Sägespänen oder Torf, Finnland 1949 _____	27
Abb. 11	Anlieferung und Grobzerkleinerung des Zeitungspapiers im sog. Shredder _____	29
Abb. 12	Anlage zur Herstellung von Zellulosedämmung _____	29
Abb. 13	Einblasen einer Dachschräge vom Spitzboden aus _____	30
Abb. 14	Abziehen der aufgespritzten Dämmschicht _____	31
Abb. 15	CSO-gesprühtes „Fachwerk“ _____	31
Abb. 16	Fasern der Firma International Cellulose Corporation (ICC), USA _____	33
Abb. 17	CPH-Fasern _____	33
Abb. 18	6er Düse der Firma Spraying Systems _____	35
Abb. 19	4er Düse „Terminator“ der Firma Isofloc und 2er Düse _____	35
Abb. 20	Expansionsfaktoren am Beispiel der Variante 1 _____	41
Abb. 21	Versuchsaufbau der Aufspritzversuche _____	67
Abb. 22	X-Floc Zellofant, Zellradschleuse _____	68
Abb. 23	Einblasmaschine Krendl 500 _____	68

Abb. 24	Einblasmachine ohne Zellradschleuse	68
Abb. 25	Modifizierte CSO-Düse	69
Abb. 26	Schaumdüse	69
Abb. 27	Schaumdüse, Schnitt	69
Abb. 28	Herkömmliche CSO-Wand	70
Abb. 29	2strahlige Zerstäuberdüse	70
Abb. 30	Spritzbetondüse, Standard	73
Abb. 31	Zerlegte Spritzbetondüse	73
Abb. 32	Spritzbetondüse - Eigenentwicklung	73
Abb. 33	Düsenringe der Düse aus Abb. 32	73
Abb. 34	Innenansicht der Düse aus Abb. 32	73
Abb. 35	Pulverzudosierer	74
Abb. 36	100 l Versuchsreaktor	74
Abb. 37	Drehbare Düse des Glasreaktors	75
Abb. 38	Automatischer Nachmischer Putzmeister „Dynamat“	76
Abb. 39	Trocknungsverhalten einer auf eine Ziegelwand aufgespritzten Zellulosedämmschicht von 8 cm Dicke	78
Abb. 40	Autoklav zur Probenherstellung	79
Abb. 41	Zelluloseprobekörper nach der Bedampfung	79
Abb. 42	Herstellung plattenförmiger Prüfkörper	79
Abb. 43	Mittelwerte von Wassergehalt und Dichte der einzelnen Probekörperserien	81
Abb. 44	Aufgespritzte Zelluloserohlinge für die Gewinnung von Probekörpern in der Umlufttrockenkammer	82
Abb. 45	Trocknungsverlauf für die Rohlinge der Proben XI - XVIII	83
Abb. 46	Zug-/Druckprüfmaschine	86
Abb. 47	Bestimmung der Druckspannung	87
Abb. 48	Bestimmung der Zugfestigkeit normal zur Probenebene	87
Abb. 49	Bestimmung der Zugfestigkeit in Probenebene	88
Abb. 50	Bestimmung der Scherfestigkeit	88
Abb. 51	Prüfkörper 8 x 8 und 15 x 15 cm	90
Abb. 52	Kraft-Dehnungs-Verhalten der Prüfkörper von Probe 0	91
Abb. 53	Eingebauter Zelluloseprüfkörper vor dem Lastspiel	91
Abb. 54	Eingebauter Zelluloseprüfkörper nach dem Lastspiel	91
Abb. 55	Zugfestigkeiten normal zur Probenebene der einzelnen Prüfkörperserien	92
Abb. 56	Dichten und Zugfestigkeiten der Proben	92
Abb. 57	Streuung der Zugfestigkeitswerte normal zur Probenebene	93
Abb. 58	Mittelwerte der Zugfestigkeiten normal zur Probenebene im Vergleich zur Dichte	93
Abb. 59	Materialkennwerte der verwendeten Putze	96
Abb. 60	Bindemittelmischungen der jeweiligen Putzgründe	96
Abb. 61	Anrühren des Putzes	97
Abb. 62	Anwurf von ThermoExtra	97
Abb. 63	Abziehen der Putzschicht - ThermoExtra	97
Abb. 64	„Vorstreichen“ einer dünnen Putzschicht	98
Abb. 65	Anwurf FaserLeichtPutz	98
Abb. 66	Fertiggestellte Putzversuche	98
Abb. 67	Abzugsgerät für die in-situ-Versuche	99
Abb. 68	Ansetzen des Prüfgerätes	99
Abb. 69	Herausgetrennter Prüfkörper	99
Abb. 70	Ergebnisse der Abzugversuche	102
Abb. 71	Aufgespritzte Akustikbeschichtung	106

Kurzfassung

Ziel des Forschungsprojektes war die Ermittlung werkstofftechnischer und bauphysikalischer Kennwerte von aufgespritzten Zellulosedämmschichten aus Altpapier mit Putzaufgabe für die Außenfassade sowie die Beurteilung des praktischen Anwendungspotenzials dieses Verfahrens. Die Lasten der Putzschicht sowie die Kräfte aus den Fassadenbeanspruchungen sollen dabei schubfest über eine tragfähige Dämmschicht abgeleitet werden. Ein aufgespritzter, tragfähiger Dämmkörper stellt im Vergleich zu Wärmedämm-Verbundsystemen auf Plattenbasis eine wirkliche Innovation dar.

In der Grundlagenrecherche wurde eine breite Informationsbasis über die Zellulosedämmung und die dazugehörigen Verfahren erarbeitet. Die meisten Entwicklungen sind durch ausländische Patente geschützt. International werden im Bereich der bindemittelverstärkten aufgespritzten Zellulosedämmschichten zur Zeit Forschungsprojekte unter anderem in den USA und in Finnland durchgeführt - was die Aktualität dieses Forschungsansatzes zusätzlich unterstreicht.

Die Ergebnisse der durchgeführten Aufspritzversuche zeigen deutlich, dass die bisher in der Praxis verwendeten Sprühmethoden nur sehr bedingt zur Herstellung von homogenen Dämmschichten geeignet sind. Vor allem gelingt es bis dato nicht, Kleber- bzw. Bindemittelmischungen im Zuge des Aufspritzens gleichmäßig in die Zelluloseflocken einzumischen.

Allerdings konnten die mechanischen Eigenschaften der aufgespritzten Dämmschichten durch Bindemittel - die ökologisch vertretbar sind - erheblich verbessert werden. An labormäßig hergestellten Dämmkörpern wurden umfangreiche Mess-Serien hinsichtlich der mechanischen Parameter durchgeführt. Diese haben zwar einerseits die Inhomogenität der Dämmkörper bestätigt, andererseits aber bei einigen Bindemittelmischungen hervorragende Werte insbesondere hinsichtlich Druckfestigkeit und Zugfestigkeit normal zur Probenebene erbracht.

Demnach würden Platten aus bindemittelverstärktem Zellulosedämmstoff bereits jetzt die mechanischen Anforderungen an Mineralwolle-Dämmplatten für Außenwandwärmedämm-Verbundsysteme erfüllen. Hinsichtlich der hygrischen Eigenschaften insbesondere des Verbundsystems Dämmung - Putz besteht weiterer Forschungsbedarf. Zudem soll durch Adaption vorhandener Förder- und Spritztechnologien versucht werden, die Aufspritztechnik so weit zu verbessern, dass möglichst homogene Dämmschichten erzeugt werden können.

1. Einleitung

1.1. Das Forschungsprojekt

Motivation

Im Zuge der weltweiten Bestrebungen zur Energieeinsparung kommt insbesondere der thermischen Sanierung des Baubestandes aus den 40er bis 80er Jahren des 20. Jahrhunderts besondere Bedeutung zu. Man schätzt allein für Österreich 130 Millionen Quadratmeter zu sanierende Wohnnutzfläche [1].

Um das Ziel von Kyoto - 13 % CO₂-Reduktion - in Österreich zu erreichen, müssen 13,32 % des gesamten untersuchten Gebäudebestandes in den nächsten neun Jahren wärmetechnisch saniert werden. Dafür wäre ein Brutto Gesamtinvestitionsbedarf von ATS 54,5 Mrd. (Standardvariante) erforderlich, was jährliche Kosten von Brutto ATS 6,1 Mrd. verursachen würde. Um das Klimaschutzbündnis-Ziel - 50 % CO₂-Reduktion zu erreichen - müssen 69,03 % des gesamten untersuchten Gebäudebestandes innerhalb der nächsten elf Jahre wärmetechnisch saniert werden. Für diese Maßnahmen wird ein Brutto Gesamtinvestitionsvolumen von ATS 282,4 Mrd. (Standardvariante) geschätzt, was einem jährlichen Kostenbeitrag von Brutto ATS 25,7 Mrd. entspricht.

Bezogen auf die Investitionskosten kann durch das thermische Sanieren von Gebäuden mit einem niedrigen thermischen Standard der CO₂-Ausstoß am effizientesten reduziert werden. Dabei ist erkennbar, dass besonders bei den Gebäuden mit ein bis zwei Wohnungen und den Gebäuden aus der Bauperiode von 1945 - 60 große Einspareffekte erzielt werden können. Daher erscheint es sinnvoll, verstärkt die Sanierung dieser Gebäude zu betreiben [1].

Zellulosedämmstoffe können in diesem Zusammenhang einen wertvollen Beitrag leisten, da sie einerseits ein Recyclingprodukt sind und andererseits auf Basis der nachwachsenden

Ressource Holz produziert werden. Als quasi CO₂-neutralem Dämmstoff kann der Zellulosedämmung auch eine besondere Umweltrelevanz zugeschrieben werden.

Ziele

Durch das beschriebene Forschungsprojekt soll für die Zellulosedämmung ein weiteres Anwendungsgebiet in Form von aufgespritzten Zellulosedämmschichten an Außenfassaden erschlossen werden. Da der ökologischen Qualität der verwendeten Baustoffe in Zukunft verstärktes Augenmerk zu schenken sein wird, ist es Ziel dieses Forschungsprojektes, außenliegende, aufgespritzte Zellulosedämmschichten aus Altpapier hinsichtlich ihrer mechanischen und bauphysikalischen Eignung für die Applikation von Fassadenputzen zu untersuchen. Dies deshalb, weil die verputzte Fassade in Mitteleuropa nach wie vor der am weitesten verbreitete Fassadentyp ist. Ein aufgespritztes Wärmedämm-Verbundsystem könnte auch aufgrund der fugenlosen und schnellen Aufbringung konkurrenzfähig zu bestehenden Platten-Systemen sein. Neben den Grundlagen sollten konkrete mechanische und bauphysikalische Werkstoffparameter für bindemittelverstärkte, aufgespritzte Zellulosedämmschichten ermittelt werden. Das Aufspritzverfahren wurde auch hinsichtlich seiner grundsätzlichen bautechnischen Eignung zur Herstellung von Dämmschichten und hinsichtlich des praktischen Anwendungspotenzials beurteilt. Abschließend wurde die weitere Forschungsstrategie dargelegt.

Methodik

Die Erhebung der Grundlagen für die Bereiche Zellulosedämmstoffe und Bindemittel erfolgte durch eine themenorientierte, wissenschaftliche Fach- und Patentrecherche. Ergänzt wurde diese Wissensbasis durch Informationen aus diversen Detailgesprächen und Interviews mit Know-How-Trägern. In den

Aufspritzversuchen wurden die in der Praxis verwendeten Gerätschaften und Techniken angewandt bzw. darauf aufbauende Verbesserungen durchgeführt. Die einzelnen Materialversuche richteten sich nach den speziellen Anforderungen gemäß geltenden Normen oder Richtlinien. Da für aufgespritzte Zellulosedämmstoffe keine Produkt- bzw. Prüfnormen existieren, wurden die Labortests in Anlehnung an Prüfnormen für „verwandte“ Dämmstoffe (zB Mineralfaser) durchgeführt.

Projektteam

Das Forschungsprojekt wurde von Dipl.-Ing. Michael Mandl (Regionale Innovations- und Forschungsstelle Hartberg, Joanneum Research) geleitet. Ao.Univ.-Prof. DDr. Peter Kautsch und Dipl.-Ing. Herwig Hengsberger (Institut für Hochbau für Architekten, TU Graz) waren federführend in den Bereichen Grundlagenrecherche, Materialprüfung und Simulationsberechnung tätig. Die Leistungen zum Themenkomplex Bindemittel wurden von Dr. Arnold Stuhlbacher und Michael Koinigg (Institut für Umweltgeologie und Ökosystemforschung, Joanneum Research) erbracht. Das Forscherteam wurde durch den Partner aus der Wirtschaft, der Firma CPH Cellulose Produktion Hartberg, unterstützt und ergänzt.

1.2. Forschungsansatz

Es wurden zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze verfolgt, wobei die Variante 1.2.1. zufolge des größeren Innovationsgehaltes und nicht zuletzt aus wirtschaftlichen Überlegungen bevorzugt wurde.

1.2.1. Der tragfähige Dämmkörper

Bei dieser Variante wird davon ausgegangen, dass es gelingt, ökologisch verträgliche Bindemittel zu entwickeln, die in der Lage sind, die Zellulose-Flocken zu einer ausreichend tragfähigen homogenen Dämmschicht von zumindest 8 cm Dicke zu verbinden und das Eigengewicht der Putzschicht sowie die Wind- und mechanischen bzw. thermischen Lasten der Fassade aufzunehmen.

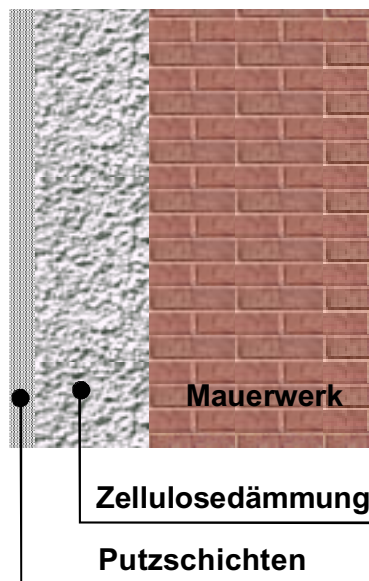


Abb. 1 Bindemittelverstärkter Dämmkörper

1.2.2. Der verankerte Dämmkörper

Als Vorstufe bzw. Alternative zur Variante 1.2.1. wird versucht, bestehende Dübelsysteme [2] dahingehend zu adaptieren, dass ein Netz- oder Drahtgeflecht über gedübelte Abstandhalter am Mauerwerk befestigt wird und einerseits das Eigengewicht der Zellulose- bzw. Putzschicht und andererseits die Fassadenlasten aufnimmt und über die Abstandhalter/Dübel auf das Mauerwerk überträgt.

Ein Tragschienensystem wäre eine weitere Möglichkeit, die Putz- und Fassadenlasten aufzunehmen und an die Unterkonstruktion weiterzuleiten und könnte zudem als Abziehlehre für die Zellosoeschicht dienen.

Die Forschungen sollten auf die Umsetzung der Variante „tragfähiger Dämmkörper“ abzielen.

De facto wäre ein weiteres Wärmedämm-Verbandsystem auf Basis lastabtragender Verankerungssysteme keine wirkliche Innovation, sondern es würde unmittelbar mit anderen Platten-Dämmsystemen wie zB auf Basis von Kork,

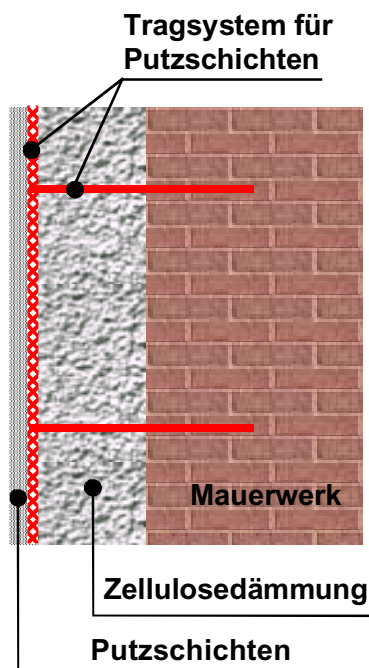


Abb. 2 Dämmschichte mit Tragkonstruktion für den Putz

Weichfaserplatten, EPS oder Mineralwolle konkurrenzieren.

Die Idee, eine Zellulose-Dämmstoffschicht kraftschlüssig auf fertige Wandkonstruktionen aufzuspritzen, besticht vor allem durch folgende Vorteile:

- ökologischer Recycling-Werkstoff
- fugenloser Dämmkörper
- stufenlos in variablen Dicken realisierbar
- schneller, flächige Auftrag möglich
- Aufspritzen eventuell auch ohne Gerüst mittels mobiler Hebebühnen oder -kräne
- weniger Arbeitsgänge (kein Verdübeln der Platten, kein Verkitten der Fugen)

Ist ein tragfähiger Zellulosedämmkörper mit Deckputz realisierbar, so können die genannten Vorteile auch zur einer Zeit- und Kostenersparnis in der Bauanwendung führen, welche die Gesamtwirtschaftlichkeit dieses energie- und ressourcenschonenden Wärmedämm-Verbundsystems positiv beeinflussen könnte.

Das beschriebene Forschungsprojekt wurde vor allem an dem visionärem Leitbild des tragfähigen Dämmkörpers ausgerichtet. Die durchgeführten Versuche und Materialprüfungen sind Schritte in Richtung Realisierung aufspritzbarer Zellulosedämmschichten mit Putzaufgabe.

Der Forschungsbericht im Überblick

Der Forschungsbericht gliedert sich in folgende Themenbereiche:

1. Einleitung
2. Grundlagenrecherche
In diesem Kapitel werden Informationen zur Produktion von Papier und zum Papierrecycling zusammengefaßt und die Geschichte der Wärmedämmung, insbesondere Zellulosefasern beschrieben. Die

verschiedenen Techniken und Gerätschaften im Zusammenhang mit aufgespritzten Zellulosedämmschichten werden im Detail zusammengefaßt.

3. Papier als Dämmstoff
Es wird die Geschichte der Verwendung von Zeitungspapier zu Dämmzwecken sowie die Herstellung des Zellulosedämmstoffes und die Techniken der Verarbeitung beschrieben.
4. Simulationsberechnung
Dieses Kapitel beschreibt die verschiedenen Varianten der Simulationsberechnung. Sowohl die Eingangsparameter als auch die Ergebnisse werden hinsichtlich ihrer Aussagekraft interpretiert.
5. Bindemittel
Dieser Teil des Berichtes beschreibt jene Bindemittel, welche für die Herstellung von Zellulosedämmstoffen geeignet scheinen. Am Ende des Kapitels befindet sich eine zusammenfassende Tabelle, in welcher die Bindemittel hinsichtlich einiger Parameter klassifiziert werden.
6. Aufspritzversuche
In diesem Teil des Berichtes werden die in der Praxis verwendeten Gerätschaften und Techniken dargestellt. Die durchgeführten Aufspritzversuche und die in diesem Zusammenhang gemachten Erfahrungen sind dokumentiert. Diverse Experimente zur Verbesserung der Aufspritztechnik werden beschrieben. Die Erfahrungen mit diversen Bindemittel sind zusammengefaßt. Das Austrocknungsverhalten einer 8 cm dicken aufgespritzten Zellulosedämmschicht ist ebenfalls dargestellt.
7. Probekörper
Dieser Abschnitt beschreibt im Detail das Herstellungsverfahren der Rohlinge für die Gewinnung von Prüfkörper für diverse Laboruntersuchungen.

8. Materialprüfung

Dieses Kapitel widmet sich den durchgeführten mechanischen und bauphysikalischen Laboruntersuchungen. Neben den geltenden Normen und Richtlinien werden die durchgeführten Materialuntersuchungen beschrieben. Die Ergebnisse sind in Tabellen und Abbildungen zusammengefaßt und werden abschließend interpretiert.

9. Anputzversuche

Die grundlegenden Anputzversuche und die verwendeten Putze werden beschrieben. Die durchgeführten Abzugsversuche zur Prüfung der Verbundwirkung zwischen Wand - Dämmstoff - Putz sind dargestellt. Eine Tabelle mit den Ergebnissen dieser Materialprüfung runden dieses Kapitel ab.

10. Ausblick

Dieses Kapitel bringt den weiteren Forschungsbedarf auf den Punkt und beschreibt weitere Anwendungsgebiete aufgespritzter Zellulosedämmstoffe.

11. Zusammenfassung

Die Zusammenfassung spannt einen Bogen über alle Aktivitäten des Forschungsprojektes und stellt die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse zusammenfassend dar.

2. Grundlagen

2.1. Einleitung

Ziel des Arbeitspakets 1 war eine Bestandsaufnahme hinsichtlich der Verwendung von Zellulosefasern aus Altpapier als Wärmedämm-Material im Allgemeinen und bezüglich des Feuchtsprüh-Verfahrens im Besonderen.

Da diese Art der Wärmedämmung ursprünglich insbesondere im anglikanischen und skandinavischen Raum verbreitet war, wurde zusätzlich zu Österreich, der Schweiz und Deutschland vor Ort in Albuquerque/USA und in Helsinki/Finnland recherchiert.

Dabei wurde festgestellt, dass es, abgesehen von einigen universitären Studien zB über den Feuchttransport in mehrschichtigen Bauteilen [3], einigen Berichten des Instituts für Baubiologie [4] sowie einer großen Anzahl von Patentschriften - die zwar den Stand der Technik recht gut beschreiben aber über die Praxistauglichkeit der jeweiligen Entwicklungen relativ wenig aussagen - kaum Literatur gibt, die sich mit - insbesondere aufgespritzter - Zellulose-Dämmung beschäftigt.

In Albuquerque, New Mexiko/USA konnte überraschenderweise festgestellt werden, dass ein ziemlich ähnlich gelagertes Forschungsprojekt im Gange ist, während in Finnland offensichtlich ebenfalls an diesem Ziel gearbeitet wird. Allerdings mit dem Unterschied, dass dort nicht die verputzte Fassade das Ziel ist, sondern „nur“ ein feucht zu sprühender, schnell trocknender, homogener Dämmkörper. Da es sich bei diesen Forschungsvorhaben um interne Firmenforschungen handelt, ist es naturgemäß wegen der Sicherung der Verwertungsrechte sehr schwierig, Einzelheiten zu erfahren. Dennoch gibt es zumindest von Seite einiger finnischer Forscher Interesse an Kooperationen mit ausländischen Partnern. Eine derartige Zusammenarbeit besteht zB mit der TU Graz in einem Hanf-Forschungsprojekt (EU Craft-Projekt). Da das

Praxiswissen im Zellulosedämm-Bereich fast ausschließlich auf relativ wenige Einzelpersonen – meist ausgeprägte Individualisten - beschränkt ist, wurde eine Vielzahl an Einzelgespräche geführt. Dabei konnten einerseits wertvolle Erkenntnisse aus der Praxis gesammelt werden, andererseits war es aber aufgrund des Wettbewerbes nicht immer möglich, offene Gespräche zu führen. Dadurch blieben einige Möglichkeiten zur Zusammenarbeit ungenutzt.

Schließlich wurden erste feuchtdynamische Simulationsberechnungen durchgeführt, um grobe Abschätzungen hinsichtlich des Feuchteverhaltens des Zellulose-Wärmedämm-Verbundsystems treffen zu können. Da sich die hygrischen Eigenschaften des Verbundsystemes infolge noch nicht bekannter Materialkennwerte der Bindemittelmischungen bzw. Deckputze ändern können, wurde beschlossen, genauere Berechnungen erst nach Ermittlung der baustoffspezifischen Kennwerte durchzuführen.

2.2. Wärmedämmung

Die ersten Materialien, mit denen sich der Mensch vor Umwelteinflüssen zu schützen versuchte, waren neben Tierhäuten und Fellen pflanzliche Fasern. Dabei spielte naturgemäß die örtliche Verfügbarkeit eine entscheidende Rolle und so bildeten sich regional stark unterschiedliche „Dämmkulturen“ heraus.

Thomas Jefferson (1743 – 1826), 3. Präsident der Vereinigten Staaten von Amerika (1801 – 1809), Anwalt, reicher Pflanze, Verfasser der Unabhängigkeitserklärung von 1776 und begabter Amateur auf dem Gebiet der Musik, Architektur und verschiedener Wissenschaften war der erste Planer in Amerika, der - für den Entwurf seines eigenen Landsitzes Monticello – Wärmedämmung verwendete und er verwendete Zellulose-

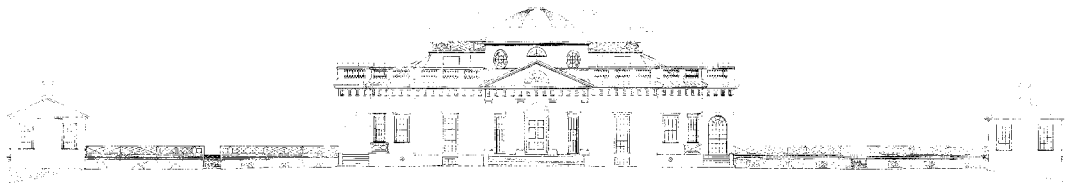


Abb. 3 Thomas Jefferson, Monticello, Louisiana; Ansicht

Dämmung. Allerdings nicht in Form von Zeitungspapier, sondern von „corn cops“ – Maiskolben.

Jefferson entwickelte bereits um 1800 eine Maschine zur Gewinnung von Hanffasern. In der Folge wurde in den USA eine Vielzahl pflanzlicher Fasern industriell aufbereitet und zu Dämmzwecken benutzt. Je nach örtlichen Gegebenheiten verwendete man Sägespäne in Papiersäcken, Balsa-Wolle, Stroh etc. Im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts wurde gleichsam als logische Folge des Aufkommens des modernen Zeitungswesens ein Dämmstoff aus zerfasertem Zeitungspapier entwickelt [5].

In den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts kam die aus Hochofenschlacke gewonnene Steinwolle als Abfallprodukt der Stahlindustrie auf den Markt, gefolgt von der aus Gesteinsmehl geschmolzenen sogenannten Glaswolle.

Parallel dazu dämmte man sowohl in den USA als auch in anderen Teilen der Welt bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts zumindest untergeordnete Bauwerke noch mit Rinder- oder Pferdemit.

Der erste Ansatz für Dämm-Maßnahmen war meist die oberste Geschossdecke – zum einen wegen der leichteren Aufbringung des Dämm-Materials zum anderen wegen des hohen Anteils am Gesamtwärmeverlust eines Gebäudes von ca. 30 %.

In Österreich beträgt des jährlich eingebaute Dämmvolumen zur Zeit rund 3,5 Mio. m³, wobei rund 55 % auf Mineralfaserdämmstoffe, ca. 39 % auf Polystyrol-Hartschaum und 5 % auf sonstige Dämmstoffe entfallen [6]. Der Anteil der Zellulosedämmstoffe liegt gemäß Herstellerangaben bei rund 1 - 2 %.

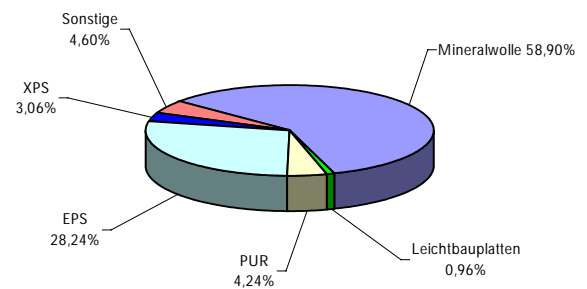


Abb. 4 Gesamt Dämmstoffmarkt in Deutschland nach Produkten (lt. Info der Gemeinschaft Dämmstoff Industrie für Österreich ähnlich)

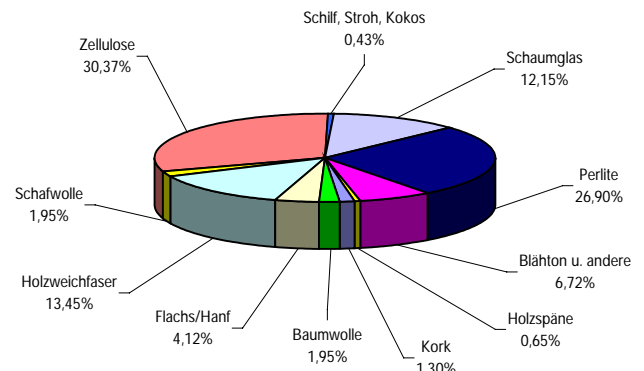


Abb. 5 Aufteilung der „sonstigen“ Dämmstoffe aus Abb. 4

2.3. Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS)

Am 7. Oktober 1959 erfolgte durch Edwin Horbach eine Patentanmeldung für eine „Verkleidung von Außenwänden durch aufgeklebte Schaumstoffplatten und eine die Platten bedeckende Außenschicht, dadurch gekennzeichnet, dass die Schaumstoffplatten mit einer durchgehenden, aus einem Klebemittel und einem Glasfasergespinnst oder -gewebe bestehenden porenfreien Zwischenschicht versehen sind, auf die eine witterungsbeständige Putzschicht aufgetragen ist“.

Ein Patent wurde damals nicht erteilt, weshalb dem von Horbach mit dem Namen „Dryvit“ benannten System bald andere auf dem Markt folgten [7]. 1963 wurde das EPS-WDVS in der Schweiz, 1965 in Österreich übernommen.

Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) bestehen aus wärmedämmenden Materialien wie Polystyrol-Hartschaumplatten, Mineral-/Steinwolleplatten oder -lamellen, Mineralschaumplatten, Kork- oder Holzwoleleichtbauplatten, die auf den Außenwänden der Bauwerke mit Klebemörtel, ggf. zusätzlich mit Dübeln oder mit Halteleisten befestigt werden, einer Armierungsschicht mit einem in die Armierungsmasse eingebetteten Glasseidengewebe und einer Grundierung mit Schlußbeschichtung. Zusätzlich werden Profile mit Textilglasanbindung wie zB Gewebewinkel, An- und Abschlussprofile, Dehnfugenprofile, etc. verwendet.

Systeme mit Polystyrol-Hartschaumplatten und kunstharzgebundenen Deckputzen gibt es seit Anfang der 60er Jahre. Systeme mit Steinwolleplatten kamen Ende der 70er Jahre auf den Markt. Das Kork-WDVS wurde vor ca. 25 Jahren entwickelt, die ersten Fassaden mit Holzweichfaser-WDVS 1992 hergestellt und jene aus Mineralschaum erst 1997 [8].

Interessant ist die Tatsache, dass die meisten Dämmstoffe für WDVS eine Rohdichte von

100 – 150 kg/m³ aufweisen (Mineralschaum 100, Kork 100 - 130, Glaswolle 90 - 150, Steinwolle rund 150, Holzweichfaser 200 kg/m³), solche aus Polystyrol-Hartschaum hingegen nur 15 – 18 kg/m³.

Im Vergleich dazu beträgt die Rohdichte der im Labor hergestellten Zellulosedämmplatten 80 – 150 kg/m³.

Für die Anwendung auf unebenen oder unzureichend tragfähigen Untergründen werden Wärmedämm-Verbundsysteme eingesetzt, für die Halteleisten und spezielle Fassadendübel entwickelt wurden. Diese sogenannte mechanische Befestigung wird mit horizontal verlaufenden T-Halteleisten erreicht, auf die die Dämmplatten mit Nut und Hinterfräsung aufgesteckt werden. Systeme aus Steinwolleplatten werden mit Aluminiumleisten, Systeme aus Polystyrol-Hartschaumplatten mit Kunststoffleisten befestigt.

Anschließend wird die Dämmung mit einer Beschichtung versehen, die aus einer Armierungsschicht mit Gewebereinlage und einer Schlußbeschichtung besteht. Diese Schlußbeschichtung kann aus einem mineralischen, silikat-, siliconharz- oder kunstharzgebundenen Deckputz bestehen. Ebenso werden Wärmedämm-Verbundsysteme mit keramischen Bekleidungen (Fliesen, Klinkerriemchen und dgl.) versehen. Neben den klassischen WDV-Systemen werden heute auch Renovierungssysteme oder transparente Wärmedämm-Verbundsysteme angeboten.

Laut Information des Fachverbandes Wärmedämm-Verbundsysteme e. V. ist es in der Bundesrepublik Deutschland erforderlich, allein am Bestand der alten Bundesländer noch etwa 1,6 Milliarden m² Fassadenfläche wärmeschutztechnisch zu verbessern, um lediglich den Anforderungen der Wärmeschutzverordnung von 1984 zu entsprechen. In den neuen Bundesländern kommen weitere 130 Mio. m² Fassadenfläche hinzu [9]. Das Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken

e. V. an der TU Berlin nennt sogar ein Potenzial von 165 Mio. m² Fassadenflächen [10].

Die Verwendung von Wärmedämm-Verbundsystemen ist eine Möglichkeit, Energie sowohl im Neu- als auch im Altbaubereich zu sparen. Nach Aussagen des Fachverbandes Wärmedämm-Verbundsysteme e. V. liegen für den Zeitraum von 1975 – 1997 in Gesamt-Deutschland Erfahrungen mit über 410 Mio. m² verlegter Systeme vor, die sich jährlich um ca. 40 Mio. m² erhöhen.

Wärmedämm-Verbundsysteme werden zwar seit ca. 35 Jahren hergestellt, doch ein vermehrter Einsatz erfolgte erst in den 70er Jahren. Außenwände mit Wärmedämm-Verbundsystemen bieten, bei vergleichsweise günstigen Investitionskosten, einen hohen Wärmeschutz, und leisten damit einen Beitrag zur Baukostendämpfung und zum Umweltschutz [11].

Für weitere Information siehe Anhang Wärmedämm-Verbundsysteme.

2.4. Wärmedämm-Putzsysteme

Wärmedämm-Putzsysteme sind in der DIN 18550 Teil 3 geregelt und sind im Allgemeinen Außenputzsysteme. Sie bestehen aus einem leichten, wärmedämmenden Unterputz von 2 - 10 cm Dicke und einem härteren, etwa 1 cm dicken Oberputz. Sie entsprechen deshalb nicht der in der Putznorm DIN 18550-1 (1985), Abschnitt 5.1 verankerten Forderung, die lautet, dass „die Festigkeit des Oberputzes geringer als die Festigkeit des Unterputzes ist oder beide Putzlagen gleich fest sind“ (Putzregel „weich auf hart“).

Interessanterweise erfolgte die Entwicklung von Wärmedämm-Putzsystemen durch einen „Außenseiter“ im Putzgewerbe, der die Putzregel „weich auf hart“ nicht kannte und daher ohne Vorbehalte und Bedenken - von den Fachleuten zunächst belächelt - an die Sache heranging.

Die Idee entstand etwa Mitte der sechziger Jahre in der Firma Gebrüder Rhodius, Burgbrohl, die ua. Styroporverpackungen für spezielle Geräte herstellte und für entstandene Abfälle eine Verwertungsmöglichkeit suchte.

In der Dämmputznorm DIN 18 550-3, die nur für Dämmputze mit expandiertem Polystyrol (EPS) als Zuschlagstoff gilt, sind ua. die zulässigen Bereiche der Druckfestigkeit der beiden Putzlagen festgelegt. Zur Gewährleistung des Regenschutzes muß der dämmende Unterputz wasserhemmend und der Oberputz wasserabweisend sein [7]. Als Wärmedämmputze werden nach DIN 18550, Teil 1, Putze bezeichnet, die einen Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit $\leq 0,20 \text{ W/(mK)}$ aufweisen. Diese Anforderung gilt als erfüllt, wenn die Trockenrohdichte des erhärteten Materials $\geq 600 \text{ kg/m}^3$ beträgt. Derart geringe Rohdichten sind nur durch Zuschläge niedriger Rohdichte (wie Bims oder Styrol) zu erreichen. Inzwischen sind sogar Wärmedämmputze mit einer Trockenrohdichte von 200 – 300 kg/m³ auf dem Markt.

Der Unterputz übernimmt den Wärmeschutz und die Spannungsentkoppelung zwischen der Putzschale und der Wand, der Oberputz die optische Gestaltung und den Witterungsschutz. Bei Putzgründen, die eine Übertragung von Bewegungen oder Spannungen auf den Putz erwarten lassen, kann sich die mechanische Entkoppelung zwischen dem Putzgrund und der äußeren wetterschützenden Putzschicht positiv auswirken. Infolgedessen haben sich Wärmedämmputze in der zunehmenden Altbausanierung mittlerweile etabliert.

Für die Verarbeitung gelten die gleichen Handwerksregeln wie bei der herkömmlichen Verarbeitung klassischer, mineralischer Außenputze. Wärmedämmputze werden mit marktüblichen Putzmaschinen verarbeitet, die für die Dämmputzverarbeitung mit Dämmputzwendel, Nachmischer etc. nachgerüstet werden müssen.

Hinsichtlich des Brandschutzes werden Wärmedämmputze mit EPS-Zuschlag in Baustoffklasse B1 und bei besonderer bauaufsichtlicher Zulassung in die Baustoffklasse A2 nach der DIN 4102 eingestuft. Wärmedämmputze mit mineralischen Zuschlägen sind nicht brennbar und werden in die Baustoffklasse A1 bzw. A2 eingestuft. Die Wärmeleitfähigkeit liegt in der Regel zwischen 0,07 und 0,15 W/(mK).

Damit der Oberputz rissfrei bleibt, muß der E-Modul nach oben begrenzt sein.

Aufgrund der Zusammensetzung weisen Wärmedämmputze einen sehr niedrigen E-Modul auf, so dass sie neben der Verbesserung der Wärmedämmung eines Bauteils auch geeignet sind, auf Untergründe verputzt zu werden, die das Verputzen herkömmlicher Putze nicht mehr zulassen. Des Weiteren können Wärmedämmputze durch ihr geringes Eigengewicht auch dickschichtig auf stark zerklüftetes oder wenig tragfähiges Mauerwerk aufgebracht werden. Die einzelnen Komponenten eines Wärmedämmputzes sind aufeinander abgestimmt. Um die Gewährleistung des Materialherstellers für die bauphysikalische Funktion und Dauerhaftigkeit nicht zu gefährden, dürfen keine systemfremden Materialkomponenten eingesetzt werden [12].

Der Anteil der Wärmedämmputze als Wärmedämmschicht an Außenwänden wird für Gesamtösterreich auf ca. 5 % geschätzt, wobei allerdings regional starke Unterschiede zu beobachten sind. In traditionellen „Ziegelländern“ wie Oberösterreich, Steiermark und Kärnten liegt der Anteil etwa bei 10 - 15%, während zB in Westösterreich fast überhaupt kein Wärmedämmputz verwendet wird. Grundsätzlich sind die Absatzzahlen laut Auskunft eines Herstellers stark rückläufig.

Anforderungen an Wärmedämmputze [12]:

Unterputz:

Wärmeleitfähigkeit	0,07 – 0,1 W/mK
EPS Gehalt	} 75 Vol%
Schüttdichte	{ 0,30 kg/m ³
Festmörtelrohichte	Ø0,20 – 0,40 kg/dm ³
Druckfestigkeit	Ø0,40 – 1,0 N/mm ²
Wasseraufnahmekoeffizient	Ω2,0 kg/(m ² h ^{0,5}) (wasserhemmend)
Diffusionswiderstandszahl	{ 10

Oberputz:

Druckfestigkeit	0,8 { ω { 3,0 N/mm ²
Wasseraufnahmekoeffizient	Ω0,5 kg/(m ² h ^{0,5}) (wasserabweisend)

System:

Brandverhalten nach DIN 4102:

B1 (schwer entflammbar)

2.5. Papier

2.5.1. Entwicklung

Die Bezeichnung Papier leitet sich vermutlich von der Papyrusstaude ab, aus deren Mark die Ägypter bereits vor etwa 5000 Jahren Schriftträger herstellten. Die Urform unseres heutigen Papiers dürfte allerdings aus China kommen.

Nach seiner Erfindung im 3. Jahrhundert v. Chr. in China, dokumentiert durch einen Bericht des Ministers TS'AI LUN um 105 n. Chr., verbreitete sich die Herstellung im 7. und 8. Jh. nach Korea und Japan. Um 751 wurde die Kunst des Papiermachens im arabischen Kulturkreis durch chinesische Kriegsgefangene in Samarkand bekannt. Seit 1276 wird Papier in Italien (Fabriano) gefertigt, die erste österreichische Papiermühle wurde 1321 in der Nähe von Baden bei Wien gegründet [13].

Seit 1389 wird Papier in Deutschland (erste Papiermühle in Nürnberg) hergestellt, seit 1494 in England und seit 1565 in Rußland [14].

Bis ins 19. Jh. war Papier ein Luxusartikel. Erst die Erfindung der Papiermaschine durch Louis-Nicolas ROBERT im Jahre 1799 und der Ersatz des ursprünglichen Rohmaterials Stoff durch Holz Mitte des 19. Jahrhunderts schufen die Voraussetzung für die Entwicklung des einstigen Luxusartikels zum unverzichtbaren Werkzeug des Fortschritts und der Kultur [15].

1805 erfand der Engländer J. BRAMAH die Rundsiebmaschine und 1843 der Sachse F. G. KELLER den Holzschliff. Chemische Aufschlußverfahren werden seit 1854 angewendet, zB Sulfit-Zellstoff-Verfahren von B. C. und R. TILGHMAN, patentiert 1863. Seit 1879 gibt es Schäl- und Entrindungsmaschinen, seit 1902 Stetigschleifer, seit 1925 Halbzellstoff, seit 1930 Pulper und Refiner [14].

Österreich verfügt in reichem Maß über die notwendigen Voraussetzungen für die Papierherstellung wie Holz, Wasser und Energie.

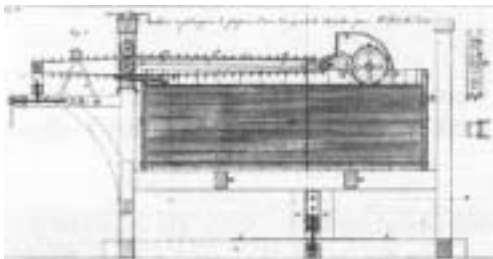


Abb. 6 Die erste Papiermaschine, 1799



Foto: T. Kunz

Abb. 7 Papiermaschine im sappi-Werk Gratkorn

Nicht zuletzt schöpft diese Industrie aus einer jahrhundertelangen Erfahrung. Sie ist nicht nur ein moderner Wirtschaftszweig, deren Maschinen und Anlagen sich auf dem letzten Stand der Technik befinden, sondern sie exportiert auch mehr als 80 Prozent ihrer Produktion - mehrheitlich nach Westeuropa.

Betrug die Papierproduktion im Jahre 1850 weltweit noch etwa 100.000 Tonnen pro Jahr, so erzeugen heute bis zu 300 Meter lange Papiermaschinen bis zu 1.300 Tonnen pro Tag bzw. etwa 300 Millionen Tonnen jährlich! Die Papierindustrie ist mit 2,5 % der Weltindustrieproduktion so bedeutend wie die gesamte Luftfahrtindustrie.

Selbst im Cyberspace-Zeitalter kann man den Entwicklungsstand eines Landes an der von ihm verbrauchten Papiermenge ablesen: in den USA beträgt der jährliche Pro-Kopf-Verbrauch rund 300 kg, in Europa etwa 200 kg und in Afrika 20 kg. In den kommenden 50 Jahren soll sich die Nachfrage verdoppeln [16]!

2.5.2. Papierherstellung [13]

Für die Herstellung von Papier, Karton und Pappe benötigt man Faserstoffe, Hilfsstoffe und Wasser. Die Faserstoffe - Holzschliff, Zellstoff und Altpapier - werden unter Zusatz von Leim-, Füll- und Farbstoffen sowie Wasser gemischt, gemahlen und nach starker Verdünnung auf der Papiermaschine entwässert und getrocknet.

Stoffaufbereitung: Vor dem Auflaufen auf die Papiermaschine werden dem Faserbrei Zusätze beigegeben, die dem Papier besondere Eigenschaften verleihen. Leimstoffe machen es widerstandsfähig gegen Flüssigkeit, zum Beispiel Tinte. Nassfestigkeit wird durch Zusatz von Kunstharz erreicht. Glattere Oberflächen und Undurchsichtigkeit werden durch den Zusatz von Talkum, Kaolin oder Calciumcarbonat erzielt. Die Färbung erfolgt durch den Eintrag von Farbstoffen.

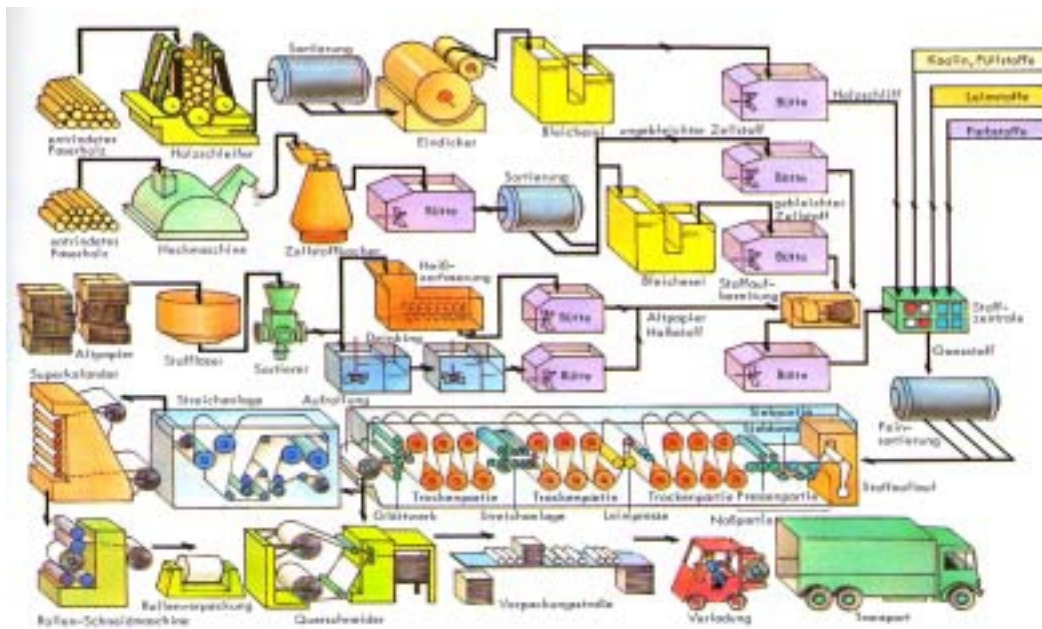


Abb. 8 Papierzeugung [14]

Entwässerung: Vom Stoffauflauf kommt der hochverdünnte Stoff zunächst auf die Siebpartie, die aus einem endlosen Sieb aus feinen Drähten, das auf Entwässerungselementen läuft, besteht. Das Sieb bewegt sich in Längsrichtung und wird gleichzeitig in der Querrichtung geschüttelt. Dabei verfilzen sich die Fasern zu einem einheitlichen, blattförmigen Gebilde, der noch nassen Papierbahn. Sie besitzt bereits soviel Festigkeit, dass sie nach dem Durchlauf durch die Gautschpresse oder Saugwalze vom Sieb abgelöst und mit Hilfe von Filzbändern durch die anschließenden Nasspressen geleitet werden kann. Damit endet die Nasspartie.

Trockenpartie: Die Papierbahn wird mit Hilfe von Trockenfilzen über eine Reihe dampferhitzer Hohlzylinder geführt. Hier wird die Restfeuchtigkeit entzogen.

Langsiebmaschine: Papiermaschinen werden nach unterschiedlichen Prinzipien gebaut. Am weitesten verbreitet sind die Langsiebmaschinen. Sie können bis zu 10 Meter breite Siebe haben und 300 Meter lang sein. Die Papierbahn läuft mit Geschwindigkeiten bis über 1.600 Meter pro Minute - das sind 100 km/h.

Rundsiebmaschine: Die Rundsiebmaschine dient der Karton- und Pappenherstellung. Ihr Merkmal sind sich drehende, zylinderförmige Siebe, die in mit Faserbrei gefüllte Tröge eintauchen.

Streichmaschine: Die Oberfläche kann noch verbessert werden, in dem Papier oder Karton ein- oder mehrmals mit Pigmentstrich versehen werden. Das ergibt eine weiße, feine, glatte Oberfläche.

Kalander: Um die Qualität des Papiers zu verbessern, verwendet man ein Walzenglättwerk mit abwechselnd harten Stahl- und weichen Papier-

oder Baumwollwalzen, den Kalandern. Der Pressvorgang gibt dem Papier eine besondere Glätte; daraus folgt eine bessere Druckqualität.

Schneidmaschinen: Meist wird das Papier nicht in der Maschinenbreite benötigt. Deshalb teilt ein Rollenschneider die Bahn in ihrer Längsrichtung. Querschneider trennen die einzelnen Bahnen in Bogen.

Versand: Zum Versand kommt das Produkt entweder in Rollen, auf Paletten oder in Ballen. Die Pakete (Riese) enthalten 100, 250, 500 oder 1.000 Bogen.

2.5.3. Produktionsvolumen in Österreich [13]

Österreichische Produktion von Papier, Karton und Pappe (1999) 4,1 Mio. t
(= 1,3 % der Weltproduktion, bzw. 16. Stelle)

Österreichische Produktion von Zell- und Holzstoff (1999) 1,7 Mio. t
(= 0,9 % der Weltproduktion, bzw. 17. Stelle)

Österreichischer Export von Papier, Karton und Pappe (1999) 3,5 Mio. t
(= 3,7 % des Welthandels, bzw. 7. Stelle)

Österreichischer Export von Zell- und Holzstoff (1999) 0,3 Mio. t
(= 0,9 % des Welthandels, bzw. 16. Stelle)

Stellung in der österreichischen Wirtschaft (1998) 4,6 %

Exportanteil am österreichischen Gesamtexport (1999) 4,1 %

Pro-Kopf-Verbrauch an Papier, Karton und Pappe (1999) 232 kg

Pro-Kopf-Verbrauch an Papier, Karton und Pappe (1996) 186 kg

Faserstoffversorgung (1999)	
Altpapier	49 %
Papierzellstoff	40 %
Holzstoff	11 %
Holzverbrauch (1999)	6,77 Mio. fm
Holzverbrauch (1996)	6,23 Mio. fm

Etwas mehr als 70 Prozent werden aus dem Inland bezogen. Das in der Papierindustrie eingesetzte Holz stammt zu etwas mehr als der Hälfte aus der Waldpflege (der Durchforstung) und zu knapp der Hälfte aus Nebenprodukten der Sägeindustrie (hauptsächlich Hackgut).

In Österreich gibt es 3,9 Mio. Hektar Wald, das entspricht rund 47 Prozent der gesamten Staatsfläche. Die Waldinventur weist einen Holzvorrat von 988 Mio. Festmetern aus. Der jährliche Holzzuwachs beträgt ca. 27,3 Mio. Festmeter, die jährliche Ernte etwa 19,5 Mio. Festmeter. Daraus ergibt sich ein Nettozuwachs von rund 8 Mio. Festmetern pro Jahr.

Die 110 Betriebe der Papier- und Pappeverarbeitenden Industrie (PPV) verarbeiteten im Jahr 2000 rund 880.000 t Papier und Karton und erreichten einen Produktionswert von knapp ATS 20 Mrd. öS (1,45 Mrd. €). Die Exportquote gemessen an der Produktion liegt bei 55 % [17].

2.5.4. Altpapier-Recycling [18]

Zu Beginn der achtziger Jahre wurden die ökologischen Vorzüge des „Recycling-Produktes“ Altpapier, auch im Hinblick auf das zunehmende Umweltbewusstsein der Bevölkerung, immer nachhaltiger.

Wesentliche Argumente sind:

- ≠# Ressourcenschonung
- ≠# Reduzierung von Papierabfall durch Altpapier-Recycling

- ≠# Geringerer Energie- und Frischwasserverbrauch bei der Produktion
- ≠# Umweltverträgliche Chemikalien (kein Chlor) und geringere CO₂-Emissionen bei der Produktion.

So wurde Altpapier der wichtigste Rohstoff der europäischen Papier- und Kartonfabriken.

Erfasst wird Altpapier sowohl bei gewerblichen Anfallstellen als auch bei privaten Haushalten. Da für die Herstellung von Verpackungspapieren („braune Ware“, Pappe oder Kartonagen) andere Altpapierqualitäten benötigt werden als zB für die Produktion von graphischen Papieren („weiße Ware“), ist eine möglichst getrennte Erfassung der gebrauchten Papiere bereits bei der Anfallstelle sinnvoll und notwendig.

Vor allem die Deinking-Industrie plädiert seit langem für die getrennte Erfassung graphischer Papiere, um möglichst wenig verschmutztes Papier zu erhalten.

Neben der getrennten Erfassung ist die wichtigste Voraussetzung für die Verwertung gebrauchter Papiere durch die Papierindustrie die Sortierung durch die Sekundärrohstoff- und Recyclingbranche.

Hier geht es um die Abtrennung von papierfremden Bestandteilen (Metalle, Kordel, Glas, Textilien, Sand, Kunststoffe etc.) und die Bildung definierter Papiersorten. Das Altpapier durchläuft also eine qualitative Bearbeitung. Die Sortierung erfolgt manuell und ist letztlich die Qualitätssicherung vor Abgabe des gebrauchten Papiers an den Produzenten.

Als Verständigungsgrundlage zwischen der Papierindustrie und den Anbietern von Altpapier wurde die „Liste der Deutschen Standardsorten und ihre Qualitäten“ erstellt, die zur Zeit 46 Altpapiersorten in ihrer Zusammensetzung und Qualität beschreibt [19].

Jahr	Altpapier- verbrauch 1000 t	Altpapier- aufkommen 1000 t	Altpapier- ausfuhr 1000 t	Altpapier- einfuhr 1000 t	Altpapier- einsatz- quote %	Altpapier- rücklauf- quote %	Altpapier- preisindex 1985 = 100
1960	1.319	1.174	35	206	38,4	26,7	101,5
1970	2.511	2.403	184	320	45,6	31,5	110,5
1980	3.168	3.282	527	429	41,8	33,9	116,0
1990	6.080	6.803	1.399	799	48,6	43,5	6,3
1991	6.110	7.500	1.822	743	47,9	47,0	n.v.
1992	6.742	7.917	1.885	712	52,0	50,0	- 13,0
1993	6.995	8.604	2.159	560	53,7	55,0	- 34,0
1994	8.160	9.802	2.422	849	56,4	60,0	n.v.
1995	8.600	10.636	3.212	1.141	58,0	67,2	61,9
1996	8.888	10.921	2.958	934	60,3	70,6	12,2
1997	9.457	11.493	3.057	1.021	59,4	71,3	0,3
1998	9.917	12.164	3.311	1.064	60,8	71,2	- 1,2
1999	10.232	12.882	3.630	980	61,3	73,2	21,6

Abb. 9 Zeitreihen zum Deutschen Altpapiermarkt (Quelle: VDP, StaBuA, bvse) [18]

Es wird unterschieden in:

- ≠ Untere Sorten
- ≠ Mittlere Sorten
- ≠ Bessere Sorten
- ≠ Krafthaltige Sorten
- ≠ Sondersorten

Die zunehmende Verwendung von Altpapier zur Herstellung von Papier erforderte eine Anpassung der Aufbereitungsverfahren in der Papierindustrie. Auch die Qualitätsanforderungen an die Altpapierfaserstoffe stiegen; nicht zuletzt, um das häufig zu findende „Downcycling“ zu begrenzen (zB Einsatz graphischer Papiere zur Herstellung von Verpackungspapieren).

Die in der Papierindustrie üblichen Altpapier-Aufbereitungsanlagen arbeiten im Allgemeinen nach dem folgenden Prinzip:

Das Altpapier wird zunächst im sogenannten „Pulper“, einer Art Küchenmixer im Großformat, aufgelöst und zerfasert wobei auch eventueller Unrat beseitigt wird. Der Altpapier-Faserbrei wird über Siebe abgezogen und in weiteren Schritten sortiert, gereinigt und eingedickt.

Zusätzlich zur Altpapieraufbereitungsanlage verfügen zahlreiche Papierfabriken - insbesondere die Hersteller graphischer Papiere - über sogenannte Deinking-Anlagen, mit deren Hilfe die Druckfarben zu einem hohen Anteil von den Fasern abgetrennt werden. Je nach Bedarf und Notwendigkeit schließt sich hieran eine Dispergierung (= Zerkleinerung nicht ausgeschleuster Schmutzpunkte unter die Sichtbarkeitsgrenze) oder eine Mahlung (Fraktionierung) der Fasern an.

Der fertige Stoff wird ggf. mit anderen Faserstoffen, Füll- und Hilfsstoffen gemischt, gelangt dann in die Mischbütte und wieder in den Produktionsprozess [18].

Chancen und Grenzen des Altpapier-Recyclings [18]

Die Industrie hat umfangreiche Entwicklungen vorgenommen, um die Einsatzmenge von Altpapier, insbesondere der Massensorten, bei der Papierproduktion zu steigern. In der Bundesrepublik Deutschland erreichte die Altpapier-Einsatzquote

(= AP-Verbrauch in % der Papier- und Pappeerzeugung) 1999 den Wert von 61,3 %.

Die österreichische Papierindustrie hat den Altpapierverbrauch im Jahr 1998 um 90.000 t auf 1,7 Mio. Tonnen gesteigert. Davon waren 130.000 t sehr hochwertige Altpapiersorten, 390.000 t gemischtes Altpapier, 580.000 t Wellpappe und Kraftpapiere sowie 630.000 t Zeitungen und Magazine [13].

Es gibt jedoch Grenzen. Jede Altpapieraufbereitung mindert zwangsläufig die Qualität des Fasermaterials: die Fasern werden kürzer, die Festigkeit lässt nach, frische Fasern müssen zugeführt werden. Darüberhinaus ist die Altpapier-Einsatzmöglichkeit für die verschiedenen Papierqualitäten unterschiedlich. Bei Verpackungspapieren und Karton liegt sie bei 96 % und hat technisch ihre Sättigungsgrenze erreicht; dies gilt auch für Spezial-Papiere mit 48 %. Hygiene-Papiere rangieren bei 69 % und könnten auf ca. 75 % gesteigert werden, Zeitungsdruckpapier liegt schon bei etwa 100 %. Den größten Spielraum bieten die graphischen Papiere mit zur Zeit 37 % Einsatzquote, wobei die sortenreine Erfassung „heller“ Altpapiersorten für eine solche Steigerung unbedingt erforderlich ist.

Altpapier - ein weltweit gehandelter Rohstoff [18]

Gesetzliche Erfassungs- und Verwertungsgebote haben den Altpapier-Markt, auf dem bisher Anbieter und Nachfrager frei agieren konnten, grundlegend geändert. Es gibt jetzt ein starres Altpapier-Überangebot. Trotz steigender Altpapier-Einsatzquoten werden zunehmend Altpapier-Übermengen - insbesondere bei den Massensorten - anfallen, die im Inland keiner stofflichen Verwertung zugeführt werden können. Vor diesem Hintergrund gewinnt der seit Jahrzehnten reibungslos funktionierende, grenzüberschreitende Handel mit Altpapier, der seine Ventilfunktion

verlässlich erfüllt, zunehmend an Bedeutung. Es sind nicht mehr nur die europäischen Nachbarländer, in die exportiert wird, wir bewegen uns vielmehr in einem Altpapier-Weltmarkt.

Süd-Ost-Asien und Ost-Europa entwickeln sich zu großen Nachfragern, die ihren Altpapierbedarf aufgrund kaum vorhandener eigener Sammelsysteme auf dem Weltmarkt decken müssen.

Die zum Teil gegenläufigen Zyklen bei Altpapierangebot und -nachfrage können zu großen und kurzfristig eintretenden Preisschwankungen führen. Neben dem Instrument langfristiger Liefer- und Abnahmeverträge zu Festpreisen bietet seit März 2000 die Warenterminbörse (WTB) Hannover die Möglichkeit, über sogenannte Futureskontrakte das Preisrisiko abzusichern und somit mehr Preisstabilität in den Altpapiermarkt zu bringen.

Papierprodukte im Rohstoffkreislauf

Die Papier- und Pappeverarbeitende-Industrie (PPV) arbeitet mit den Materialien Papier, Karton und Pappe. Diese werden zunehmend gesammelt und sind im Altpapierrecycling wiederverwertbar.

Recyclingquote 1998:

Verpackungen aus Papier,	
Karton und Wellpappe	84,3 %
PPV-Industrie gesamt	77,0 %

Die Organisation der Sammlung/Verwertung von Verpackungen des Papiersektors erfolgt in Österreich durch die Altpapier Recycling Organisations GesmbH (ARO), eine Sammel- und Verwertungsgesellschaft der Altstoff Recycling Austria AG (ARA).

Die ARO organisiert im Rahmen des ARA-Systems österreichweit die Sammlung von gebrauchten Papierverpackungen.

Insgesamt stehen bundesweit mehr als 520.000 Sammelbehälter zur Verfügung. Das gesamte Altpapier wird in österreichischen Papierfabriken wieder zu neuen Papierprodukten verarbeitet.

1999 wurden in Österreich rund 72 % aller auf den Markt gebrachten Papierprodukte (Zeitungen, Prospekte, Kataloge, Papierverpackungen) gesammelt und wiederverwertet. Die Rücklaufquote aller 1999 in Österreich gesammelten Verpackungen aus Papier, Karton, Pappe und Wellpappe war mit knapp 85 % sogar noch um einiges höher.

62 % des Altpapiereinsatzes der österreichischen Papierindustrie gehen in die Rohpapier- und Kartonerzeugung für die Herstellung von Verpackungen.

Im Jahr 1999 wurden in Österreich rund 520.000 t Papierverpackungen in Verkehr gesetzt. Davon wurden 441.000 t (84,8 %) gesammelt und verwertet, nur 79.000 t landeten im Hausbrand oder Restmüll. Das ist deutlich mehr als die in der Verpackungs-Zielverordnung für 2001 vorgegebene gesetzliche Sammelquote von 80 % [20].

Die Altpapiersammlung brachte im Jahr 2000 einen neuen Sammelrekord. Erstmals sammelten Österreichs Haushalte mehr als eine halbe Million Tonnen Altpapier. Laut Altpapier-Recycling-Organisationsgesellschaft (ARO) erbrachte die Haushaltssammlung im Jahr 2000 rund 506.000 t. Das sind um 27.000 t oder 5,7 % mehr als im Jahr davor bzw. 62,6 kg Altpapier pro Kopf.

allerdings problematisch hinsichtlich der Grundwasserbelastung durch Auswaschung im Deponie- oder Brand- bzw. Löschfall sind [4], gibt es seit einiger Zeit Bestrebungen, die Borverbindungen durch Alternativen wie Tonerdehydrat oder Fungotannin zu ersetzen [22]. Sofern sie nicht durch andere Substanzen verunreinigt sind, können die Flocken laut Herstellerangaben zu 100 % für den gleichen Anwendungsfall wiederverwendet werden.

Aus einem Blatt Papier der Größe DIN A4 mit 80 g/m^2 können bei einer angenommenen Rohdichte des fertigen Dämmstoffes von 50 kg/m^3 rund 100 cm^3 Dämmstoff hergestellt werden. Dies entspricht zB bei einer Dämmstoffdicke von 10 cm einer Fläche von $3,3 \times 3,3 \text{ cm}$.

Der Gesamtenergiebedarf für die Herstellung der Zelluloseflocken ist im Vergleich zu anderen Dämmstoffen als äußerst gering zu bezeichnen [4]. Allerdings widersprechen die Aufteilung des Altpapier-Marktes auf wenige Großunternehmen und die starke Abhängigkeit des Rohstoffpreises von internationalen Entwicklungen einem dezentralen ökologischen Ansatz.

3.2. Papierdämmung im Bauteil

Ein Vorteil der Zellulosedämmung liegt einerseits in der Möglichkeit, verschnittfrei unterschiedliche Dämmdicken zu erzielen andererseits in der hervorragenden Anpassung des eingeblasenen oder aufgespritzten Dämmstoffes an die umgebenden Bauteile. Infolge ihrer dichtenden Wirkung auf die Gebäudehülle erscheinen Zellulose-Flocken für alle Holzbauweisen insbesondere auch für Sanierungen und Umbauten mit ihren häufigen Bauteildurchdringungen - zB im Dachgeschossausbau, wo ein luftdichter Anschluss der Dampfsperre praktisch unmöglich ist - besonders geeignet. Dass dennoch dieses Fehlen der Dampfsperre bzw. der nachträglich zu dämmende Konstruktionsaufbau bereits in der

Planungsphase kondensationstechnisch zu untersuchen ist, sei der Vollständigkeit halber erwähnt.

Aber auch bei Holz-Neubauten und da insbesondere in der Fertigteile-Bauweise, ergibt sich durch die, im Vergleich zu anderen Dämmstoffen relativ hohe spezifische Wärmekapazität der Zellulosefasern ein Vorteil hinsichtlich des Schutzes vor sommerlicher Überwärmung.

Untersuchungen in den Jahren 1989/90 an der Abteilung für Architektur am Technikum Winterthur/Schweiz [23] und parallel, aber unabhängig davon, an der University of Colorado in Denver/USA, Fachbereich Architektur und Planung [24], haben gezeigt, dass die eingeblasenen und durch den Förder-Luftdruck bis zu 70 kg/m^3 komprimierten Zellulosefasern eine dichtende Wirkung auf eventuelle Leckstellen in der Gebäudehülle haben.

Untersuchungen über das Feuchtigkeitsverhalten zeigten, dass sogar an einem, mit einer außenliegenden Acrylglasplatte abgedeckten Versuchsfeld keine Kondensatspuren festzustellen waren und die Feuchtigkeit in der Dämmung nicht höher war als in den mit Hartfaserplatten abgedeckten Feldern. Der Wassergehalt in der Dämmung war nicht so stark angestiegen, dass er sich negativ auf die Wärmeleitfähigkeit ausgewirkt hätte. Die Zellulosefasern schienen also die in der äußeren Schicht der Dämmebene als Kondensat anfallende Feuchtigkeit gut zu absorbieren und auch wieder abzugeben. Die Absorptions- und Desorptionskurven der Zellulosefasern sind denen von Holz sehr ähnlich [23].

Es wurde auch ein Wandaufbau geprüft, der ohne innenliegende Dampfbremse eine außenseitige, dreilagige, mineralische Putzschicht auf einer Putzträgerplatte vorsieht. Da das mittels eingeblasener Zelluloseflocken gedämmte Versuchsgebäude zu diesem Zeitpunkt nicht bewohnt war, sind diese Ergebnisse jedoch infolge

des Fehlens von üblichen Feuchtigkeitsquellen nicht als sehr aussagekräftig einzustufen [23].

Während in Winterthur hauptsächlich Teile zweier mittels trocken eingeblasener Zelluloseflocken gedämmter Satteldächer untersucht wurden, errichtete man in Denver/Colorado zwei identische Holzhäuser mit gleichem k- bzw. U-Wert der Wand- und Dachaufbauten. Eines der Häuser wurde mit Mineralfasermatten gedämmt, das andere mit feucht gesprühten Zellulosefasern. Bevor die Dämmung installiert wurde, testete man beide Häuser mittels der „Blower-Door“-Methode auf ihre Luftdichtigkeit. Danach wurden beide Gebäude – immer noch ohne Dämmung – über einen Zeitraum von drei Wochen auf konstant 18,3 ° beheizt und verbrauchten in dieser Zeit nahezu dieselbe Energiemenge. Nach Abschluss der Dämmarbeiten ergaben weitere Luftdichtigkeitsmessungen, dass das mit Zellulose-Flocken gedämmte Gebäude um 36 - 38 % dichter war als das mineralfasergedämmte. Bei durchschnittlicher Einbauqualität war der Wärmeschutz der Zellulosedämmung um 23 % besser [24].

Laut einer Studie von Prof. Schulze können die Zellulosefasern infolge Ihrer Feuchtigkeitsaufnahme-fähigkeit allerdings eine gegenüber der Mineralfaserdämmung stark verzögerte Austrocknung von zu naß eingebauten Konstruktionshölzern bewirken [25].

3.3. Verarbeitungstechnik

Das vorsortierte Altpapier der Sorte 2.01, das ist vor allem Tageszeitungspapier mit max. 5 % durchgefärbten Zeitungen oder Beilagen, wird nach wie vor in relativ einfachen Maschinen zerkleinert und zusammen mit Brandschutzmitteln und Insektiziden zu feinen Flocken vermahlen, komprimiert und meist in Kunststoffsäcken zu 12 – 14 kg bzw. in „Big Bags“ mit ca. 200 kg verpackt.

Jahrzehntelang war die Anwendung fast ausschließlich auf das Ausblasen von Hohlräumen



Abb. 11 Anlieferung und Grobzerkleinerung des Zeitungspapiers im sog. Shredder



Abb. 12 Anlage zur Herstellung von Zellulosedämmung (im Hintergrund links der Shredder)

beschränkt. Seit den sechziger Jahren gibt es Bestrebungen, die hohe Staubbelastung bei der Einbringung der Zelluloseflocken zu reduzieren. In den USA wurde das sogenannte „par/Pac™ DryPac™“ Wand-System entwickelt [26], bei dem Holzsteher raumseitig mit einer polyesterfaserverstärkten Kunststoff-Folie bespannt werden, und die trockenen Fasern anschließend ohne Bindemittel in die entstehenden Hohlräume im „loose fill“-Verfahren eingeblasen werden. Die weltweit - nach dem trockenen Einblasen - gängigste, in Europa jedoch infolge der langen Austrocknungszeiten und des relativ großen „Over-Sprays“ selten angewandte Methode ist das sogenannte Compact-Spray-On-(CSO)-Verfahren. Dabei wird durch Befeuchten der Zelluloseflocken mit Wasser unmittelbar nach Verlassen des Förderschlauches die Bindekraft des Hemizelluloseanteils der Fasern aktiviert und dadurch die Herstellung von einigermaßen formstabilen Dämmkörpern ermöglicht. Einerseits um die Austrocknungszeiten zu verkürzen, andererseits um neue Anwendungsgebiete zu erschließen (zB Akustikbeschichtungen, Oberflächenveredelungen) wurden in den USA seit den späten 60er Jahren Verfahren entwickelt, die Zellulosefasern mit Bindemittel, zumeist auf Formaldehyd-, Reaktionsharz- oder Polyvinylacetat-Basis, zu binden.

Zwar sind die meisten dieser Systeme nicht für die Verwendung im Außenbereich gedacht, doch könnten die erzielbaren Druckfestigkeiten durchaus zur Aufnahme von Putzschichten geeignet sein. In jüngster Zeit sind Tendenzen zu erkennen, ökologisch verträgliche Bindemittel einzusetzen und die Fasern auch im Außenbereich anzuwenden und zu verputzen [27].

3.3.1. Einblasverfahren

Das Einblasen von Zelluloseflocken („loose fill“-Verfahren) ist das älteste und immer noch weitaus



Abb. 13 Einblasen einer Dachschräge vom Spitzboden aus

häufigste Verfahren. Bereits um 1887 existieren erste Patente in den USA [5], seither hat sich an der grundsätzlichen Methode kaum etwas geändert.

Vorteile

Diese Verarbeitungstechnik setzt keine besonders hochentwickelte Maschinenteknik voraus, da sich einerseits der durch die Zellenradschleuse bedingte, leicht pulsierende Luft-/Zellulosestrom nicht störend, wenn nicht sogar positiv auf das Ausfüllen der Hohlräume mit Dämmstoff auswirkt, andererseits keine Wasserpumpe und - oftmals technisch aufwendige - Sprühdüsen erforderlich sind.

Durch den Umstand, dass die zu befüllenden Hohlräume in der Regel relativ druckstabil sind, besteht die Möglichkeit, die Fasern bis zu einer Dichte von 70 kg/m^3 einzublasen und dadurch bei einer unwesentlichen Verschlechterung der Wärmedämmung eine gegenüber anderen Dämmstoffen wesentlich höhere speicherwirksame Masse zu erzielen.

Nachteile

Dadurch, dass die vollständige Befüllung insbesondere von stark ausgefachten Hohlräumen nicht immer gewährleistet ist und nur im Nachhinein und zerstörungsfrei nur mittels Infrarotaufnahmen kontrolliert werden kann - was zufolge des Preisdruckes nicht immer geschieht - besteht bei unsorgfältiger Verarbeitung die Gefahr von Fehlstellen, die nur schwer saniert werden können.

Ein weiterer Nachteil ist die Staubentwicklung während des Einblasens, da die eingeblasene Förderluft wieder entweichen muss und dabei zwangsläufig Feinstaubanteile aus den Fasern mitnimmt.

Um diesem Nachteil zu begegnen, ist eine sorgfältige Planung und Ausführung der Befüll- und Abluftöffnungen erforderlich, was eine Koordination

mehrerer Gewerke erforderlich macht und dadurch „Schnittstellen-Probleme“ mit sich bringen kann.

3.3.2. Compact Spray On (CSO)-Verfahren

Bei diesem Verfahren handelt es sich um die Ausnutzung der relativ hohen Bindekräfte des Hemizellulosenanteils in den Flocken, welche im Stande sind, diese auch bei mäßiger Befeuchtung von 40 – 50 Gew.% untereinander und mit dem Untergrund zu verbinden. Die Zelluloseflocken werden raumseitig auf außenseitig beplankte Ständerwände aufgespritzt und entlang der Ständern mittels einer rotierenden Walze abgezogen.



Abb. 14 Abziehen der aufgespritzten Dämmschicht



Abb. 15 CSO-gesprühtes „Fachwerk“

Vorteile

Ein wesentlicher Vorteil ist die sofortige Überprüfbarkeit des Arbeitsergebnisses. Während es beim „loosefill“-Verfahren der Sorgfalt des Anwenders und eventueller Infrarot Aufnahmen obliegt, Fehlstellen zu erkennen, ist dies beim CSO-Verfahren auch für den Bauherrn problemlos möglich.

Nachteile

Durch die Zugabe von Wasser ergeben sich bei einer Schichtdicke von 10 cm je nach Mischungsverhältnis und Witterung bzw. Belüftung Austrocknungszeiten von bis zu drei Wochen, wobei durch die relativ schnell trocknende äußere Schicht das Austrocknen der dahinter liegenden Schichten deutlich verlangsamt wird.

Um diesem Umstand zu begegnen, wird versucht, bei noch ausreichender Bindung der Fasern mit möglichst wenig Wasser auszukommen. Dies hat jedoch wieder vermehrte Staubeentwicklung und einen relativ großen Anteil von „Overspray“ – also auf den Boden fallendes Material – zur Folge, was wiederum die Akzeptanz dieses Verfahrens bei Planern und Bauherrn drastisch reduziert.

Derzeit werden daher nur etwa 3 – 5 % der insgesamt verarbeiteten Zellulose-Dämmung mit diesem Verfahren aufgebracht.

3.4. Firmenunterlagen

Produktunterlagen folgender Firmen wurden verwendet:

Cellulose Produktion Hartberg (CPH), Am Ökopark
6, A-8230 Hartberg

Cellulose Insulation Manufacturers Association
(CIMA), 136 South Keowee Street, Dayton,
OH 45402, USA

Climacell GmbH, Postfach 19, D-74916
Angelbachtal

Dämmstatt W.E.R.F GmbH, Markgrafendamm 16,
D-10245 Berlin

Doser (Holzfaser-Dämmsysteme, Putze),
Kienbergstraße 25, D-87459 Pfronten

Ecovilla Oy, Katajajarjuntatu 8, 45720 Kuusankoski,
Finnland

Fiberiffic Energy Systems, 2191 South Jason St.,
Denver, Colorado 80223, USA

Franner Bau- und Raumakustik, Römergasse 76,
A-1170 Wien

GreenStone Industries Inc., 6500 Rock Spring Drive,
Suite 400, Bethesda, Maryland 20817, USA

Homatherm Dämmstoffwerk GmbH & Co.KG,
Gewerbegebiet – Ahornweg 1, D-06536 Berga

International Cellulose Corporation (ICC), 12315
Robin Blvd., Houston, TX 77245, USA

Isofloc, Am Fieseler Werk 3, D-34253 Lohfelden

Isocell Natürliche Dämmsysteme, Bahnhofstraße 36,
A-5202 Neumarkt am Wallersee

Isodan, Maribovej 20 DK-4960 Holeby

Isoprojex S.A. 214 rue Descartes, Z.I.-B.P.5, 54712
Ludres Cedex, France

Kematherm, Posthof 2c, D-38704 Liebenburg

Kimatec System Bau- und Dämmstoff GmbH,
Sedlhofring 7e, D-82297 Hofheggenberg

ParPac™, 4545 East 52nd Avenue, Commerce City,
CO-80022, USA

ThermoCon Inc., 2500 Jackson Street Monroe,
Louisiana 71202, USA

Thermofloc, Bahnhofstraße 79, A-9710
Feistritz/Drau

Termex-Eriste Oy, Postfach 34, SF-43101 Saarijärvi,
Finnland

3.5. Die Fasern im Vergleich

Aufgrund der Tatsache, dass einige Firmen mit ihren, im Vergleich zu Altpapierfasern (wie sie zB von der Firma CPH verwendet werden), längeren

Rohzellulosefasern werden, wurde am Institut für Papier-, Zellstoff- und Fasertechnik an der TU Graz - Vorstand O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Stark - eine Faserlängenbestimmung durchgeführt.

Die amerikanischen Hersteller „International Cellulose Corporation“ (ICC) und „ThermoCon Inc.“ bieten praxiserprobte Komplettsysteme an.

In beiden Fällen handelt es sich laut Herstellerangaben nicht um Altpapier- sondern um die längeren Holzfasern, mit denen höhere Festigkeitswerte zu erzielen seien.

Die Fasern aller drei Hersteller enthalten lungengängige Bestandteile. Die Weltgesundheitsorganisation WHO definiert als Faserstäube solche mit einer Länge größer $5\ \mu\text{m}$, einem Durchmesser kleiner $3\ \mu\text{m}$ und einem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis, das größer als 3:1 ist. Die maximale Länge solcher Fasern liegt bei etwa $100\ \mu\text{m}$ [28]. Da der Mensch – im Gegensatz etwa zum Pferd – keine zelluloseabbauenden Enzyme besitzt und die verwendeten Borverbindungen zudem Schleimhautreizungen hervorrufen können, sind sowohl während der Herstellung als auch während der Verarbeitung Feinstaubmasken zu verwenden.

3.5.1. Fasern der Cellulose Produktion Hartberg (CPH)

Der Zellulosedämmstoff wird aus Altpapier der Sorte 2.01 hergestellt. Bei dieser Sorte sind max. 5 % durchgefärbte Zeitungen oder Beilagen erlaubt [19]. Da Tageszeitungspapier durchschnittlich aus 60 - 100 % Altpapier besteht, haben die daraus hergestellten Fasern schon einige Recyclievorgänge durchgemacht und sind daher – wie in den Angaben von ICC und ThermoCon dargestellt - tatsächlich kürzer als diejenigen der Mitbewerber. Durch elektronische Bildanalyse wurde eine mittlere Faserlänge von $390\ \mu\text{m}$ ermittelt.

Vermutlich infolge der Mahlvorgänge bei der Zerkleinerung zu Flocken sind die Primärzellen oft fibrilliert, was grundsätzlich zu einer stärkeren Verfilzung der Fasern untereinander führt und daher nicht unbedingt ein Nachteil sein muss. Allerdings hat das Mahlen auch Abknickungen und Brüche der Fasern zur Folge, was wiederum die Festigkeit reduziert.

3.5.2. Fasern der International Cellulose Corporation (ICC)

Das arithmetische Mittel der Faserprobe wurde zu $515\ \mu\text{m}$ ermittelt. Die Fasern sind damit deutlich länger und zudem weniger fibrilliert als diejenigen der CPH-Probe. Obwohl eigentlich als Akustikbeschichtung gedacht, scheinen die erzielbaren Dämmkörper durchaus zum Verputzen geeignet zu sein (zB „Dom im Berg“ in Graz).

Die Fasern werden aus den USA importiert und als Komplettsystem inklusive Bindemittel und Maschinen vertrieben, wobei die Bindemittel nicht als ökologisch bezeichnet werden können.



Abb. 16 Fasern der Firma International Cellulose Corporation (ICC), USA

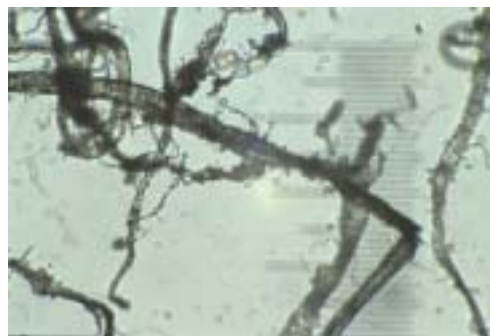


Abb. 17 CPH-Fasern

3.5.3. ThermoCon-Fasern

Mit einem Mittelwert von 545 μm sind diese ebenfalls länger als die CPH-Fasern. Das Original-Muster aus den USA zeigt einen rein weißen plattenförmigen Dämmkörper von ähnlicher Druckfestigkeit wie Platten aus expandiertem Polystyrol.

3.6. Patentsituation

Aufgrund der internationalen Grundlagen- und Patentrecherche, bei der Patentschriften insbesondere aus den USA aber auch aus Großbritannien, Australien, Japan und Deutschland erhoben wurden, gibt es beim Feuchtsprühverfahren aus heutiger Sicht drei unterschiedliche Ansätze zur Lösung des Problems des zu hohen Feuchtigkeitsgehaltes und damit unwirtschaftlich langer Austrocknungszeiten des aufgespritzten Dämmkörpers. Entscheidend ist dabei die Wahl des geeigneten Bindemittels, der Bindemittelzugabe sowie die Art und Weise der Vermischung mit den Zellulosefasern (Mischvorrichtung, Düse).

Hinsichtlich der Anwendung von gesprützten Zellulosefasern im Fassadenbereich konnten keine Literaturhinweise gefunden werden.

3.7. Bindemittel

Aufgrund der vorliegenden Unterlagen können drei Zustände des Bindemittels vor seinem Auftrag auf die Zellulosefaser unterschieden werden.

3.7.1. Schaum

Dieses Verfahren wurde in den USA ursprünglich für die Verwendung mit Mineralfasern entwickelt und wird weltweit über ein Lizenzsystem vertrieben. Es ermöglicht eine gute Benetzung der Fasern mit dem im Schaum gelösten Bindemittel unter Verwendung von relativ wenig Feuchtigkeit. Nach Zerplatzen der Schaumstruktur verbleibt die durch

rasch aushärtende, meistens formaldehyd- oder reaktionsharzbasierende Bindemittel stabilisierte Faserstruktur als relativ druckfester Dämmkörper, der gemäß Herstellerangaben mit Anstrichen, Tapeten oder sogar Putzen versehen werden kann [29].

Die Anwendung im Zusammenhang mit Zellulosefasern ist laut Herstellerangaben zwar möglich, wird aber infolge der, verglichen mit Mineralfasern, ungleich höheren Feuchtigkeitsaufnahmekapazität der Zellulosefasern von einigen Verarbeitern kritisch bewertet. Im Herbst 2000 konnte dieses Verfahren „in natura“ in einer Tiefgarage in Vorchdorf/OÖ studiert werden, wo ein Team aus Frankreich beabsichtigte, auf rund 700 m² Stahlbeton-Deckenunterseite eine 10 cm dicke Zellulosedämmschicht aufzubringen [30]. Es wurde ein Bindemittel auf modifizierter Latex-Basis verwendet. Die Zelluloseflocken zeigten trotz Bindemittelvoranstrich auf der Betondecke eine relativ geringe Anfangshaftung, was zur Folge hatte, dass sich bei Schichtdicken größer als etwa 6 cm immer wieder einzelne tellergröße Flächen von der Decke lösten. Daher wurde die geplante Dämmschicht von 10 cm auf 6 - 7 cm reduziert. Die Staubbelastung aber auch die Förderleistung waren relativ gering.

An mitgenommenen Proben, die bei Raumtemperatur gelagert wurden, zeigte sich nach dem Aushärten (ca. 7 - 10 Tage je nach Schichtdicke) eine subjektiv recht beachtliche Druckfestigkeit bei einer sehr flockigen und leichten Struktur. Dieser Umstand lässt das Material eher für mäßig druckbelastete Anwendungsfälle geeignet erscheinen, bei denen das Kriterium eine möglichst hohe Dämmwirkung ist. Wo es hingegen auf die Zugfestigkeit normal zur Probenebene und auf die Fähigkeit ankommt, das Gewicht dickerer Putzschichten aufzunehmen, scheint die Struktur doch zu locker zu sein.

Eine deutsche Firma bietet ein ähnliches Verfahren an, welches angeblich auch mit Zelluloseflocken

funktioniert [31]. Dieses konnte allerdings noch nicht beurteilt werden, da derartige Verfahren in Europa noch sehr selten angewendet werden und die reale Situation auf der Baustelle daher kaum studiert werden kann.

3.7.2. Pulver

Bei diesem Verfahren werden den Zellulosefasern Bindemittel entweder in trockenem, rieselfähigen Zustand beigemischt oder in Alkohol oder Wasser gelöst, auf die Fasern aufgebracht und diese anschließend getrocknet, sodass die Bindemittel einen relativ guten Verbund mit den Fasern eingehen und die Gefahr der Entmischung gering ist.

In beiden Fällen erfolgt die Aktivierung der Klebekraft wie beim CSO-Verfahren durch reines Wasser [27].

3.7.3. Flüssigkeit

Bindemittel in flüssiger Form werden mit den Zellulosefasern durch den Förderdruck kurz vor oder unmittelbar nach Verlassen des Förderschlauches vermischt. Die Austrocknungszeiten variieren je nach Art des Bindemittels, der Konzentration und der Dicke der Dämmschicht.

3.8. Mischvorrichtungen

Grundsätzlich können im Zusammenhang mit dem Zellulose-Sprühverfahren drei Methoden unterschieden werden, wie die Fasern mit Wasser bzw. Bindemittel vermischt werden:

3.8.1. Sprühkopf mit außenliegenden Sprühdüsen

Bei diesem System handelt es sich um den am weitesten verbreiteten Düsenkopf. Im wesentlichen werden zwei bis sechs nach innen gerichtete Flachstrahldüsen ringförmig um ein

Schlauchmundstück angeordnet und befeuchten so den Zellulosestrom von außen.

Durch den Umstand, dass der Zellulosestrom - abhängig von der Fördermenge - nicht immer vollständig durchdrungen wird, ist nur ein relativ ungleichmäßiges Sprühbild erzielbar.

Der Vorteil dieses Systems liegt allerdings darin, dass die außenliegenden Düsen eine Art Vorspritzung der Wand bzw. der bereits aufgespritzten Schichten und damit einen besseren Verbund der Fasern mit dem Untergrund sowie untereinander bewirken.



Abb. 18 6er Düse der Firma Spraying Systems



Abb. 19 4er Düse „Terminator“ der Firma Isofloc und 2er Düse

3.8.2. Sprühkopf mit innenliegender Sprühdüse

Bei diesem System werden zwei Varianten unterschieden:

Einzeldüse

Eine Kegelstrahldüse befindet sich innerhalb des Sprühkopfes im Zentrum des Zellulosestroms (zB System ICC) [32].

Dieses System konnte nicht praktisch getestet werden.

Ringdüse

Die Befeuchtung der Fasern erfolgt durch ringförmig um den Zellulosestrom angeordnete Düsen unterschiedlicher Form und Größe. Da sie sich im Inneren eines ca. 25 – 70 cm langen Mischrohres befinden, wird im Gegensatz zur Außenbefeuchtungsdüse eine Zwangsdurchmischung der Fasern mit Feuchtigkeit erreicht. Derartige Düsen werden auch in der Spritzbeton-Technik verwendet.

3.8.3. Mischkammer

Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Sprühköpfen befindet sich die Mischkammer nicht am Ende des Förderschlauches sondern ca. zwei bis drei Meter davor und besteht aus einem Hauptrohr für den Faserstrom, das von einer ringförmigen Ummantelung umgeben ist, in die ein zweites, kleineres Rohrstück einmündet. Durch dieses wird dem Faserstrom geschäumtes Bindemittel zugeführt und im restlichen Teil des Förderschlauches mit den Fasern vermischt [29].

3.9. Beurteilung des Zellulose-Sprühverfahrens

Das herkömmliche CSO-Verfahren wird aufgrund der hohen Staubentwicklung und des großen Oversprays nur in ca. 3 - 5 % der Anwendungsfälle von Zellulose-Dämmung verwendet. Zudem ist es

durch den Reinigungsaufwand etwas teurer als das „loose fill“-Verfahren und bewirkt zum Teil erhebliche Austrocknungszeiten.

Bezüglich der Verwendung von Bindemitteln im Zusammenhang mit Sprühverfahren gab und gibt es neben einer Vielzahl von vor allem US-Patentschriften im deutschsprachigen Raum vereinzelt Versuche, die aber entweder nicht dokumentiert oder zum gegenwärtigen Zeitpunkt infolge unklarer Rahmenbedingungen für die Einbindung dieser Know-How-Träger nicht zugänglich sind. International scheint dieses Thema jedenfalls sehr aktuell zu sein und intensiv beforcht zu werden.

Es hat sich allerdings auch gezeigt, dass Präsentationen neuartiger Aufspritzverfahren durch Firmen oft nicht der Realität auf der Baustelle entsprechen. In diesem Zusammenhang wirkt sich auch der Umstand negativ aus, dass in Mitteleuropa der Anwendungsfall „Aufgespritzte Zellulosedämmung“ relativ selten ist und daher Verfahren, die aus der Patentrecherche bekannt sind, unter realen Baustellenbedingungen kaum studiert werden können.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass wenn es gelingt, die Staubbelastung zB durch Bindemittelzugabe zu reduzieren, die Akzeptanz des CSO-Verfahrens bei Verarbeitern und Bauherren deutlich zu steigern wäre.

Dort wo relativ lange Austrocknungszeiten kein Problem darstellen und Dämmschichten von maximal 7 - 8 cm gewünscht werden, ergeben sich nicht zuletzt im Zuge der zunehmenden Althausmodernisierung schon jetzt vielfältige Anwendungsgebiete - zB als Beschichtung der (Keller-)Deckenunterseite oder als Akustikbeschichtung mit zusätzlicher Dämmwirkung.

3.10. WDVS mit Zellulosefasern als Dämmstoff

Grundsätzlich hat ein aufgespritztes Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) einige Vorteile gegenüber einem plattenförmigen:

Zum einen die Fugenlosigkeit der Dämmschicht, die einerseits Wärmebrücken nahezu ausschließt, andererseits auch kritische Spannungszustände in der Putzschicht durch unzulässige Verzahnung mit dem Dämmkörper – zB hervorgerufen durch in klaffende Fugen eingedrungenen Putz – vermeiden hilft. Ein weiterer Vorteil ist die Reduktion auf – im günstigsten Fall – nur mehr zwei Arbeitsschritte: aufgespritzter Dämmkörper und aufgespritzter Deckputz. Damit könnte dieses System auch wirtschaftlich konkurrenzfähig sein. Weiters können mit ein und demselben Material verschnittfrei unterschiedliche Dämmdicken hergestellt und damit die Lagerhaltung vereinfacht werden.

Der zum Ausgleich der unvermeidlichen Unebenheiten, die durch den Aufspritzvorgang entstehen, mindestens 2 cm dicke Außenputz sollte möglichst leicht sein, um keine zu großen Scherbeanspruchungen im Dämmkörper hervorzurufen. Er muß weitgehend elastisch sein, um thermische Spannungen sowie solche die aus Schwind- und Kriechverformungen entstehen, rissefrei aufzunehmen. Weiters darf der Feuchtigkeitstransport von innen nach außen nicht behindert werden.

Wichtig ist zudem ein möglichst geringer Wasseraufnahmekoeffizient um so wenig Feuchtigkeit wie möglich von außen in die Zelluloseschicht eindringen zu lassen. Von besonderem Interesse wird in diesem Zusammenhang die Frage sein, inwieweit die Zellulosedämmschicht durch Feuchtetransportmechanismen an Festigkeit verlieren könnte, bzw. ob es durch entsprechende Begrenzung der Wasseraufnahmefähigkeit der

Putzschicht möglich ist, kritische Feuchtigkeitszustände zu vermeiden.

Als Endbeschichtung kämen zum Beispiel hochwertige aber relativ teure Silikatputze in Frage. Diese zeichnen sich durch geringes Schwindmaß, hohe Elastizität, gute Witterungs- und Alterungsbeständigkeit sowie weitgehende Diffusionsoffenheit aus. Als Bindemittel wird bei diesen Putzen Kaliwasserglas eingesetzt, welches bereits 1818 von J.N. von Fuchs für Fassadenbeschichtungen verwendet wurde. Zellulosefasern dienen als Armierung, Marmorsande und Mehle als Füllstoffe [8].

4. Simulationsberechnung

4.1. Einleitung

Ziel dieses Arbeitsschrittes war die grobe Abschätzung des Feuchtehaushalts der Verbundkonstruktion Mauerwerk – Dämmung – Putz.

Da für den Anwendungsfall der außenliegenden, bindemittelverstärkten Zellulose-Dämmschichte keine gesicherten Materialkennwerte zur Verfügung stehen, wurden die hygrothermischen Simulationsberechnungen in einem ersten Schritt mit denjenigen Kennwerten durchgeführt, die aus der Literatur für gewöhnliche „loose fill“ Zellulose bekannt sind. Auch für den Bauteil „Ziegel“ sind lediglich Materialkennwerte für Vollziegel verfügbar. Da die thermische Sanierung des Wohnhaus-Altbestandes jedoch ein Anwendungsgebiet des zu entwickelnden Wärmedämm-Verbundsystems sein soll, wird dieser Umstand nicht negativ bewertet. Ebenso sind lediglich Materialkennwerte für „Standardaußenputze“ verfügbar, welche die Eigenschaften insbesondere des Leichtputzes, der als besonders geeignet für die Zellulosedämmschicht angesehen wurde, nicht berücksichtigen.

Nach Feststehen der endgültigen Putz- und Bindemittelmischungen, die das feuchtedynamische Verhalten des gesamten Verbundquerschnittes wesentlich beeinflussen können, sollen die Berechnungen mit den im Labor gewonnenen Materialkennwerten wiederholt und evaluiert werden.

4.2. Programmbeschreibung

Das Simulationsprogramm WUFI 2.2 („Wärme- und Feuchte-transport instationär“) dient zur Berechnung des eindimensionalen instationären hygrothermischen Verhaltens von mehrschichtigen Bauteilen. Bei der Berechnung des Wärmetransports werden folgende Transportmechanismen berücksichtigt:

- ≠# Wärmeleitung
- ≠# Enthalpieströme durch Dampfdiffusion mit Phasenwechsel
- ≠# kurzwellige Sonnenstrahlung
- ≠# langwellige nächtliche Abstrahlung (nur bei TRY-Wetterdaten)

Konvektiver Wärmetransport durch Luftströmungen wurde nicht mit aufgenommen, da er meist schwer zu erfassen und selten eindimensional ist. Bei der Berechnung des Dampftransports berücksichtigt WUFI 2.2 folgende Transportmechanismen:

- ≠# Dampfdiffusion
- ≠# Lösungsdiffusion

Konvektiver Dampftransport durch Luftströmungen wurde vernachlässigt.

Bei der Berechnung des Flüssigkeitstransports wurden folgende Transportmechanismen berücksichtigt:

- ≠# Kapillarleitung
- ≠# Oberflächendiffusion

Durch die Schwerkraft bedingte Sickerströmungen, hydraulische Strömungen aufgrund von Gesamtdruckunterschieden, sowie elektrokinetische und osmotische Effekte werden nicht erfasst.

Da Temperatur und relative Feuchte als treibende Potenziale gewählt wurden, ergeben sich einfache, anschauliche Speicher- und Transportkennwerte, die sich für abschätzende Berechnungen auch aus Standardkennwerten ableiten lassen.

Als Randbedingungen dienen meteorologische Daten (Temperatur, relative Luftfeuchte, Regen/Schlagregen, Strahlung) und Raumklimadaten (Temperatur, relative Luftfeuchte), wobei für diese Näherungsberechnungen die

Klimadaten des vorhandenen Beispielprojektes verwendet wurden (D-83601 Holzkirchen).

Überdies wurde für diese Berechnungen mangels verfügbarer Materialkennwerte auf die programmeigene Datenbank zurückgegriffen. Folgende Daten werden zur Berechnung mit WUFI 2.2 benötigt:

- ≠ Rohdichte [kg/m³]
- ≠ Porosität [m³/m³]
- ≠ spezifische Wärmekapazität [kJ/kgK]
- ≠ Wärmeleitfähigkeit trocken [W/mK]
- ≠ Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl trocken [-]
- ≠ Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl feuchteabhängig als Tabelle
- ≠ Feuchtespeicherfunktion [kg/m³] als Tabelle oder approximiert durch Ausgleichsfeuchtegehalt w80 und freie Sättigung wf
- ≠ Flüssigtransportkoeffizient Saugen [m²/s] als Tabelle oder generiert aus dem Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert)
- ≠ Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen [m²/s] als Tabelle oder generiert aus dem Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert)
- ≠ Wärmeleitfähigkeit feuchteabhängig [W/mK] als Tabelle oder generiert aus dem Feuchtezuschlag
- ≠ Klimadaten (als ASCII-Datei im IBP-Format oder im TRY-Format):
- ≠ Regenlast auf die Oberfläche [Ltr/m²h], in Abhängigkeit von Neigung und Orientierung des Bauteils
- ≠ kurzwellige (Sonnen-) Strahlungsflussdichte [W/m²], in Abhängigkeit von Neigung und Orientierung des Bauteils
- ≠ Temperatur der Außenluft [°C]

- ≠ relative Feuchte der Außenluft [0..1]
- ≠ Temperatur der Raumluft [°C]
- ≠ relative Feuchte der Raumluft [0..1]
- ≠ mittlerer Luftdruck [hPa] während der Berechnungsperiode
- ≠ Wärmeübergangskoeffizient [W/m²K] für die innere bzw. äußere Oberfläche
- ≠ kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl [-]
- ≠ langwellige Strahlungsemissionszahl [-] (muss oft vernachlässigt werden, da meist keine Daten über die Gegenstrahlung von Atmosphäre und Umgebung vorliegen)
- ≠ diffusionsäquivalente Luftschichtdicke der Oberflächenbeschichtung (sd-Wert) [m] für die innere bzw. äußere Oberfläche; berücksichtigt den Diffusionswiderstand dünner Oberflächenschichten wie Farbe, Tapeten etc., aber auch eigener Bauteilkomponenten wie Dampfbremsen etc.
- ≠ Regenwasserabsorptionszahl [-] berücksichtigt den Umstand, dass bei nicht waagerechten Flächen ein Teil des auftretenden Regenwassers wegspritzt und nicht mehr als Wasseraufnahme zu berücksichtigen ist
- ≠ Der Zeitschritt wurde für die Berechnungen mit einer Stunde festgesetzt. Für jeden Schritt wird nun ein Wert aus der vorzugebenden Klimadatei (*.KLI) eingelesen. Die Klimadatei kann mit Hilfe des Klimaeditors auch aus gemessenen Daten erstellt werden

Beschreibung des Modells

Da eine analytische Lösung der Transportgleichungen nicht möglich ist, wird ein numerisches Verfahren verwendet. Dazu ist eine Zerlegung des Bauteils in diskrete Gitterelemente notwendig. Bei der Diskretisierung werden die Werte der berechneten Variablen in jedem Gitterelement als räumlich konstant angenommen.

Die Elemente werden dort, wo große Temperatur- oder Feuchtgradienten zu erwarten sind, kleiner gewählt, während sie in „ruhigeren“ Regionen größer sein dürfen, um Rechenaufwand zu sparen.

Im Allgemeinen erwartet man steile Gradienten in der Nähe der Oberfläche einer Schicht, dh. an den Innen- bzw. Außenoberflächen des Bauteils wegen äußerer Klimaeinwirkungen oder an inneren Materialgrenzflächen wegen

Kondensationsvorgängen. In der Mitte einer Schicht werden dagegen geringere Variationen auftreten.

Daher werden dickere Bauteile in zwei oder mehr Teilschichten mit den gleichen Materialkennwerten, aber unterschiedlichen Expansionsfaktoren zerlegt. Auf diese Weise lässt sich eine gleichmäßige, nicht unbedingt symmetrische Expansion und darauffolgende Kontraktion der Gitterelemente erreichen.

Ausgangsklima

Grundlage für die folgenden Variationsrechnungen bildeten einerseits die Materialkennwerte in der Materialdatenbank „WUFI.dbk“ und andererseits die im Programm mitgelieferte Klimadatei. Die wichtigsten Rahmenbedingungen für das Klima (D-83601 Holzkirchen) können aus der Tabelle Anhang Seite A 13 entnommen werden.

Als Randbedingungen, die auf den Bauteil einwirken, berücksichtigt WUFI die Temperatur und relative Feuchte der Innen- und Außenluft und den Strahlungseintrag sowie die Regenlast in Abhängigkeit von Neigung und Orientierung des Bauteils. Diese Angaben können aus gemessenen Wetterdaten oder aus Testreferenzjahren abgeleitet werden. Im vorliegenden Fall wurden für das Außenklima in D-83601 Holzkirchen (30 km südl. von München) gemessene Wetterdaten verwendet und das Innenklima näherungsweise durch Sinuskurven mit jährlicher Periode beschrieben.

Die Auswertung der Klimadatei gibt einen Überblick über den Jahreslauf der Außenlufttemperatur, der

relativen Feuchte, der Strahlung und des Niederschlages (Anhang Seite A 14 und A 15).

Wandaufbau

Zur Analyse des Wärme- und Feuchteverhaltens einer mit Zellulosefasern gedämmten Wand wurden verschiedene Variationsrechnungen durchgeführt. Die Ausgangsvariante zeigt die folgende Abbildung bestehend aus:

Außenputz - Zellulosedämmung -
Vollziegel - Innenputz

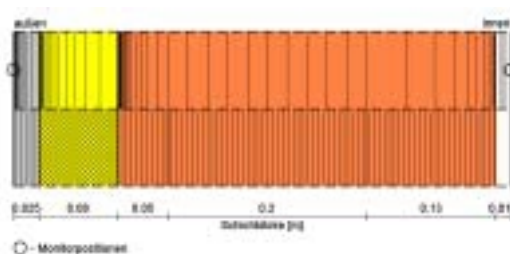


Abb. 20 Expansionsfaktoren am Beispiel der Variante 1 (38 cm Vollziegelmauerwerk mit 8 cm Zellulosedämmung)

Für die Berechnung wurde der „Ziegel“ nochmals in drei Zonen unterteilt. Die Materialkennwerte der einzelnen Baustoffe können den Seiten A 16 - A 20 entnommen werden.

Monitorpositionen

In der Ansicht „Bauteilaufbau“ wurden die Monitorpositionen durch Kreise markiert. Für die durchgeführten Rechnungen wurden die Voreinstellungen von WUFI unverändert gelassen.

Die von WUFI berechneten Verläufe umfassen standardmäßig:

☞ die Wärmeströme durch die Außen- und Innenoberfläche

☞ die über die einzelnen Materialien gemittelten Wassergehalte

☞ Temperatur und relative Feuchte an zwei frei wählbaren Monitorpositionen.

Folgende Varianten des Wandaufbaus wurden gerechnet:

Variante	Außenputz	Dämmschicht	Trägerschicht	Innenputz
01	2,5 cm Kalkzement	8 cm Zellulose	38 cm Vollziegel	1,5 cm Gips
02	2,5 cm Kalkzement	14 cm Zellulose	38 cm Vollziegel	1,5 cm Gips
(03) intern zur Evaluation	2,5 cm Kalkzement	8 cm Zellulose	38 cm Vollziegel mit Diffusions- widerstandszahl von Beton	1,5 cm Gips
04	2,5 cm Kalkzement	8 cm Zellulose	25 cm Beton	0,5 cm Gips
05	2,5 cm Kalkzement	14 cm Zellulose	25 cm Beton	0,5 cm Gips

Oberflächenübergangsbedingungen:

a) Außen:

☞ Wärmeübergangskoeffizient 17,0 W/m²K

☞ Diffusionsäquivalente
Luftschichtdicke der Oberflächen-
beschichtung – s_ed-Wert 0 m

☞ Kurzwellige Strahlungs-
absorptionszahl 0,6

☞ Langwellige Strahlungs-
absorptionszahl 0,9

☞ Regenwasserabsorptionszahl 0,7

b) Innen:

☞ Wärmeübergangskoeffizient 8,0 W/m²K

☞ Diffusionsäquivalente
Luftschichtdicke der Oberflächen-
beschichtung – s_ed-Wert 0 m

Ausgangswerte für den Wassergehalt in den Schichten (kg/m³)

☞ Außenputz 20

☞ Zellulose 12

☞ Ziegel 20

☞ Beton 20

☞ Innenputz 10

Eine gute Einschätzung der Güte der Ergebnisse erlaubt die Feuchtigkeitsbilanz. Die Ströme „a“ (ka, da), und „i“ (ki, di) geben die gesamte Wassermenge an, die während der Berechnung in den oder aus dem Bauteil fließt.

ka.....durch Kapillartransport an der Außenoberfläche

da.....durch Dampftransport an der Außenoberfläche

ki.....durch Kapillartransport an der Innenoberfläche

di.....durch Dampftransport an der Innenoberfläche

positiv.....in Richtung Innenraum (positive X-Richtung)

negativ.....in Richtung Fassade (negative X-Richtung)

Die Daten für den Anfangswert des Wassergehaltes der Materialien wurden für jede Schicht manuell eingegeben. Die weitere Berechnung erfolgte unter Einbeziehung der oa. Klimadaten aus der im Beispiel festgelegten Klimadatei.

Die Bilanz 1 [kg/m²] und die Bilanz 2 [kg/m²] geben die Änderung im Gesamtwassergehalt des Bauteils während der Berechnung und die Summe der Oberflächenströme (ka+da-ki-di) an. Diese beiden Zahlen sollten möglichst identisch sein. Rundungsfehler und Konvergenzprobleme können jedoch Abweichungen verursachen.

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht über die Ergebnisberichte der durchgeführten Rechnungen:

Variante	Regenaufnahme- fehler	Ströme a (ka, da)		Ströme i (ki, di)		Bilanz 1 (kg/m ²)	Bilanz 2 (kg/m ²)
01	0	43,46	-39,38	1,23E-7	2,51	1,58	1,58
02	0	43,70	-39,64	1,10E-7	2,65	1,43	1,43
03	0	43,77	-39,20	8,44E-8	1,28	3,32	3,29
04	0	44,61	-38,63	1,7E-10	-1,12	7,11	7,10
05	0	45,07	-38,96	-1,9E-8	-1,10	7,21	7,21

4.3. Interpretation

Grundsätzlich wurde die Vermutung bestätigt, dass es unter Verwendung herkömmlicher Außenputze an der Grenzfläche zwischen Putz und Zellulosedämmung zu einem Anstieg der Feuchtigkeit im Dämm-Material kommt. Da jedoch noch nicht alle notwendigen Materialkennwerte vorliegen, können die Ergebnisse vorerst nur bedingt als aussagekräftig bezeichnet werden.

Bemerkenswert ist bei den Varianten „1“ (38 cm Vollziegel, 8 cm Zellulose) und „2“ (38 cm Vollziegel, 14 cm Zellulose) ein sofortiger Anstieg des Wassergehalts in der Dämmschicht von 12 kg/m³ auf 15 - 22 kg/m³, der dann von Mitte Februar bis Mitte Juli annähernd konstant bleibt. Dieser Wert stimmt ziemlich gut mit den in Winterthur gemessenen Werten überein [23].

Danach kommt es zu einem, vermutlich niederschlagsbedingten leichten Anstieg des Wassergehalts bis etwa Mitte August der dann bis Mitte September wieder auf den vor dieser Regenperiode erreichten Wert absinkt. Ab Mitte September ist ein weiteres Ansteigen des

Wassergehalts auf 27 kg/m³ (Variante 2) bis 34 kg/m³ (Variante 1) festzustellen.

Da diese erhöhten Werte die Ausgangsfeuchte für das nächste Jahr darstellen, ist dieser Umstand besonders zu beachten.

Bei den Varianten „4“ und „5“ (25 cm Beton mit 8 bzw. 14 cm Dämmung) sinkt der Wassergehalt im Dämmstoff zuerst ab, um dann ab Ende März bis Mitte August kontinuierlich anzusteigen und bis Mitte September wieder auf den allen Varianten gemeinsamen Wert von etwa 15 kg/m³ abzusinken.

Danach ist bei den Varianten „4“ und „5“ wie bei den Varianten „1“ und „2“ wieder ein – im Gegensatz zu Varianten „1“ und „2“ – allerdings nur leichtes Ansteigen des Wassergehaltes auf 22 kg/m³ (Variante 4) bzw 19 kg/m³ (Variante 5) festzustellen.

Der höhere Wassergehalt der Zelluloseschicht der Varianten „1“ und „2“ ist auf den gegenüber Beton deutlich geringeren s_{e,d}-Wert des Ziegels zurückzuführen (Seite A 24).

Die verschiedenen Varianten des Wandaufbaus haben auf den Gesamtwassergehalt des

Innenputzes erwartungsgemäß nahezu keine Auswirkung (Seite A 25).

Ebenso wird der Gesamtwassergehalt des Außenputzes durch den Wandaufbau nicht beeinflusst (Seite A 23).

Insgesamt ist zu sagen, dass die vorliegenden Berechnungen derzeit nur zur groben Abschätzung des Feuchtehaushalts herangezogen werden können. Bei Simulationsprogrammen sind die Ausgangsparameter naturgemäß möglichst genau zu wählen, um Fehler durch Aufschaukeln kleiner Ungenauigkeiten zu vermeiden. Da einige dieser Materialkennwerte, insbesondere des speziellen Außenputzes aber auch der bindemittelgebundenen Zellulosedämmschicht noch nicht zur Verfügung stehen, sind Laboruntersuchungen zur Gewinnung dieser Materialkennwerte jedenfalls unabdingbar, um das hygrothermische Verhalten des zu entwickelnden Wärmedämm-Verbundsystems genauer beurteilen zu können. Mit den so ermittelten Messdaten sollen anschließend die ersten Simulationsberechnungen wiederholt und mit in der Klimakammer an einer 1:1 Versuchswand gewonnenen Messdaten evaluiert werden.

Im Zusammenhang mit dem hygrothermischen Verhalten des zu entwickelnden Verbundquerschnittes kommt aus heutiger Sicht den hygrischen Eigenschaften des Außenputzes besondere Bedeutung zu. Es ist zu vermuten, dass es bei geeigneter Einstellung des – vermutlich speziell zu entwickelten – Putzes hinsichtlich Wasseraufnahmekapazität bzw. Diffusionsverhalten gelingen wird, die Feuchtigkeitsanreicherung in der Zellulosedämmschicht zu reduzieren.

5. Bindemittel (Dr. Arnold Stuhlbacher, Michael Koinigg)

5.1. Einleitung

Bereits in der Frühgeschichte der Menschheit suchte der Mensch einen Weg, die ihm aufgebürdete Arbeit leichter und rationeller zu gestalten. Er suchte - wenn auch vielleicht unbewusst - nach Klebstoff. Denn was er auch fand, was er auch entwickelte, irgend etwas musste er immer miteinander verbinden, sei es durch einfaches Ineinanderfügen, durch Verzahnen, Nageln oder eben Kleben. Von allen Möglichkeiten schien ihm das Kleben die einfachste, schnellste und doch sicherste Methode zu sein. Die Urbevölkerung benutzte bereits Naturklebstoffe, wie Blut, Eiweiß und Baumharz. Etwa um 1500 v. Chr. nahmen die Ägypter tierische Leime für Furnierarbeiten. Zeuge davon ist eine Tafel Hautleim, die im Grab des Königs Tut-Anch-Amun - er lebte etwa um 1350 v. Chr. - gefunden wurde.

Es gibt bereits eine Reihe von Patenten die sich mit der Thematik „bindemittelverstärkte Wärmedämmung aus Zellulosefasern“ beschäftigten. Die dazu verwendeten Bindemittel sind meist synthetischen Ursprungs. Ein gutes Beispiel dafür sind die Polyvinylacetate oder auch Reaktionsharze („Zwei-Komponenten-Kleber“). Die Vorteile dieser Bindemittel liegen auf der Hand. Sie verhalten sich wie hygroskopische Stoffe und binden dadurch schneller ab. Die Dämmwände, welche nach dieser Verarbeitungsmethodik entwickelt wurden, können somit schneller weiterbehandelt werden. Der Nachteil dieser Bindemittel ist einerseits die Herstellung und andererseits die Entsorgung.

Die Umweltverträglichkeit von Zellulosedämmstoffen soll auch beim Aufspritzverfahren weiterhin erhalten bleiben. Deshalb werden im Rahmen dieses Forschungsprojektes nur solche Bindemittel hinsichtlich ihrer Eignung für aufgespritzte Zellulosedämmschichten geprüft, welche sowohl in

der Produktion als auch in der Entsorgung als umweltverträglich beurteilt werden können. Weder bei der Verarbeitung noch bei der Nutzung sollen für den Menschen gesundheitliche Probleme entstehen.

Im Folgenden wird eine Auswahl von Bindemitteln auf pflanzlicher, tierischer und mineralischer Basis hinsichtlich ihres Eigenschaftsprofils näher beschrieben.

Pflanzliche bzw. tierische Bindemittel:

- ≠# Guar Gum
- ≠# Eiweiße (Casein)
- ≠# Polysaccharide (Stärke)
- ≠# Biopolymere (Stärke, Eiweiße, PHA's)

Organische Bindemittel:

- ≠# Thermoplastische Polymere
- ≠# Lösliche Polymere

Mineralische Bindemittel:

- ≠# Wasserglas
- ≠# Zement
- ≠# Magnesiumoxid

5.2. Bindemittel biogenen Ursprungs

5.2.1. Guar-Gum

Charakteristik

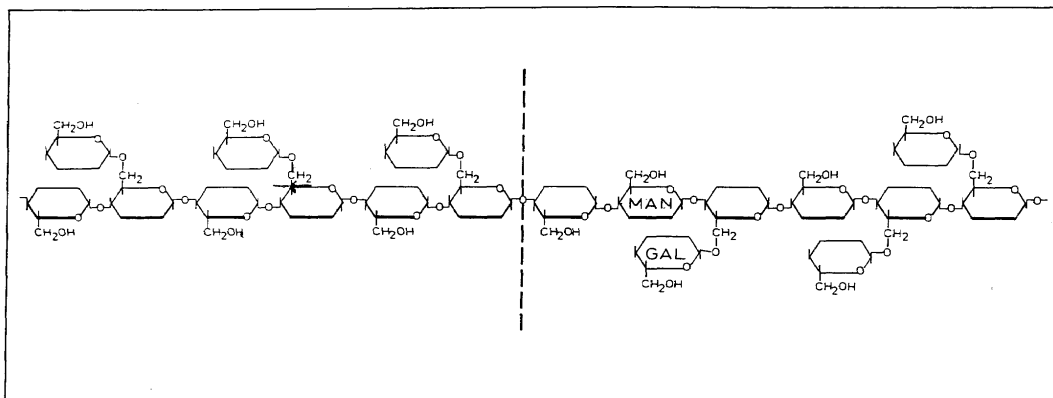


Guar-Gum ist ein natürliches Hydrokolloid. Es ist das im Endosperm des Samens gespeicherte Reserve-Polysaccharid der Guar-Pflanze

(*Cyamopsis tetragonoloba* Taub und anderer Varietäten). Die Pflanze selber ist ein Schmetterlingsblütler [33], [34].

Durch Separierung der einzelnen Samenbestandteile - Schale, Keimblätter und Endosperm - kann das letztere in gereinigter Form gewonnen werden. Die Art der physikalischen und mechanischen Vor- und Nachbehandlung bestimmt die Qualität und Feinheit der üblicherweise in Mehlforn erzeugten Handelsprodukte. Chemisch gesehen ist Guar-Gum ein Galaktomannan mit einer sehr spezifischen Konfiguration des Makromoleküls. Das „Rückgrad“ des Makromoleküls bildet eine

lange Kette aus einer η - 1,4 - glykosidisch gebundenen Mannoseeinheit, die im statistischen Durchschnitt an jeder zweiten Mannose eine ζ - 1,6 - gebundene Galaktose als eingliedrige Verzweigung trägt [35], [36]. Diese eigenartige makromolekulare Struktur, die gewissermaßen ein Mittelding darstellt zwischen einem Sphäro-Kolloid (zB Amylopektin) und einem reinen Linear-Kolloid (zB Zellulose) ist maßgebend für die spezifischen kolloidchemischen Eigenschaften und die vielfältigen technischen Anwendungsmöglichkeiten von Guar-Gum.



Guar-Derivate

Wie die meisten Polysaccharide verfügt auch Guar-Gum pro Galaktose- und Mannose-Baustein über drei bzw. zwei freie Hydroxylgruppen, die, wie auch aus der Zellulose- und Stärke-Chemie bekannt, für Veretherungs- und Veresterungsreaktionen zugänglich sind (zB Jaguar). Ebenso ist es möglich, durch enzymatische, oxydative, hydrolytische oder thermische Kettenspaltung die Länge des Makromoleküls zu verkürzen und so ua. die

Viskosität und die rheologischen Eigenschaften einer Lösung den spezifischen Anforderungen eines Verarbeitungsprozesses anzupassen. Durch zB Hydropropylierung entstehen weitere Variationsmöglichkeiten des Guar-Gums, wobei die eigenartige Grundstruktur des Makromoleküls beibehalten wird und dadurch ein ganz unterschiedliches Verhalten gegenüber anderen Polysaccharid-Derivaten oder vollsynthetischen Hydrokolloiden entsteht. Ein Beispiel wäre der „Jaguar“, der durch eine Hydroxyalkylierung, bei der Propylenoxid als Katalysator dient, hergestellt wird [37].

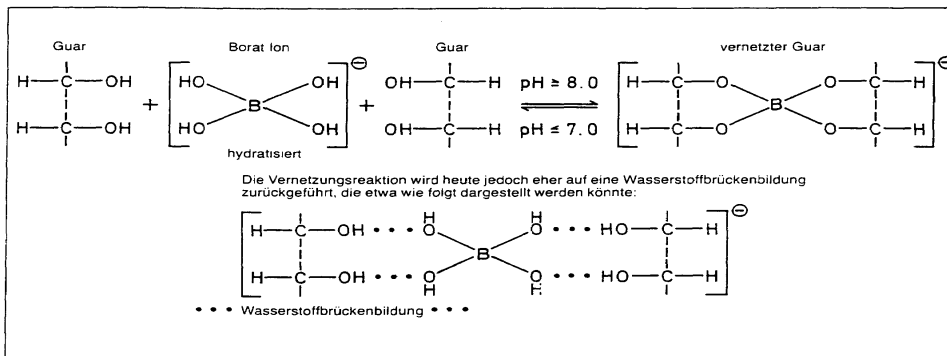
Eigenschaften

- ≠ hohe Viskosität: sehr gut wasserlöslich
- ≠ rasche Viskositätsentwicklung
- ≠ pH-Wert Verträglichkeit
- ≠ Wasserbindungsvermögen
- ≠ Elektrolytverträglichkeit (sehr gute Verträglichkeit mit ein- und zweiwertigen Ionen)
- ≠ Einfluss von Scherkräften (unter Einwirken von Scherkräften verringert sich die Viskosität und die Lösung wird somit pumpfähig)
- ≠ Wasserstoffbrückenbildung
- ≠ Komplexbildung/Gelierung (sauer und alkalisch)

Mögliche Nebenwirkungen

Die toxikologische Beurteilung in der Literatur liefert kein einheitliches Bild. Auf der einen Seite ist von einer Schädigung der Eiweißverdauung und einem allergisierenden Potenzial die Rede (Öko-Test, E-Nummern-Liste), auf der anderen Seite wurde aufgrund der Unbedenklichkeit kein MAK-Wert festgelegt. Allergische Erscheinungen, wie Magen-Darm-Erkrankungen, Bäcker-Asthma oder Kontaktekzeme, wurden jedoch beschrieben. Deshalb ist Guar-Gum für Allergiker bedenklich [38].

Borax-Effekt



Durch den Zusatz von Borax zu Guar-Gum entstehen je nach zugesetzter Menge hochviskose, fadenziehende Pasten oder weiche bis feste Gele. Die Gele können verschnitten werden und wachsen wieder zusammen. Sie kleben nicht an Glas und zeigen keine Synärese.

Zellulosefasern werden im Allgemeinen mit Boraten zur Bekämpfung des Schimmelpilzbefalls sowie zur Gewährleistung des Brandschutzes ausgestattet. Durch den Borax-Effekt wird die Klebewirkung des Guar-Gums zusätzlich verstärkt.

Einsatzmöglichkeiten

Ursprünglich wurde Guarmehl als Viehfutter, heute in wachsendem Maße als Verdickungsmittel und (Co-)Stabilisator im Nahrungsmittelbereich eingesetzt (zB in Soßen, Milchshakes oder Eiscremes). In Brot kann es das Altbackenwerden verzögern. E 412 ist allgemein und quantum satis für Lebensmittel zugelassen (EU-Richtlinie Zusatzstoffe, Anhang I).

Im Non-Food-Bereich findet Guarmehl als Verdickungsmittel im Textil- und Sprengstoff-Sektor, als Bindemittel in der Papier-Industrie, als Flockungsmittel bei der Erzgewinnung, als weit

verbreitetes Hilfsmittel bei der Erdgas- und Erdölförderung sowie in kosmetisch-pharmazeutischen Formulierungen vielfache Anwendung.

Die Guar-Derivate werden durch partielle Veresterung oder Veretherung der Hydroxy-Gruppen des Guarans hergestellt. Technische Bedeutung haben die Guarether, insbesondere die Carboxymethyl- und Hydroxyalkyl-Derivate sowie kationisch modifizierte Produkte, die bei der Umsetzung von Guar-Mehl mit Monochloressigsäure (!), Ethylen- oder Propylenoxid und 2,3-Epoxypropyltrimethylammoniumchlorid in Gegenwart von Alkali anfallen. Die Guarether zeichnen sich durch schnellere Löslichkeit, erhöhte Transparenz der viskosen Lösung und verbesserte Salzverträglichkeit aus. Die Verwendung der Guar-Derivate ist - mit Ausnahme des Einsatzes für Nahrungsmittel und Pharmazeutika - ähnlich wie die von Guar-Mehl.

Wirtschaftliche Bedeutung

Der Weltjahresverbrauch von Guarmehl betrug 1995 ca. 125.000 t. Von 1988 - 1995 stieg die Nachfrage um 3,2 % [39].

5.2.2. Stärke

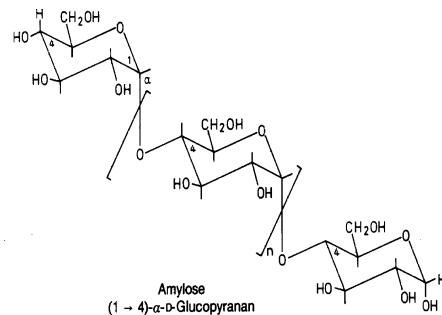
Charakteristik

Die Stärke ist ein Polysaccharid mit der Summenformel $(C_6H_{10}O_5)_n$ und wird als Assimilationsprodukt der grünen Pflanzenzellen gewonnen. Unter Assimilation versteht man die Überführung des Kohlendioxids der Luft in Stärke unter katalytischer Mithilfe des grünen Pflanzenfarbstoffs Chlorophyll und gleichzeitiger Einwirkung des Sonnenlichts (Photosynthese). Bei diesem Vorgang gibt die Pflanze molekularen Sauerstoff ab und es entstehen dadurch über 100 Milliarden Tonnen Kohlenhydrate jährlich auf der Erde.

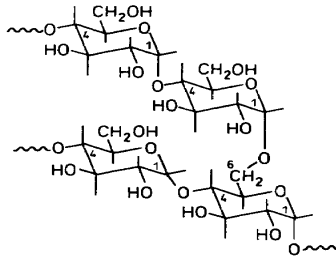
Die biochemisch erzeugte Stärke lagert sich in Form von kleinen, weißen Stärkekörnern, die eine konzentrische Schichtung aufweisen, in den Chloroplasten ab. Da die Pflanzenmembranen für Kolloide undurchlässig sind, ist ein direkter Transport nicht möglich. Die Pflanze hat allerdings die Fähigkeit, die durch Assimilation entstandene Stärke enzymatisch über Maltose zu Glucose abzubauen. Die Glucose kann in der Pflanze wandern und in bestimmten Depots, vor allem in den Wurzelknollen (Kartoffel) und Samen (Getreidekörnern), wieder zur Reservestärke aufgebaut werden.

Die Stärkekörner bestehen aus Amylopektin (80 %) als Hüllsubstanz und Amylose (20 %). Beide Polysaccharide unterscheiden sich in ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften.

Amylose bildet überwiegend unverzweigte Ketten von Glucosemolekülen die ζ (1,4)-glucosidisch miteinander verknüpft sind: (ζ -1,4-Glucan):



Amylopektin, der Hauptbestandteil der Stärke, besteht – wie die Amylose – aus D-Glucose-Einheiten, welche jedoch buschartig verzweigten, kürzeren Ketten angeordnet sind [40].



Ausschnitt aus den verzweigten Amylopektinketten

Vorkommen

Stärke entsteht als Assimilationsprodukt in den grünen Pflanzenteilen (Chloroplasten) durch enzymatisch gesteuerte Polytransglucosidierung aus der bei der Photosynthese gebildeten D-Glucose unter Wasserabspaltung durch spezifische Enzyme. Für den Bau- oder Energiestoffwechsel der Pflanze sowie zum Speichern in Samen, Knollen, Früchten usw. wird Stärke dann durch Phosphorylasen zu ζ -D-Glucose-1-Phosphat abgebaut, zu den anderen Pflanzenteilen transportiert und dort entweder in Glucose-6-Phosphat umgelagert und verbraucht oder in Stärkekörner (Amylose) zurückverwandelt und gespeichert.

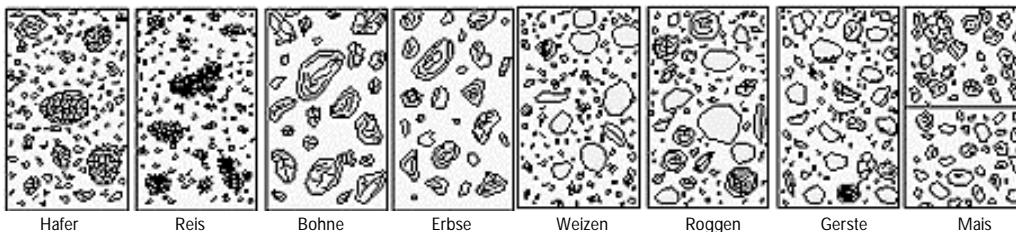
Sie findet sich in den verschiedensten Geweben und Organen der Pflanze, und zwar in mikroskopischen Körnchen in Pflanzenzellen eingelagert. Die Körnchen sind nach Größe (0,5 bis

200 μm) und Form sehr verschieden; sie sind kugelförmig, oval, meist aus zahlreichen, um einen Kern gruppierten Schichten aufgebaut. Besonders reich an Stärke sind Kartoffeln, Bananen, Getreidekörner, Tapioka, die Stämme der Sagopalme, Bohnen und Erbsen.

Die Stärke wird von Pflanzen oft in beträchtlichen Mengen in Form von Stärke-Körnern gespeichert. Der Gehalt an Stärke ist sehr unterschiedlich (Angaben in %-Frischgewichtes des pflanzlichen Speicherorgans):

#	Reis	(70 - 75 %)
#	Mais	(60 - 70 %)
#	Weizen	(50 - 70 %)
#	Maniok (Tapioka)	(20 - 30 %)
#	Kartoffeln	(12 - 20 %)

Die Getreidestärke befindet sich zusammen mit dem Kleber in den Zellen des Mehlkörpers eingeschlossen. Bisweilen läßt sich die Herkunft der Stärke-Körner aus ihrer Gestalt und Größe unter dem Mikroskop erkennen. Die kleinsten Stärkekörner sind nur 1 - 2 μm groß (Kornrade), die größten erreichen einen Durchmesser von nahezu 200 μm und sind mit dem bloßen Auge als kleine, weiße Pünktchen zu erkennen, zB bei der Kartoffel (20 - 180 μm) [33].



Stärkekörner von verschiedenen Pflanzen

Gewinnung

Als Rohprodukte dienen meist Kartoffeln, Getreide, Mais und Reis. Das feinzermahlene Getreidemehl ist fast reine Stärke, aus der die eiweißreichen Kleberstoffe durch Schlämmen von den schwereren Stärkekörnern abgetrennt werden. Bei Kartoffeln werden die Zellwände durch Zerreiben aufgerissen und die Stärkekörnchen herausgewaschen. Nach Abtrennen der groben Zellbestandteile durch ein Sieb setzen sich die Stärkekörner aus der milchigen Suspension ab. Sie werden bei 25 bis 30 °C getrocknet und ergeben beim Zermahlen das Stärkemehl.

Eigenschaften

Stärke ist ein weißes, hygroskopisches Pulver, das sich in kaltem Wasser schwer löst. Beim Erhitzen mit Wasser auf etwa 90 °C bildet sich der Stärkekleister, dessen gelatinöse Beschaffenheit vom Aufquellen des Amylopektins herrührt. Wird die Hydrolyse der Stärke vorzeitig unterbrochen, so erhält man ein schwer trennbares Gemisch von Bruchstücken der Polysaccharidketten, die Dextrine, die ua. als Klebstoff und Appreturmittel verwendet werden.

Durch die Tatsache, dass Stärkekleister in heißem Medium gelöst werden sollten, wird die Anwendungsfreundlichkeit bzw. „Baustelleneignung“ dieses Bindemittels im Bereich des Aufspritzens von Dämmschichten kritisch bewertet.

Wirtschaftliche Bedeutung

Weltweit wurden 1990 ca. 8 Mio. t Stärke gewonnen, wobei zwei Drittel auf Mais entfielen.

In Deutschland wurden 1990 etwa 700.000 t Stärke hergestellt. Diese teilen ihre Herkunft zu 77 % auf Mais, 16 % auf Kartoffeln, 6 % auf Weizen und 0,7 % auf Reis. Heute hat die Stärke große Bedeutung als nachwachsender Rohstoff in der

Biotechnologie, zB bei der Herstellung von Hefe, Glucose, Isomerase, Sorbit, Ethanol usw., von Polyurethanen und Kunststoffen mit besonderen Eigenschaften (zB wasserlöslich, transparent, verdaubar) ebenso wie von biologisch leicht abbaubaren Tensiden (sog. Zuckertenside). Die Stärke und ihre Derivate sind interessante Rohstoffe für die Produktion biologisch abbaubarer Kunststoffe und Werkstoffe. Die Verfahren zur Stärkegewinnung aus den verschiedenen pflanzlichen Rohstoffen weisen durchwegs Industriereife auf. Die vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten auf lebensmitteltechnologischen und technischen Gebieten führten zur Entwicklung immer neuer Stärkeprodukte, die je nach pflanzlicher Herkunft und Umwandlungsmethode stark differierende Eigenschaften aufweisen.

Die Produkte zielen jedoch vorwiegend in wenige Anwendungsbereiche, wobei die Wichtigsten, gemessen an der Zahl der Akteure, folgendermaßen zusammengefaßt werden können [60], [41].

- ## Verpackungswesen
- ## Dämm-Material
- ## Baustoffe
- ## Öle, Schmierstoffe
- ## Ersatz klassischer (thermoplastischer) Kunststoffe
- ## Textilien
- ## Farben, Lacke

5.2.3. Modifizierte Stärke

Thermoplastische Stärke

Eine plastische Extrusion von wasserhaltiger Stärke ist bis kurz vor der Zersetzung möglich (200 °C hoher Druck). Dabei wird die Kornstruktur zerstört (Plöastifizierung). Im einfachsten Fall wird mit 5 bis 30 % Wasser modifizierte Kartoffel- oder Maisstärke verwendet, die auf den üblichen Kunststoffverarbeitungsmaschinen verarbeitet werden kann Firmen: (Farmfill Huber Loick VNR

GmbH, 1997 und Bioplast™ GF 103/51 <http://www.Biotec.de>). Diese Produkte sind antistatisch, frei fließend, schüttfähig und dosierbar. Durch eine spezielle Fahrweise kann ein Aufschäumen erzielt werden (Verpackungschips).

Stärke in Blends mit anderen Polymeren

A-Klasse: Stärke + Copolymer des Vinylalkohols: wasserunlöslich, bioabbaubar, nicht kompostierbar

Z-Klasse: Stärke + aliphatischer Polyester: wasserunlöslich, kompostierbar,

V-Klasse > 85 % Stärke: wasserlöslich, kompostierbar,

Y-Klasse: Stärke und Cellulosederivate (CMC): wasserunlöslich, kompostierbar.

Erzeugt werden diese Produkte von Montedison Deutschland GmbH, 1997. Die Eigenschaften sind ähnlich denen von PE (auf wässriger Basis verklebbar und thermisch kaschierbar)

Modifizierte Stärken finden schon heute Anwendung als Formteile in Dämmstoffen (Cellulose, Mineralfaser). DIN-geprüfte Produkte, die mit Hilfe von natürlichen Bitterstoffen (Tanninen) auch gegen Schädlingsbefall ausgerüstet sind, werden inzwischen von verschiedenen Firmen kommerziell hergestellt (FNR, 1996 und C.A.R.M.E.N. 1996).

In der Papier- und Pappeindustrie, im Textilbereich und für biotechnologische Zwecke (Fermentation) wird Stärke ebenfalls genutzt. So ist die Stärke auch ein preisgünstiger Schutzkolloid bei der Stabilisierung von Polymerdispersionen, die in der Herstellung und Veredelung von Papier und Klebstoffen eingesetzt werden. Der ökologische Vorteil besteht darin, dass Stärke oft zur Herstellung von Biopols und in der Papierindustrie, ihren Einsatz findet. Der biologische Abbau der Stärke erfolgt demnach durch Enzyme [42].

5.2.4. Casein

Charakteristik

Casein ist ein konjugiertes Protein (früher Proteide genannt). Es gehört zur großen Gruppe der Phosphorproteine und ist somit der wichtigste Vertreter. Casein beinhaltet außer dem Eiweißanteil noch eine kovalent gebundene, nichtproteinogene, sog. prosthetische Gruppe. Hierzu zählen zB Phosphorsäure, Farbstoffe, Kohlenhydrate oder Lipide, die mit dem Protein über eine Carboxyl- oder eine andere saure Gruppe verbunden sind. Im Falle des Caseins ist es die Phosphorsäure, welche esterartig an eine freie OH-Gruppe gebunden ist.

Vorkommen

Das Protein ist in der Milch als lösliches Calciumsalz enthalten.

Gewinnung

Es wird aus der Molke von Kuhmilch nach Ansäuern durch Ausfällen als weißes Pulver gewonnen. Das Casein dient einerseits als Bindemittelbestandteil, da durch Alkalien aufgeschlossener Casein-Leim nach der Trocknung eine hornartige, relativ wasserfeste Schicht bildet, andererseits ist es ein effektiver Emulgator, der die Verbindung zwischen Harzöl-Phase und wässriger Phase in wasserverdünnbaren Bindemitteln (zB Casein-Dispersionsfarbe) herstellt [33].

Technische Einsatzmöglichkeiten

Technisches Säure-Casein ist in kaltem Wasser sehr schwer löslich. Um eine bessere Löslichkeit zu erhalten, mengt man etwas Natronlauge hinzu und beheizt das Medium auf ca. 50 °C. Bei Temperaturen über 50 °C könnte eine Denaturierung des Proteins erfolgen. Der so gebildete Kleister eignet sich sehr gut als Ausgangsstoff für Klebstoffe. Wobei natürlich die eingesetzte Menge eine große Rolle spielt. In

Verbindung mit Borax und Wasserglas gibt es auch schon technische Anwendungsmöglichkeiten wie zB als Bindemittel für die Holzindustrie [43].

Durch die Tatsache, dass säuretechnisch hergestelltes Casein-Pulver in warmem Medium gelöst werden sollte, wird die

Anwendungsfreundlichkeit bzw.

„Baustelleneignung“ dieses Bindemittels im Bereich des Aufspritzens von Dämmschichten kritisch bewertet.

5.2.5. Casein-Kunststoffe

Casein-Kunststoffe werden aus Casein hergestellt.

Diese Kunststoffe sind im Allgemeinen schlechter biologisch abbaubar als die polysaccharidischen Verbindungen. Dies ist auf die stärker ausgeprägten Wasserstoffbrückenbindungen sowie vorhandene oder gezielt herbeigeführte Vernetzungen zwischen den Protinketten zurückzuführen. Bei Hydrolyse von ζ -Casein ($M = 24800\text{-}27600\text{ g/mol}$) entstehen Aminosäuren zB: 8,4 % Asparagin; 3,1 % Alanin; 6,1 % Tyrosin [44].

Kunststoffe werden durch Einwirkung von Formaldehyd auf plastifiziertes Casein erhalten. Dabei erfolgt die Härtung durch Vernetzung zweier benachbarter Proteinketten an Amid-Stickstoff-Atomen über CH_2 -Brücken und unter Wasseraustritt. Der Prozess dauert mehrere Wochen (Trocknung) und ist deswegen unrentabel. Verwendung: Als Galalith wurden Casein-Kunststoffe seit 1897 für Knöpfe und Messergriffe verwendet.

Eiweißfasern sind Chemiefasern aus regenerierten pflanzlichen Proteinen (Ardein aus Erdnüssen, Zein aus Mais, Casein aus Milch). Sie werden mittels aufeinanderfolgender Prozesse hergestellt: Auflösen der Eiweiße in Alkalien, Filtration, Reinigung, Verpressung über Düsen in ein Säurebad, Verstrecken und Härtung mit Formaldehyd oder Aluminiumsulfat. Die Fasern sind bleich- und

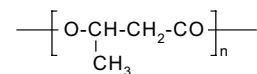
färbbar, jedoch empfindlich gegen organische Lösungsmittel und heißes Wasser [42].

5.2.6. Polyhydroxyalkanoate PHA

Charakteristik

Unter Biopolymeren versteht man auch bakteriell erzeugte aliphatische Homo- oder Copolymere von Hydroxycarbonsäuren (hauptsächlich Hydroxybuttersäure (HB) und Hydroxyvaleriansäure (HV)), die zB im Bakterium *Alcaligenes eutrophus* als Reservestoff gebildet werden. Allgemein werden Polyhydroxyfettsäuren von mehreren Gattungen an Mikroorganismen mit mehr als 100 Arten produziert. Diese so erzeugten Polymere enthalten neben Wasser auch noch geringe Anteile an Proteinen und Lipiden. Bereits 1927 wurden diese Polymere aus *Bacillus megaterium* isoliert [45], [42].

Summenformel:



Wichtige Vertreter der Polyhydroxyalkanoate (PHA) sind:

- ## Polyhydroxyfettsäuren (PHF)
- ## Monopolymere (zB Poly-3-hydroxybutyrat [3-PHB])
- ## Mischpolymere (aus zwei verschiedenen monomeren Bausteinen mit einem Copolymer (zB 3-PHB-Co-3-PHV [PHV = Poly-3-hydroxyvalerat])
- ## Terpolymere (Diese bestehen aus drei verschiedenen monomeren Bausteinen [P(3HB-Co-4HB-Co-3HV)] [46].

Gewinnung

Gewonnen werden die Biopolymere durch Fermentation. Dieser Prozess läuft in Reaktoren bis zu 200 m^3 Volumen ab, wobei pro Liter Flüssigkeit eine Zelldichte um 100 g Trockenmasse (optimal) erreicht wird. Dabei können bis zu 96% der

Trockenmasse aus Polyhydroxybutyrat bestehen. Die Bakterien können nur unter Mangelbedingungen an Stickstoff, Sauerstoff und Spurenelementen (Schwefel) den Speicherstoff PHB bilden [47]. Der Ansatz erfolgt meistens in einer Glucose-Salz-Mischung. Auch andere C-Quellen können genutzt werden. Wie zum Beispiel, Melasse aus landwirtschaftlichen Nebenprodukten, Raffinate aus der Verarbeitung von Zuckerrüben und Getreide oder auch Lactose aus der Molke. Wichtig ist nur, dass die Stoffe reich an Kohlenhydrat sind.

Copolymere (zB mit Hydroxyvaleriansäure) werden nach Zugabe der entsprechenden Carbonsäuren gebildet. Der gesamte Fermentationsprozess dauert 100 – 120 h (ohne die Trenn- und Reinigungsschritte). Die Abtrennung der Biopolymere erfolgt durch organische Lösungsmittel (Propylencarbonat bei 120 °C oder 1,2-Dichlorethan, Chloroform oder durch enzymatische Auflösung der Bakterienzellwände in einem wässrigem Milieu. Das letztere Verfahren wird bei der Herstellung von Biopol™ (Poly(3-hydroxybutyrat)-Co-(3-hydroxyalkanoate) angewandt. Die Kosten liegen etwa bei 20 DM/kg. Inzwischen wurde die Produktion von Monsanto eingestellt [48].

Eigenschaften

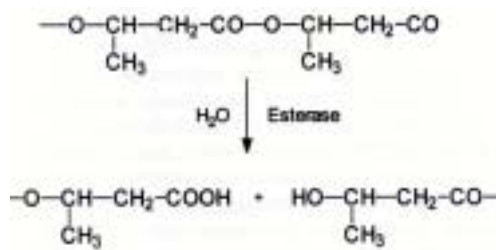
In den mechanischen Eigenschaften sind die Polyhydroxyalkanoate vergleichbar mit Polyolefinen. Die Grenzeigenschaften entsprechen etwa denen von Polyethylen. Sie bleiben beständig in Wasser und Öl, aber hydrolysieren in bestimmten Basen oder Säuren relativ schnell. Die Schmelzpunkte sind abhängig von der Zusammensetzung (abnehmende Kristallinität und damit zunehmende Flexibilität mit zunehmendem Gehalt an Hydroxyvaleriansäure).

Vergleich der Eigenschaften von PP und PHB [42]:

Parameter	PP	PHB
Schmelzpunkt (°C)	160-168	136-162
Glasübergangstemperatur (°C)	-15	5-10
Kristallinität (%)	65-70	65-80
Dichte (g/cm ³)	0,905-0,94	1,23-1,25
M (x 10 ⁵ g/mol)	2,2-7	1-8
E-Modul (GPa)	1,7	3,5-4
Zugfestigkeit (MPa)	25-35	20-31
Bruchdehnung (%)	400-900	8-42
UV-Beständigkeit	Schlecht	Gut
Lösungsmittelbeständigkeit	Gut	Schlecht
Sauerstoffpermeabilität (m ³ /m ² ·atm·d)	1700	45
Bioabbau	-	+

Biologischer Abbau

In Abwassersystemen tritt ein Gewichtsverlust von 90 % innerhalb von 12 Wochen oder in Klärschlamm ein Gewichtsverlust von 83 – 96 % in 16 Tagen ein. Unter Kompostierbedingungen werden selbst 2 mm dicke Formteile in 10 – 18 Wochen abgebaut. Im Routinebetrieb von Kompostieranlagen wird eine Schichtdicke von weniger als 0,7 mm empfohlen. Der Abbau erfolgt durch Poly(3-hydroxybutyratdepolymerase) in die entsprechenden Säuren. In Kompostmieten, wo noch zusätzlich Polysaccharide zugeführt werden, ist eine Beschleunigung des Abbaus festzustellen. Hydrolytischer und enzymatischer Abbau von PHB [49].



Weitere Untersuchungen auf organische Schadstoffe gaben keinen Hinweis auf

problematische Gehalte an Xenobiotika. Einzig die Produkte aus Biopol™ haben teilweise etwas zu hohe Borgehalte, sind aber dennoch als kompostierbar einzustufen.

Die Verarbeitung ist mit den herkömmlichen Spritzgusstechnologien ohne weiteres möglich. Es muss nur sichergestellt sein, dass das Temperaturniveau fein regelbar bleibt, da die Polymere sehr empfindlich reagieren. Der Zersetzungsbereich liegt zwischen 170 - 180 °C.

Technische Einsatzmöglichkeiten sowie wirtschaftliche Bedeutung

Die erste Verwendung eines Biopol™ Produktes fand als Haarshampooverpackung seine Anwendung. („Samara“, Wella AG, 1990) [50]. Der Preis dieses Produktes lag bei 1 DM/Flasche über dem des in PET-Flaschen abgepackten Produktes. Dieses Produkt konnte sich allerdings am Markt nicht durchsetzen, da es noch keine konkreten Kompostierungsmöglichkeiten gab. Weitere Anwendungen finden sich im medizinischen Bereichen oder als Verbundmaterial (Pappe mit PHB-Beschichtungen für Nahrungsmittelkarton, Schale, Trinkbecher). In Japan ist es seit 1991 für den Verkauf zugelassen. Da das Produkt selber bioabbaubar ist, ergeben sich dennoch einige Probleme in Bezug auf die Entsorgung. Wird das Produkt auf eine Mülldeponie aufgebracht, so wäre das Verhalten vergleichbar mit anderen organischen Abfällen, wobei allerdings unkontrollierte Emissionen möglich sind. Aus diesem Grund wird von verschiedenen Seiten eine thermische Vorbehandlung angestrebt.

Das größte Manko dieser Biopole ist mit Sicherheit die fehlende Konkurrenzfähigkeit verglichen mit petrochemischen Produkten, auf Grund der hohen Preise der Kohlenstoffquellen, welche den Mikroorganismen zur Bildung der Speicherstoffe zur Verfügung gestellt werden muss. Es gibt derzeit die verschiedensten Anstrengungen zur

Reduzierung der Produktionskosten mittels gentechnischer Manipulation anspruchsloser Bakterien (zB: Escherichia coli). Damit könnten weitere preiswertere C-Quellen genutzt und maßgeschneiderte Polyhydroxyalkonate (Copolymere verschiedener Hydroxycarbonsäuren) erhalten werden. Unter optimalen Bedingungen (Fermentation mit optimalen Bakterienstämmen, Prozessbedingungen, Produktionsbedingungen und minimalem Substrat-, Energie- und Personalaufwand) wird dann mit einem Preis von 3,23 DM/kg gerechnet [42]. Ein aktuelles Forschungsgebiet der Arbeitsgruppe Prof. Braunnegg an TU-Graz beschäftigt sich gerade mit der Thematik: Adaption billiger Kohlenstoffquellen aus Abfallstoffen zB der Molke [47].

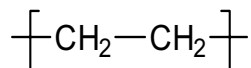
Andere Forschungsversuche mit Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*) ergaben PHB-Gehalte von 14 bis 20 % der pflanzlichen Trockenmasse. Obwohl diese Thematik international durch zahlreiche Forschungsgruppen bearbeitet wird, muss sicherlich noch mit einem Zeitraum von 10 Jahren bis zum Anbau von PHF-akkumulierenden Pflanzen gerechnet werden. Nach bisherigen Einschätzungen kann angenommen werden, dass bei einer Herstellung aus transgenem Raps Preise von 1 DM/kg realisiert werden können [51],[52].

5.3. Bindemittel auf petrochemischer Basis (thermoplastische Polymere)

5.3.1. Polyethylen PE

Charakteristik

Die Polymerisation der Monoolefine führt in Abhängigkeit von den jeweils eingesetzten Katalysatoren und dem damit verbundenen Polymerisationsgrad zu öligen oder festen Polymerisaten zB Polyethylen

Summenformel:

Polyethylene werden durch Polymerisation von Ethylen nach zwei grundsätzlich unterschiedlichen Methoden, dem Hochdruck- und dem Niederdruck-Verfahren hergestellt. Die resultierenden Produkte werden entsprechend häufig als Hochdruck-Polyethylen bzw. Niederdruck-Polyethylen bezeichnet. Sie unterscheiden sich hauptsächlich hinsichtlich ihres Verzweigungsgrades, ihres Kristallinitätsgrades und ihrer Dichte. Beide Verfahren können als Lösungspolymerisation, Emulsionspolymerisation oder Gasphasenpolymerisation durchgeführt werden.

Herstellung

Die Polymerisation des Ethylens kann nach dem ionischen, radikalischen oder koordinativen Mechanismus verlaufen. Als Lös- und Verdickungsmittel werden meist aliphatische, cycloaliphatische oder aromatische Kohlenwasserstoffe benutzt.

- a) In Gegenwart von *Lewis*-Säuren (AlCl_3 , BF_3) lässt sich Ethylen in einem Lösungsmittel bei 30 - 50 bar kationisch in niedermolekulare Polymere (relative Molekülmasse 400) überführen. Das so erhaltene Polymer hat hoch viskose Eigenschaften (niedriger Erstarrungspunkt) und wird deshalb sehr oft als Schmieröl verwendet.
- b) Hochdruckverfahren der ICI (Imperial Chemical Industries)
Die Radikalkettenpolymerisation von Ethylen zu hochmolekularen Produkten gelingt durch Anwendung sehr hoher Drucke (1000 - 2000 bar) bei etwa 200 °C unter genauer

Dosierung des als Initiator wirksamen Sauerstoffs (0,05 - 0,1 %). Der Prozess verläuft kontinuierlich mit über 10 - 15 % Ausbeute bei einem Durchgang. Das flüssige PE wird auf Normaldruck entspannt und das aus der Schmelze erstarrte Produkt granuliert.

Hochdruckpolyethylen besteht aus langkettigen, verzweigten Alkanen mit einer relativen Molekülmasse von über 10 000. Die Eigenschaften sind hohe Elastizität und Biegsamkeit. (Smp 115 °C). Wegen seiner geringen Dichte wird es als LDPE (Low Density Polyethylen) genannt. (Produkte: Hostalen(Hoechst); Lupolen (BASF); Alkathen (ICI); Baylon (Bayer). Verwendung: Folien, Filme, elektrische Geräte, Kabel, Armaturen, Zahnräder, Haushaltsgeräte, Maschinenteile)

- c) Führt man die Polymerisation von Ethylen in Methanol als LM mit Dibenzoyperoxid als Initiator bei 110 - 120 °C und 200 - 300 bar durch, so entstehen *Polymere vom Wachstum* (Lupolen N) mit relativen Molekülmassen von 2000 - 3000 g/mol.
- d) Mitteldruckverfahren (Phillips-Petroleum Comp.)
Bei diesem Prozess wird Ethylen bei 150 - 180 °C und 35 bar in einem Lösungsmittel, zB einer Xylolfraktion, am Chrom(VI)-oxid/ Aluminiumsilikat-Kontakt polymerisiert. Es entsteht ein fast vollständig linear gebautes, kristallines Polyethylen (Marlex) von der relativen Molekülmasse 5000 - 20000 g/mol.
- e) Mühlheimer Normaldruckverfahren (Ziegler-Verfahren)
1955 gelang K. Ziegler [53] die Polymerisation von Thylen bei Normaldruck und niedrigen Temperaturen (70 °C) in Gegenwart metallorganischer Mischkatalysatoren, zB einer Triethylaluminium-Titan(IV)-chlorid-Kombination zB Isododecan. Das so gewonnene kristalline PE besteht aus bis zu 80 % unverzweigten Paraffinketten, deren

relative Molekülmasse zwischen 10000 und 6 Millionen g/mol variieren kann.

Technisch von Bedeutung sind die Polymerisate mit relativen Molekülmassen von 50000 - 100000 g/mol. Dieser Thermoplast übertrifft in seiner Dichte deutlich das LDPE und heißt daher auch HDPE (High Density Polyethylene). Er eignet sich wegen der erhöhten Steifigkeit des Materials besonders gut für Spritzgussverfahren sowie für pharmazeutische Technologien (Vaseline; Platiabase), Haushaltsgegenstände, Rohre [54].

Geschichte

Die Hochdruckpolymerisation des Ethylens wurde 1933 bei Imperial Chemical Industries (ICI) in England entdeckt. Die großtechnische Produktion der Polyethylen begann im Jahre 1939. Das Verfahren lieferte teilkristallines Polyethylen niederer Dichte (LDPE). Später gelang es Fischer im Werk Ludwigshafen der I.G. Farben, Ethylen in Anwesenheit von Aluminium-Pulver und Titanetrachlorid bei niedrigen Drücken zu polymerisieren. Diese Entdeckung wurde nicht zu einem großtechnischen Verfahren weiterentwickelt. 1953 reichten unabhängig voneinander die Phillips Petroleum Co, die Standard Oil of Indiana und Karl Ziegler Patentanmeldungen der nach ihnen benannten Verfahren der Niederdruckpolymerisation ein, die lineares, hochkristallines PE höherer Dichte (HDPE) liefern. Karl Ziegler und Natta erhielten für ihre PE-Forschungen 1963 den Chemie-Nobelpreis. 1968 brachte Phillips lineares, kristallines Polyethylen niederer Dichte (LDPE) auf den Markt, die durch Niederdruckcopolymerisation von Ethylen und einem ζ -Olefin mit Träger-fixierten Chromkatalysatoren hergestellt wurde. Ein natürlich vorkommendes hochverzweigtes Polyethylen ist das bituminöse Elaterit.

Eigenschaften

Die chemisch-physikalischen Eigenschaften der Polyethylene werden durch ihren Charakter als partiell kristalline Kohlenwasserstoff bestimmt. Polyethylene sind bis zu 60 °C in allen üblichen Lösungsmitteln unlöslich. Aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe und deren Halogen-Derivate bewirken erhebliche Quellung. Dagegen bewirken polare Flüssigkeiten wie Alkohole, Ester und Ketone bei Zimmertemperatur kaum eine Quellung. Gegen Wasser, Laugen und Salz-Lösungen sowie anorganischen Säuren, mit Ausnahme der stark oxidierenden, verhalten sich Polyethylene völlig indifferent.

Polyethylene haben eine sehr geringe Wasserdampfdurchlässigkeit. Die Diffusion von Gasen sowie von Aromastoffen und etherischen Substanzen durch Polyethylen ist relativ hoch. Die mechanischen Eigenschaften sind stark abhängig von Molekülgröße und -struktur der Polyethylene. Kristallinität und Dichte von Polyethylen steigen mit abnehmendem Verzweigungsgrad und mit Verkürzung der Seitenketten an. Mit der Dichte steigen Schubmodul, Härte, Streckgrenze und Schmelzbereich. Dagegen nehmen Schockfestigkeit, Transparenz, Quellbarkeit und Löslichkeit ab. Bei gleicher Dichte nehmen mit steigender Molmasse der Polyethylene Reißfestigkeit, Dehnung, Schockfestigkeit, Schlagzähigkeit und Dauerstandfestigkeit zu. Je nach Arbeitsweise bei der Polymerisation kann man Produkte mit paraffinwachsähnlichen Eigenschaften (Molekulargewicht um 2000 g/mol) und Produkte mit höchster Zähigkeit (Molekulargewicht über 1 000 000 g/mol) erhalten [33].

Verwendung

Die Verarbeitung der Polyethylen-Typen kann nach allen für Thermoplaste üblichen Methoden erfolgen. Die Polyethylene lassen sich leicht spannen und gut schweißen; Festverklebungen sind

allerdings ohne Vorbehandlung nicht möglich. PE-Abfälle lassen sich ohne Umweltbelastung verbrennen. Polyethylen gilt als gesundheitlich unbedenklich. Eine Oberflächenvernetzung von PE, wie sie zB durch das CASING-Verfahren oder durch Bestrahlung erreicht wird, macht die Oberfläche haftfähig für Druckfarben oder Klebstoffe. Andererseits führt längere Bestrahlung besonders bei erhöhten Temperaturen, zum Abbau von Polyethylen.

Wirtschaftliche Bedeutung

Marktdaten: Der Polyethylen-Verbrauch in Westeuropa, Japan und den USA erreichte 1990 ein Volumen von ca. 19 Mio. t (siehe Tab.) [33].

Polyethylen-Verbrauch 1990 in wichtigen Industrieregionen

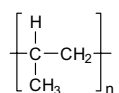
Region	Verbrauch (1000 t)		
	HDPE	LDPE *	total
Westeuropa	2937	5245	8182
Japan	1113	1672	2785
USA	3356	4414	7770
Total	7406	11331	18737

* einschließlich LLDPE

5.3.2. Polypropylene PP

Charakteristik

Thermoplastisches Polymer mit der allgemeinen Summenformel:

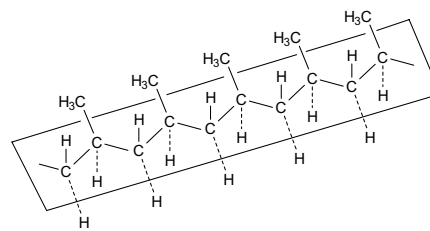


Herstellung

Propen wird in großer Menge aus den Crackgasen mit Hilfe der Druckdestillation gewonnen. Es kann nur durch koordinative Kettenpolymerisation zu *Polypropylen (PP)* verknüpft werden.

a) Stereoreguläre Polymerisation[55]

Im Jahr 1956 konnte Natta die stereoreguläre Polymerisation unsymmetrischer Monoolefine, wie Propen, Vinylether und Styrol, in Gegenwart modifizierter Ziegler-Katalysatoren, zB von Aluminiumtrihyd und violetterm ζ -Titan(III)-chlorid, als koordinative Kettenpolymerisation durchführen. Hierbei arbeitet man mit heterogenen Initiatorsystemen und erhält zB aus Propen bis zu 95 % isotaktisches Polypropylen mit einem Schmelzpunkt von 176 °C. (isotaktisches Polypropylen, siehe Abb.)



Bei richtiger Wahl der Polymerisationsbedingungen lassen sich zB aus Propen Polymere mit isotaktischer, syndiotaktischer oder ataktischer Struktur erhalten. Die ersten beiden sind kristallin und das ataktische Polymer hingegen ist wegen seiner unregelmäßigen Struktur amorph.

Isotaktisches Polypropylen ist härter als Polyethylen und wird zB zur Fabrikation von Fasern und Filmen verwendet. Handelsnamen: Hostalen PP (Hoechst), Vestolen P (Hüls), Moplen (Montecatini, Italien) und Pro-fax (Hercules Inc., USA) [54].

Bei der Propylen-Polymerisation dominieren heute drei Verfahren

1. das Suspensions-(Slurry-)Verfahren. (bei dem nach Optimierung auf Abtrennung von Katalysator-Resten und ataktischen PP verzichtet werden kann)
2. das Masse-Bulkverfahren
3. das Gasphasen-Polymerisations-Verfahren

Das Suspensions-Verfahren ist den beiden anderen Verfahren hinsichtlich Variationsbreite und Wirtschaftlichkeit unterlegen. Seine Bedeutung nimmt ab, weil sich mit ihm Propylen-Copolymere, zB mit Ethylen, wegen zu hoher Löslichkeit im Suspensionsmittel (meist Hexan) nur schwierig herstellen lassen. Copolymerisationen des Propylens sind beim Masse-Verfahren zweistufig und beim Gasphasenverfahren einstufig möglich. Die Regelung der mittleren relativen Molmasse (ca. 150000 – 600000 g/mol) kann durch Einstellung eines bestimmten Wasserstoff-Partialdruckes während der Polymerisation des Propylens erfolgen [54], [33].

Eigenschaften

Polypropylen zeichnet sich durch hohe Härte, Rückstellfähigkeit, Steifheit und Wärmebeständigkeit aus. Kurzfristiges Erwärmen von Gegenständen aus PP ist sogar bis 140 °C möglich, bei Temperaturen unter 0 °C tritt eine gewisse Versprödung ein, deren Bildung jedoch durch Copolymerisation des Propylens mit Ethylen (EPM, EPDM) zu wesentlich tieferen Temperaturbereichen verschoben werden kann. Allgemein lässt sich die Schlagzähigkeit von PP durch Modifikation mit Elastomeren verbessern. Die Chemikalienbeständigkeit ist wie bei allen Polyolefinen gut. Eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der PP erreicht man durch Verstärkung mit Talkum, Kreide, Holzmehl oder Glasfasern, und auch das Aufbringen metallischer Überzüge ist möglich. Polypropylene sind stark oxidations- und lichtempfindlich, weshalb der Zusatz von Stabilisatoren (Antioxidantien, Lichtschutzmittel, UV-Absorber) erforderlich ist. Andererseits können PP durch Zusatz von Metaldialkyldithiocarbamaten photochemisch abbaubar gemacht werden. Für die Verarbeitung zu Fasern, sind nur isotaktatische Polypropylene geeignet. Polypropylene können auch verschäumt werden.

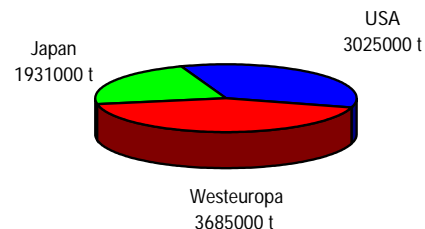
Verwendung

Polypropylen findet Anwendung für hochbeanspruchte technische Teile, elektrische Haushaltsgeräte, Färbespulen, Damenschuhabsätze, Koffer, Wasch- und Geschirrspülmaschinen, im Apparatebau und weiters zur Herstellung von Folien, zur Beschichtung von Papier, Gewebe, für Rohrleitungen für Gase und Flüssigkeiten, als Schmelzspinnfasern, Filamente, Folienbändchen und Spinnvliese für Teppiche, Nadelfilze, Papiere, Bezugs- und Dekorstoffe, technische Gewebe, Seile, Taue, Filter, Netze, Bindegarnen, Kunstrasen, Hygienevliese, Nassvliese. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist sicher im Bausektor der Asbestersatz.

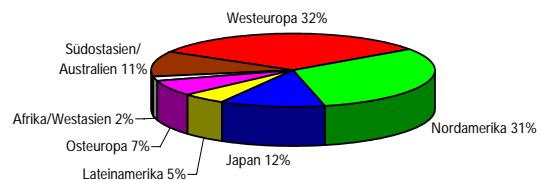
Wirtschaftliche Bedeutung

Der Polypropylenverbrauch erreichte 1990 in Westeuropa, Japan und den USA ein Volumen von ca. 8,6 Mio. t. Die Kapazitäten zur Herstellung von Polypropylen beliefen sich 1989 auf ca. 13,1 Mio. t.

Polypropylen-Verbrauch 1990



Polypropylen-Kapazitäten nach Regionen (Stand 1989)



Die Verbrauchsaufgliederung nach Anwendungsgebieten/Verarbeitung des 1989 in Westeuropa verbrauchten PP von 3,3 Mio. t veranschaulicht Tab. 1

Anwendung/Verarbeitung	Verbrauchsanteil (1989 in %)
Extrusion	52
Folien	16
Raffia	12
Fasern/Monofile	17
Rohre/Platten/Thermoformen	5
Sonstige Extrudate	2
Spritzgießen	47
Verpackung	14
Technische Teile	16
Haushaltswaren	13
Sonstige Spritzgussteile	4
Blasformen	1
Insgesamt	100

Für die Aufgliederung des PP-Marktes in Westeuropa nach Branchen ergibt sich für 1989 folgendes Bild:

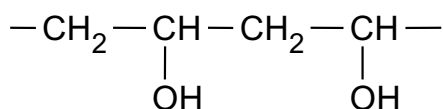
Verpackungsindustrie 34 %; Textil und Bekleidung 23 %; Verbraucherprodukte 15 %; Fahrzeugbau 11 %; Elektroindustrie 7 %; Bauwirtschaft 3 %; Sonstige 7 %. [33].

5.4. Bindemittel auf petrochemischer Basis (lösliche Polymere)

5.4.1. Polyvinylalkohol PVAL

Charakteristik

Summenformel:



Herstellung

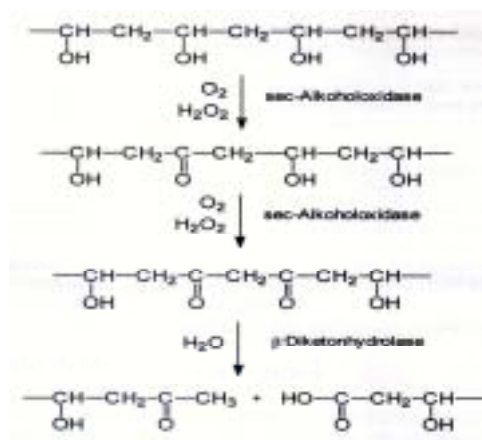
Polyvinylalkohol wird durch Polymerisation von Vinylacetat zu Polyvinylacetat und anschließender Alkoholyse hergestellt. Der Restgehalt an Acetatgruppen liegt bei 1 bis 2 %. Die Glasübergangstemperatur T_G beträgt 85 °C und der Schmelzpunkt 228 °C. Die Dichte liegt zwischen 1,2 und 1,3 g/cm³. Die Löslichkeit in Wasser ist abhängig vom Hydrolysegrad (mind. 65 % OH-Gruppen). Ebenso ist Polyvinylalkohol löslich in weniger stark polaren Lösungsmitteln wie Formamid, DMF und DMSO. Nicht angegriffen wird Polyvinylalkohol von chlorierten Kohlenwasserstoffen, Estern, Fetten und Ölen und ist toxikologisch unbedenklich. Der Verkaufspreis bewegt sich je nach Type um 40 ATS/kg [56].

Polyvinylalkohol ist ein gut wasserlösliches Polymer mit guten Filmbildungs- und Barriereigenschaften gegenüber O₂, N₂, H₂ und CO₂. Die Molmassen liegen zwischen 20 000 und 100 000 g/mol.

Die in vielen Fällen nachteilige Wasserlöslichkeit kann durch Nachbehandlung mit Aldehyden (Acetalisierung), Komplexierung mit Ni- oder Cu-Salzen oder Behandlung mit Dichromaten, Borsäure und Borax verringert werden.

Biologischer Abbau

Mechanismus der enzymatischen Depolymerisation von Polyvinylalkohol [49].



Im Vergleich mit anderen Vinylpolymeren (PS, PE, PP, PVC) ist Polyvinylalkohol am besten abbaubar. Klärschlammtests sowie Abbau mit Enzymen aus Pseudomonaden haben die vollständige Mineralisation bewiesen.

Verwendung

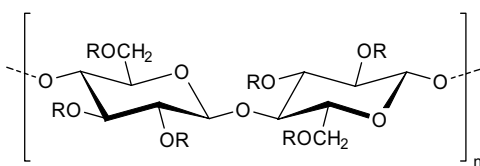
Polyvinylalkohol findet Verwendung als Schutzkolloid, Emulgator, Bindemittel für Schutzhäute und Klebstoffe, Appreturen, Schlichtmittel, als Klebstoff, zur Herstellung von Salben, Emulsionen, wasserlöslichen Beuteln und Verpackungsfolien, öl-, fett- und treibstoffbeständigen Schläuchen und Dichtungen; als Seifenzusatz, Verdickungsmittel in pharmazeutischen und kosmetischen Präparaten; zur Herstellung von wasserlöslichen Fasern (Vinal-Faser) und als Rohstoff für die Herstellung von Polyvinylacetalen (Polyvinylbutyrale). Zusätzlich wird PVAL auch als Bindemittel in der Baustoffindustrie verwendet [56].

5.4.2. Carboxymethylcellulose CMC

Charakteristik

Als Carboxymethylcellulosen (CMC-Derivate mit $R=H, CH_2-COONa$) wird allgemein das Natrium-Salz des Glykolsäureethers der Cellulose bezeichnet.

Allgemeine Summenformel:



Herstellung

Die drei freien OH-Gruppen in jedem Cellulosebaustein können mit Alkylhalogeniden wie Ethylchlorid oder dem Natriumchlorid (Kochsalz) der Chloressigsäure zu Ethern umgesetzt werden. Dabei entsteht im ersten Fall die wasserunlösliche, aber in vielen Lösungsmitteln lösliche Ethylcellulose

(EC), im zweiten das wasserlösliche Natriumsalz der Carboxymethylcellulose (CMC, CM Cellulosen). Die dabei anfallende CMC enthält herstellungsbedingt Kochsalz sowie Natriumglykolat und -diglykolat. Im Handel erhältliches CMC ist ein Pulver oder Granulat und wird mit Substitutionsgraden von ca. 0,5 – 1,5 angeboten. Weitere Variationsmöglichkeiten liegen auch im Bereich der Viskosität. Carboxymethylcellulose ist unlöslich in organischen Lösungsmitteln, aber löslich in Wasser, aus dem sie als Polyelektrolyt durch Zusatz von Säuren, Salzen oder mehrwertigen Metall-Ionen, zB Cu^{2+} , Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , ausgefällt werden kann. Die Säure-Form der Carboxymethylcellulose (HCMC) ist unlöslich in Wasser, Säuren und organischen Lösungsmitteln [33].

Biologischer Abbau

Chemisch modifizierte Cellulose ist nur beschränkt bioabbaubar. Die Bioabbaubarkeit sinkt mit zunehmendem Substitutionsgrad. Weiterhin wurde in vergleichenden Versuchen festgestellt, dass Natriumcarboxymethylcellulose und Ethylhydroxyethylcellulose zwar oxidiert, aber nicht mineralisiert werden [54], [57].

Verwendung

Aufgrund ihres breiten Eigenschaftsspektrums ist CMC sehr vielseitig einsetzbar, zB als Schmutzträger in Waschmitteln (mengenmäßig größtes Einsatzgebiet für CMC) und Zusatzmittel für Feinseifen und Handwaschpasten. Ebenso wird CMC als Sprengmittel, Verdickungsmittel für Salben, Zahncremes; Stabilisierungsmittel für Emulsionen und Suspensionen als Emulgator und Stabilisator für Speiseeis, Milchgetränke, Fruchtgetränke, Suppen und Soßen verwendet. Unter anderem findet es Anwendung als Bindemittel und Filmbildner für Tabakfolien, als Verdickungs-, Stabilisierungs-, Dispergier-, Emulgier-, Bindemittel und Schutzkolloid; als

Spachtelmasse, Abbeizpaste und Dispersionsputz. Weiters findet es Anwendung in der Textil-Industrie als Schlichte, in der Baustoff-Industrie als Verzögerer und Verdickungsmittel für gipshaltige Massen und Spachtelmassen, in der Erdöl-Industrie als Bohrspülhilfsmittel, im Bergbau als Filter-, Klär- und Flotationshilfsmittel, sowie als Binde- und Plastifizierungsmittel bei der Herstellung von Schweißelektroden.

5.5. Bindemittel auf mineralischer Basis

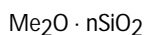
5.5.1. Wasserglas

Charakteristik

Wasserglas, im Mittelalter als Kieselsaft oder „Liquor Silicium“ bezeichnet, kommt als 35%ige wässrige Lösung von Natriumsilikat in den Handel und wird heute energieschonend durch hydrothermalen Aufschluss bei 200 °C unter einem Druck von bis zu 20 bar aus Sand und Natronlauge gewonnen. Allgemein versteht man unter Wasserglas ein aus dem Schmelzfluss erstarrtes, glasiges, wasserlösliches Kalium- und Natriumsilikat oder deren viskose, wässrige Lösungen.

Wasserglas ist eine stark basisch reagierende, viskose, wässrige Lösung.

Chemische Zusammensetzung:



Me = meist Na oder K, aber auch Li, NH₄

n = 2...4

Einsatzbereiche von Wasserglas

Wasserglas wird verwendet:

- ≠ zur Bereitung von säurefesten Kitten und Klebstoffen,
- ≠ als Bindemittel in Wasserglasfarben (Silicatfarben),
- ≠ als Kernbinder im Gießereiwesen,
- ≠ als Flammschutzmittel,
- ≠ als Zusatz von Wasch- und Reinigungsmitteln (zB Korrosionsinhibitoren)

≠ als Ausgangsstoff für die Zeolithsynthese (Ionenaustauscher)

Wasserglas dient zur Herstellung einer Vielzahl von Produkten der Waschmittel- und Baustoffindustrie und in speziellen Anwendungen. Besondere Eignung besitzt Wasserglas für den Brandschutz und das Verfestigen organischer Stoffe (Fasern), da es die natürliche Feuchtigkeit ersetzt und beim Trocknen anorganische Kieselsäurestrukturen gebildet werden.

Altpapier, Lumpen, organische Faserstoffe können zu Platten gegossen nach dem Trocknen als schwer entflamm- und schwerbrennbare, wasserfeste Baumaterialien Verwendung finden. Stark arbeitende Materialien werden durch die Imprägnierung mit Wasserglas quasi porendicht versiegelt und damit erst vorbereitet und fähig zum Einbetten in organische und anorganische Matrices. Die mechanische Stabilität der Produkte ist ausgezeichnet.

Da auch stark verschmutzte oder anderweitig nicht mehr nutzbare Stoffe verwendet werden können, ist sogar die Verwertung von Reststoffen aus Recyclingverfahren denkbar. Gegenwärtig wird untersucht, ob sich Abfälle der genannten Baustoffe nach der industriellen Verbrennung bei der Zementherstellung oder Gewinnung von Wasserglas wiederverwenden lassen oder die Verfestigung von Rückständen der Müllverbrennung verbessern [58].

Derzeit arbeiten am Landesinnovationskolleg „Wärmedämmsysteme“ fünf Institute der TU Dresden gemeinsam an der Entwicklung ökologisch orientierter und preisgünstiger Wärmedämmsysteme. Die hohe Wirtschaftlichkeit und die notwendige positive ökologische Bewertung werden durch eine gezielte Auswahl der Roh- bzw. Wertstoffe, durch optimierte Dämmstrukturen, kostengünstige Verfahren zur

Dämmstoffherstellung und neue Lösungen für die Konstruktion der Dämmstoffe realisiert.

Zum Einsatz kommen nachwachsende Rohstoffe und Wertstoffe, wie zB Holzfasern, Getreidestroh, Schafwolle, Reißbaumwolle und Recycling-Polyesterfasern. Als Bindemittel werden Wasserglas, Stärke, thermoplastische Fasern oder Zement verwendet. Die neuen Dämmstoffe werden im Hausbau (Wand- und Dachkonstruktionen) und als Rohrisolationen im Heizungsbau eingesetzt [59]. Durch Imprägnieren von Kunststoffen, Holzfasern, Holzwolle oder Altpapier mit Wasserglas kann das Brandverhalten von organischen Materialien sehr verbessert werden. Das getrocknete Kieselgel ist unbrennbar und gibt in der Hitze gebundenes Wasser ab. Dadurch wird eine Entzündung und Brandunterhaltung erschwert. Durch Schleifen und Polieren lassen sich attraktive Oberflächen erzeugen.

Wasserglas hat den großen Zusatz-Vorteil, auf die Zellulosematrix nicht nur flammhemmend, sondern auch hydrophobierend zu wirken. Auch eine Behandlung als Oberflächenschutz (Tauchen, Spritzen, Airless u. dgl.) sollte ins Auge gefasst werden [60].

Die Wasserglasoption dürfte sich beim jetzigen Kenntnisstand für die Dämmwand nicht nur als probates Brandschutzsystem herauskristalisieren, sondern auch als guter Klebstoff für die Fasern eignen. Im Zusammenhang mit der Verarbeitbarkeit von Wasserglaslösungen ist die Verstopfungsgefahr von Düsen durch zu rasches Aushärten als Nachteil zu bewerten.

Wirtschaftliche Bedeutung

Pro Jahr werden weltweit inzwischen mehr als vier Millionen Tonnen Wasserglas hergestellt, womit dieses Produkt trotz seines geringen Bekanntheitsgrads als einer der bedeutendsten Rohstoffe bezeichnet werden kann.

5.5.2. Zement

Charakteristik

Zement ist ein feingemahlendes, hydraulisches Bindemittel, welches unter Wasseraufnahme an Luft und selbst unter Wasser steinartig erhärtet. Nach dem Aushärtungsprozess ist das Produkt wasserbeständig. Chemisch besteht Zement überwiegend aus Calciumsilicaten, -aluminaten und -ferriten, dh. aus CaO mit SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 in unterschiedlichen Mengenverhältnissen, die beim „Brennen“ der Rohstoffe (Kalkstein, Ton, Kalkmergel, Tonmergel ua.) bei Temperaturen bis zu ca. 1500 °C im Klinker entstehen.

Zusammensetzung von verschiedenen Zement-Klinkerphasen

Name	Zusammensetzung	Anteile im Klinker (%)
Tricalciumsilicat (Alit)	3 CaO · SiO_2	40 – 80
Dicalciumsilicat (Belit)	2 CaO · SiO_2	0 – 30
Tricalciumaluminat (Aluminatphase)	3 CaO · Al_2O_3	7 – 15
Calciumaluminatferrit (Ferritphase)	2 CaO(Al_2O_3 , Fe_2O_3)	4 – 15

Die jeweiligen Mengenverhältnisse der Rohstoffe werden mit folgenden Kennzahlen (Modulen) beschrieben:

Kalkstandard: CaO zu $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$

Silicatmodul: SiO_2 zu $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$

Tonerdemodul: Al_2O_3 zu Fe_2O_3

Unter dem „hydraulischen Modul“ versteht man das Verhältnis von basischen zu sauren Oxiden.

Bei Zusatz von Wasser zum feingemahlenden Zement („Anmachen“) erfolgt das Erstarren und Erhärten des Zementleims bzw. der Zementpaste durch exotherme Hydratation der Zementinhaltsstoffe, wobei ca. 25 % Wasser (bezogen auf das Zementgewicht) chemisch und weitere ca. 10 – 15 % adsorptiv gebunden werden.

Herstellung

- 1.) Gewinnung, Brechen, Mahlen, Homogenisieren und Mischen der Rohstoffe
- 2.) Brennen der Rohstoffe zum Klinker, heute fast ausschließlich in Drehrohröfen mit Rost- oder Zyklon-Vorwärmung, früher auch in Schachtöfen
- 3.) Vermahlen der Klinker zusammen mit CaSO_4 (zur Regulierung der Erstarrungsgeschwindigkeit) und gegebenenfalls mit weiteren latent hydraulischen Stoffen wie granulierter Hochofenschlacke (Hüttensand), Puzzolanen wie Trass oder gebranntem Ölschiefer

Eigenschaften

Die wesentlichen Eigenschaften von Zement wie zeitlicher Ablauf von Erstarrung und Erhärtung, Festigkeitseigenschaften und chemische Widerstandsfähigkeit sind abhängig von Zusammensetzung der Rohstoffe, Mengenanteil der zugemahlten Bestandteile und von der Mahlfeinheit.

Zementsorten:

- ☞ Portlandzement (PZ)
- ☞ Eisenportlandzement (EPZ)
- ☞ Hochofenzement (HOZ)
- ☞ Trass-Zement (TrZ)

Portland-Ölschieferzement (PÖZ) aus 65 – 90 % Portlandzementklinker und 10 – 35 % Ölschieferzement (ca. 800°C gebranntem Ölschiefer) existiert die DIN 1164 T 100 (März 1990).

Trasshochofenzement (TrHOZ) aus 25 – 50 % Portlandzement-Klinker, 15–25 % Traß und 35 – 50 % Hüttensand, entwickelt nur geringe Hydratationswärme. Verwendet wird dieser für massive Bauteile und im Wasserbau.

Flugaschezement (FAZ) aus 70 – 85 % Portlandzement-Klinker und 15 – 30 % Steinkohlen-Flugasche. Verwendet wird dieser wie der Trass-Zement (nicht zugelassen für Spannbeton).

Phonolithzement (PUZ) aus 65 – 80 % PZ-Klinker und 20 – 35 % bei ca. 400 ° getempertem Phonolith (zB aus Bötzingen/Kaiserstuhl). Verwendet wie FAZ.

Vulkanzement (VKZ) aus 67 – 83 % PZ-Klinker und 17 – 33 % Lava-Mehl (zB aus Niederlützen bei Andernach/Rhein), Verwendet wie PUZ.

Sulfathüttenzement (SHZ) aus (hoch)basischer Hochofenschlacke mit CaSO_4 -Zusatz (mindestens 3 % SO_3), wird in Deutschland nicht mehr hergestellt.

Tonerdezement (früher ToZ), Tonerdeschmelzzement (TSZ) aus Bauxit und Kalkstein wird durch Sintern und Schmelzen bei ca. 1500 – 1600° hergestellt. Der Hauptbestandteil ist Calciumaluminat mit ca. 30 - 80 % Al_2O_3 , 35 – 40 % CaO , 5 – 15 % Fe_2O_3 und 3 – 8 % SiO_2 , erhärtet relativ schnell mit höherer Wärmetönung, hat gute chemische Widerstandsfähigkeit und ist mit geeigneten Zuschlägen verarbeitet hitzebeständig bis 1600 °C, Verwendung findet dieser im Feuerungs- und Schornsteinbau und ist für tragende Bauteile nicht zugelassen.

Quellzement aus PZ-Klinker mit Tonerdeschmelzzement, Kalk und Gips, quillt beim Erstarren durch Bildung von höheren Ettringit-Anteilen, hat nur geringe baupraktische Bedeutung.

Tiefbohrzement, ein Spezial-Portland- oder Puzzolan-Zement mit vermindertem Aluminat-Gehalt, verzögerter Erstarrung bei hohem Druck und hoher Temperatur sowie guter Sulfat-

Beständigkeit, Verwendung: Auskleidung von Öl- und Gas-Bohrlöchern.

Schnellzement (Regulated Set Cement) aus kalkreichem PZ mit zusätzlichen Anteilen von Aluminat und Ca/Fe, schnell erstarrend und erhärtend. Verwendung für Ausbesserungsarbeiten, Befestigen von Dübeln, Ankern u. dgl. [33], [61], [62].

Wirtschaftliche Bedeutung

Weltweit wurden 1990 ca. 1,14 Mrd. t Zement produziert. In der BRD (ohne die neuen Länder der ehemaligen DDR) betrug die Produktionsmenge ca. 27,7 Mio. t = ca. 2,4 % der Weltproduktion. Hieran waren 34 Unternehmen mit 61 Werken und ca. 10.150 Beschäftigten beteiligt. Es wurde ein Gesamtumsatz von ca. 3,9 Mrd. DM erzielt. Die Verteilung auf die Zementsorten betrug: Portland-Zement ca. 70 %, Hochofen-Zement ca. 16 %, Eisenportland-Zement ca. 5 %, Portlandölschiefer-Zement ca. 2 %, Traß-Zement ca. 1 % und sonstige Zementsorten ca. 6 %. Die Verwendung von Zement in der BRD erfolgte zu ca. 55 % für Transportbeton, zu ca. 26 % für die industrielle Herstellung von Fertigbauteilen, zu ca. 14 % als Sack-Zement. und zu ca. 6 % für sonstigen Silo-Zement [33].

Umweltaspekte

Bereits vor über 100 Jahren begann die deutsche Zementindustrie mit Maßnahmen zur Minderung der bei allen Produktionsstufen auftretenden Staub-Emissionen. Mit der Verbesserung der Filter-Technologie nach dem 2. Weltkrieg gelang es, von 1950 bis 1985 das Ausmaß der Staub-Emission von ca. 3,5 % auf ca. 0,05 % der Produktionsmenge zu senken. Mit einem Staub-Grenzwert von 50 mg/m³ Abluft hat Deutschland gemeinsam mit den Niederlanden in Europa die strengsten Werte. Bei den gasförmigen Emissionen spielt SO₂ nur eine

untergeordnete Rolle, da der Schwefel – hauptsächlich aus den verwendeten Brennstoffen – beim Brennprozess in den Zement-Klinker als Sulfat eingebunden wird. An funktionsfähigen Verfahren zur Minderung der beim Brennprozess entstehenden Stickoxid (NOx)-Emissionen wird noch gearbeitet. Mit den Rohstoffen werden geringe Mengen von Schwermetallen eingeschleppt, die größtenteils in unschädlicher Form in den Zement-Klinker eingebunden werden. Eine Ausnahme bilden Thallium und Quecksilber, deren Emission durch verfahrenstechnische Maßnahmen begrenzt werden muss. Die Entwicklung solcher Verfahren wurde beschleunigt betrieben. Im Zement können Spuren (20 – 100 ppm) von Chromat vorhanden sein, wodurch – gegebenenfalls verstärkt durch alkalisches Milieu – bei regelmäßig mit Zement in Berührung kommenden Personen allergische Dermatosen auftreten können. Dieses früher häufiger beobachtete „Maurerekzem“ ist als Berufskrankheit melde- und entschädigungspflichtig [63], [64], [65], [66], [67], [68], [69].

5.5.3. Magnesiumoxid (Kauster)

Charakteristik

Magnesiumoxid ist ein lockeres, weißes Pulver mit einer molaren Masse von 40,32 g/mol. Die kristalline Formen können eine oktaedrische bzw. würfelförmige Struktur haben. Die Dichte beträgt 3,58 g/cm³. Der Schmelzpunkt liegt bei ca. 2800 °C und Siedepunkt bewegt sich bei 3600 °C. Der MAK-Wert beträgt (als Feinstaub) 6 mg/m³ ein. Magnesiumoxid ist unlöslich in Wasser. Nach einiger Zeit wird es jedoch in Magnesiumhydroxid umgewandelt. Kristallines Magnesiumoxid wird von Säuren nur schwer, pulverförmiges leichter angegriffen.

Gewinnung

Magnesiumoxid kann beim Verbrennen von Magnesium gewonnen werden oder beim Glühen von Magnesiumhydroxid, Magnesiumcarbonat, Magnesiumnitrat und Magnesit durch Zersetzen von Magnesiumchlorid mit überhitztem Wasserdampf. Es ist auch möglich Magnesiumoxid thermisch aus Bittersalz bzw. Kieserit zu gewinnen. Bei der Gewinnung aus Meerwasser wird mit Hilfe von gebranntem und gelöschtem Kalk oder Dolomit $Mg(OH)_2$ gefällt, abgetrennt und calciniert [61], [62].

Verwendung

Je nachdem welche Art und welcher Temperaturbereich beim Calcinierungsvorgang gewählt werden, erhält man verschiedene Magnesia-Qualitäten:

- ⚡ Sintermagnesia dient zur Herstellung von Feuerfest- sowie auch Wärmespeichermaterialien
- ⚡ Schmelzmagnesia verwendet man als Isoliermaterial in der Elektrowärmeindustrie
- ⚡ Reaktionsfähiger Magnesia-Kauster (chemische Bezeichnung: Magnesia) wird eingesetzt in Magnesitbindern (Sorelzement)
- ⚡ Antacidum bei Magenübersäuerung und Säurevergiftungen
- ⚡ Elastomeren, zur Absorption von Schwefeldioxid, als Eindickmittel für ungesättigte Polyesterharze [33].

Weitere Einsatzgebiete sind Streupuder, zur Fleckenreinigung (Aufsaugungsmittel), bei der Uran-Gewinnung in Ionenaustauschern, zur Entkieselung von Wasser in Vollentsalzungsanlagen, in Futtermitteln, als Vulkanisationsverzögerer in Polychloropren ua.

Kaustifizieren

Bezeichnung für die Überführung von milden Alkalien (Pottasche, Soda) in kaustische Alkalien mit Hilfe von gelöschtem Kalk. Dieses alte Verfahren wird technisch nur noch in sehr geringem Umfange durchgeführt.

5.6. Zusammenfassung

Angesichts der Vielzahl verfügbarer Bindemittel am Bausektor bedurfte es einer eingehenden Analyse in Frage kommender Bindemittel.

Berücksichtigt wurden

- ⚡ die qualitative Zusammensetzung und Rohstoffbasis
- ⚡ Fertigungsprozesse und Technologien
- ⚡ Werkstoffeigenschaften
- ⚡ Umweltwirksamkeit
- ⚡ Verfügbarkeit
- ⚡ Kosten

(siehe Tabelle).

	Produkte	Qualitative Zusammensetzung	Fertigungsprozesse/ Verwendung	Werkstoffeigenschaften	biologischer Abbau/ Entsorgung	Verfügbarkeit	Preis ATS/kg	
organische Bindemittel biogenen Ursprungs	1	Guar -Gum	Pulver (Asien, Südamerika)	mech. physikalische Verarbeitungsprozesse/ Klebstoffindustrie	Hohe, rasche Viskositätsentwicklung, Wasserstoffbrückenbindung, Komplexbindung/ Gellierung	Ja / Kompostierung	CH/BRD (begrenzt)	40
	2	Jaguar	Pulver (Asien, Südamerika)	Hydropropylierung, Veresterung, Veretherung / Klebstoffindustrie	Hohe, rasche Viskositätsentwicklung, Wasserstoffbrückenbindung, Komplexbindung/ Gellierung	Ja /Kompostierung	CH/BRD (begrenzt)	50
	3	Stärke	Pulver oder Granulat	mech. physikalische Technologien / Bindemittel für Baustoffindustrie	Verkleisterung	Ja / Kompostierung	A	30
	4	Stärke modif.	Pulver oder Granulat	Hydropropylierung, Veresterung, Veretherung/plastische Extrusion, Stärke + Polymere [Blends], Spritzguss	Verkleisterung, Plastifizierung	Ja / nicht immer kompostierbar	A	40
	5	Casein	Pulver	Aus der Molke (Ausfällung)/ Bindemittel für Baustoffindustrie	Verkleisterung	Ja /Kompostierung	A	50
	6	Casein modif.	Pulver	Plastifizierung/Spritzguss	Wasserstoffbrückenbindung, Vernetzte Proteinketten/ Plastifizierung	Ja / schlechter biologischer Abbau	A/BRD	60
	7	PHB	Fasern	techn. Herstellung/Spritzguss	Plastifizierung	Ja / Kompostierung	BRD/J/US (begrenzt)	60
org. Bindemittel / petrochem. Basis	8	CMC	Pulver, Granulat	techn. Herstellung (Veretherung)/ Bindemittel für Baustoffindustrie	Rasche Viskosität, Gellierung, Plastifizierung	Bedingt biologischer Abb. / thermische Verbrennung	A/BRD	40-50
	9	PVAL	Pulver, Granulat	techn. Herstellung (Polymerisation Vinylalkohol) / Bindemittel für Baustoffindustrie	Rasche Viskosität, Gellierung, Plastifizierung	Guter biologischer Abbau / Kompostierbar	A/BRD	40
mineralische Bindemittel	10	Kauster	Pulver/fein	techn. Herstellung / Bindemittel	Hydraulisches Bindemittel	Nein / Deponie	A	2
	11	Spezial Zement	Pulver/fein	techn. Herstellung / Spritzbeton (Baustoffindustrie)	Hydraulisches Bindemittel	Nein / Deponie	A	1,3
	12	Natron-wasserglas	Pulver	Techn. Herstellung/ Flammschutzbindemittel (Baustoffindustrie)	langsamer Aushärtungsprozeß, wasserfest, hydraulisches Bindemittel	Nein/Deponie (thermische Verbrennung)	A	~ 45
	13	Kaliwasserglas	Pulver bzw. kugelförmiges Granulat mit Lufteinschluß	Techn. Herstellung/ Flammschutzbindemittel (Baustoffindustrie)	langsamer Aushärtungsprozeß, wasserfest, hydraulisches Bindemittel	Nein/Deponie (thermische Verbrennung)	A	~ 45
thermopl. BM / petrochem. Basis	14	PE	Granulat	techn. Herstellung / Spritzguss Bausektor (Klebstoffe)	Plastifizierung	Nein / Thermische Verbrennung (ohne Umweltbelastung)	A/BRD	3
	15	PP	Fasern, Granulat	techn. Herstellung (Druckdestillation)/ Spritzguss Bausektor (techn. Gewebe)	Plastifizierung	Nein / Photochem.Abbau/ Deponie (therm. Verbrennung)	A/BRD	6

Mit den Bindemitteln 1 - 13 wurden Aufspritzversuche durchgeführt. Davon wurden einerseits Jaguar, Casein und Wasserglas als Klebersuspensionen in unterschiedlichen Konzentrationen verwendet und andererseits CMC, PVAL, Guar-Gum, Kauster und Zement in pulverförmiger Form den Zellulosefasern beigemischt. Einzig die Stärke konnte in beiden Anwendungszyklen eingesetzt werden. Zusätzlich wurden Versuche zur Produktion von Dämmplatten mit thermoplastischen Bindemitteln durchgeführt. Für diese Versuchsreihen wurden petrochemische

Bindemittel verwendet, da zu wenig an Probenmaterial von natürlich hergestelltem PHB zur Verfügung stand. In Frage kamen PP und PE, da diese Bindemittel ähnlichen Eigenschaften aufweisen wie PHB. In den ersten Screeningversuchen konnten bereits thermoplastisch gebundene Proben hergestellt werden. Es bedarf weiterer Entwicklungsarbeit, um eine bessere Durchmischung der Zellulosefaser mit der Kunststofffaser zu gewährleisten, da dies vorerst nur per Hand geschah.

6. Aufspritzversuche

6.1. Einleitung

Für die Aufspritzversuche wurden speziell angefertigte Wandsegmente aus Planziegeln hergestellt. Diese wurden lose auf Paletten zu mobilen Wandscheiben von ca. 80 cm Breite und 1,5 m Höhe geschichtet und mittels Stahlbändern zusammengespannt. Zusätzlich wurden an den seitlichen Rändern zwei Begrenzungsflächen aus Spanplatten errichtet, welche 8 bzw. 15 cm gegenüber den Ziegelflächen vorragten. Diese Holzplatten dienten als seitlicher Abschluss des Segments und wurden als Abziehle für die fertiggestellte Dämmschicht verwendet.

Der Vorteil dieser Probeflächen liegt in der Mobilität der Wandsegmente, welche mittels Hubwagen oder Gabelstapler leicht verschoben werden können. Für die Durchführung der ersten Aufspritzversuche von Zellulosedämmschichten wurde vor Ort am Ökopark in Hartberg im Produktionsstandort der Firma CPH eine eigene Versuchsfläche adaptiert. Dieser Versuchsstandort zeichnete sich durch folgende Vorteile aus:

- ≠# Unmittelbarer Zugang zum Dämmmaterial
- ≠# Die bei den Spritzversuchen entstehende Staubbelastung (einerseits durch das Sprühen andererseits durch das Hantieren mit den Dämmflocken) stellte kein größeres Problem dar
- ≠# Eine Werkstätte war am Produktionsstandort vorhanden (zB für etwaige Adaptierungen etc.) und leistete wertvollste Dienste
- ≠# Der bei den Aufspritzversuchen anfallende Over-Spray konnte entweder innerbetrieblich oder extern durch das ebenfalls ansässige Entsorgungsunternehmen „Hartberger Saubermacher“ leicht entsorgt werden
- ≠# Optimale Randbedingungen seitens der maschinellen Ausrüstung. Es standen sowohl Hubstapler als auch Einblasgeräte vor Ort zur Verfügung

- ≠# In unmittelbarer Nähe befindet sich auch ein Installateur Fachbetrieb, welcher bei den Adaptierungen diverser Gerätschaften (Düsen etc.) wichtige Fittings bereitstellen konnte.

6.2. Versuchsaufbau

Beim Aufspritzverfahren werden die Zelluloseflocken durch Einblasmaschinen in einen Förderschlauch eingebracht und durch einen Luftstrom an den eigentlichen Einsatz- bzw. Verarbeitungsort gefördert. Dabei passieren die Flocken spezielle Mundstücke, wo sie mit einem flüssigen Medium (Wasser, Bindemittellösung) vermischt werden. Die Flüssigkeit wird aus Vorlagebehältern durch Hochdruckpumpen zum Mundstück gefördert. Die eigentliche Aufbringung auf die Wand erfolgt durch den Flüssigkeits-Flockenstrahl. Auf Abb. 21 ist links der Vorlagebehälter für das Bindemittel bzw. für Wasser zu sehen, im Vordergrund steht die Hochdruckpumpe für die Förderung der flüssigen Fraktion. Rechts daneben ist eine typische Einblasmaschine aus der Praxis (Type Krendl) zu sehen.



Abb. 21 Versuchsaufbau der Aufspritzversuche



Abb. 22 X-Floc Zellofant, Zellradschleuse



Abb. 23 Einblasmaschine Krendl 500



Abb. 24 Einblasmaschine ohne Zellradschleuse

Diese allgemeine Funktionsweise kann durch folgende Faktoren beeinflusst werden:

- ≠# Einstellungen der Einblasmaschine
- ≠# Geometrie und Charakteristik des Sprühkopf
- ≠# Charakteristik des Bindemittels bzw. der Lösung
- ≠# Förderleistung der Pumpe

6.3. Verwendete Maschinen und Geräte

6.3.1. Einblasmaschinen

Für die durchgeführten Aufspritzversuchen wurden praxisübliche Einblasmaschinen der Fabrikate Krendl und X-Floc/Zellofant verwendet.

Grundsätzlich werden bei diesen Gerätschaften die Zelluloseflocken durch ein Rührwerk im Vorlagebehälter aufgelockert und gelangen danach in eine Zellenrad- bzw. umgangssprachlich Zellradschleuse, welche die Flocken in einen Druckluftstrom einschleust. Die Druckverhältnisse innerhalb dieses Luftförderstromes liegen bei ca. 0,3 bar Überdruck. Dieser Luftstrom wird üblicherweise durch Ventilatoren bereitgestellt und ist im kleinen Rahmen regelbar. Die Förderschläuche haben einen Durchmesser von zwei bis drei Zoll. Die handelsüblichen Sprühköpfe sind auf diese Dimensionen abgestimmt. Die eigentliche Einstellung der Fördermenge erfolgt durch die Steuerung der Umdrehungsgeschwindigkeit der Zellradschleuse bzw. durch einen Schieber, welcher die Abwurffläche über der Zellradschleuse reguliert.

Die für das Aufspritzen von Zelluloseflocken verwendeten Geräte sind hinsichtlich ihres Designs identisch mit den Einblasgeräten. Die Aufrüstung der Einblasmaschinen zum Aufspritzen erfolgt durch die zusätzliche Verwendung von Sprühköpfen und bei manchen Geräten durch Austausch eines Zahnrades, sodass eine höhere Umdrehungsgeschwindigkeit der Zellradschleuse erzielt wird.

6.3.2. Sprühköpfe

Für das Aufspritzverfahren wurden von diversen Firmen eine Reihe von verschiedenen Sprühköpfen entwickelt. Diese Sprühköpfe werden vor allem für das CSO-Verfahren verwendet, das heißt, es wird gegenwärtig fast ausschließlich mit reinem Wasser gesprüht. Die meisten Sprühköpfe bestehen aus zwei bis sechs Zerstäuberdüsen, welche so ausgerichtet sind, dass der Zelluloseflocken-Förderstrom direkt in den Sprühkegel geworfen wird.

Die Durchmischung und Benetzung der Flocken mit der flüssigen Fraktion erfolgt außerhalb des Förderschlauches in der Wegstrecke zwischen Düse und besprühter Wandfläche.

Für die tägliche Praxis des CSO-Verfahrens sind diese Düsen der Stand der Technik und finden international Verwendung.

Weitere spezielle Düsen arbeiten mit Schaum, welcher dem Zellulosestrom beigemischt wird. Der Vorteil der Anwendung von Schaum liegt in der feinen Verteilung der Feuchtigkeit auf eine große spezifische Oberfläche. Diese Schaumsysteme werden in den USA von der Firma ArkSeal vertrieben und sind patentrechtlich geschützt. Das Schaumsystem der genannten Firma wurde vor allem für den Einsatz mit Mineralfasern entwickelt.

Ein vorliegendes Demonstrations- und Verkaufsvideo zeigt die Anwendung dieser Entwicklung. Das System der Firma ArkSeal verwendet aber ein Klebesystem, welches als nicht umweltverträglich einzustufen ist. Die Anwendbarkeit dieses Systems für Zellulosefasern wird vom Produzenten zugesichert. Seitens verschiedener Anwender aus der Praxis wird diesem System aber keine Eignung für Zellulosefasern zugeschrieben.



Abb. 25 Modifizierte CSO-Düse



Abb. 26 Schaumdüse

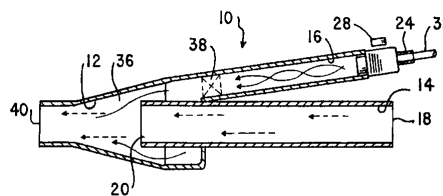


Abb. 27 Schaumdüse, Schnitt



Abb. 28 Herkömmliche CSO-Wand



Abb. 29 2strahlige Zerstäuberdüse

6.4. Beurteilung der ersten Versuchsergebnisse

6.4.1. Durchmischung der Flocken mit dem flüssigen Medium

Die ersten Versuche mit verschiedenen Sprühköpfen haben eine schlechte Durchmischung der Flocken mit der flüssigen Phase gezeigt. Nach Fertigstellung der Schichten konnte in den meisten Fällen eine starke Marmorierung der aufgespritzten Zelluloseschicht festgestellt werden, was eindeutig auf eine unzureichenden Durchmischung und Benetzung der Flocken durch das Spritzmedium hinweist.

Die Abb. 28 zeigt deutliche Marmorierungseffekte aufgrund unterschiedlicher Durchfeuchtung bzw. Benetzung. Dieses Ergebnis wurde unter Verwendung einer 2strahligen Zerstäuberdüse erzielt. Diese Düse dient als Standardwerkzeug des

CSO-Verfahrens und wird gerne zum Aufspritzen von Flocken bei Holzbauten verwendet.

Für die Aufbringung von flüssigem Bindemittel im Zuge des Aufspritzens sind diese Düsen aus gegenwärtiger Sicht nicht wirklich einsetzbar, da die Verteilung des Klebers nicht gleichmäßig erfolgt. Daraus resultieren innerhalb der erzeugten Schichte verschiedenste werkstofftechnische Parameter (zB Scherfestigkeit).

Damit die Eigenschaften von aufgespritzten Zelluloseschichten durch Bindemittel oder Kleber verbessert werden, muss eine möglichst einheitliche und isotrope Verteilung der Klebematrix in der Zelluloseschicht gewährleistet sein.

Im Besonderen muss das zur Anwendung kommende System auch dem Geräteführer die Möglichkeit bieten, reproduzierbare Ergebnisse unter verschiedenen Anwendungsbedingungen zu erzielen.

Basierend auf den ersten Ergebnissen der Aufspritversuche wurde an notwendigen Verbesserungen gearbeitet.

6.4.2. Beurteilung der Feuchte beim Aufspritversuch

Die Messung des Feuchtigkeitsgehaltes erfolgte unmittelbar nach dem Aufspritversuch durch Trocknung einer „vergleichsweise nassen“ Schichtstelle. Die Messung der Feuchte wurde durch ein Infrarot-Trocknungsgerät der Marke Scaltec SMO 01 bei einer Temperatur von 105 °C vor Ort durchgeführt.

Sämtliche Feuchteangaben beziehen sich auf folgenden Berechnungsmodus:

$$\text{Feuchtigkeitsgehalt [\%]} = \frac{\text{Anfangsgewicht (vor Trocknung)} - \text{Endgewicht (nach Trocknung)}}{\text{Anfangsgewicht (vor Trocknung)}} \times 100$$

6.5. Probleme beim Aufspritzverfahren

Durch verschiedene Versuchsreihen wurden folgende Problembereiche bei der Aufspritztechnik von Zelluloseflocken erkannt:

6.5.1. Austrocknungszeit

Die Aufspritztechnik zielt im Allgemeinen auf eine möglichst geringe Beigabe von Wasser bzw. Bindemittellösung ab, weil durch hohe Wassergehalte die Austrocknungszeit stark erhöht wird.

Bereits beim klassischen CSO-Verfahren liegt die Aufspritzfeuchte bei ca. 45 - 50 %. Bei Schichtdicken von zB 8 cm ergeben sich in der Praxis je nach Witterung ca. zwei bis drei Wochen Trocknungszeit. Im Allgemeinen werden solche Trocknungszeiten im Baubereich akzeptiert, da sich diese Austrocknungszeiten in etwa mit der Faustregel „sieben Tage Standzeit pro cm Putzdicke“ decken. Ein wesentliches Ziel dieses Projektes ist es, vor allem die Praxistauglichkeit von aufgespritzten Zelluloseflocken zu verbessern. Daraus resultiert auch die Forderung nach möglichst rascher Trocknung der Dämmschichte auf der Baustelle.

6.5.2. Reduktion des Over-Sprays

Zusätzlich ist vor allem der Over-Spray, das ist jener Anteil der Flocken, welcher entweder nicht an der Schichte haftet oder durch ein nachträgliches Abziehen oder Bürsten verloren geht, zu reduzieren.

Der Over-Spray des Aufspritzens verursacht neben der unmittelbaren Verschwendung der Flocken auch ein Schmutz- bzw. Staubproblem auf der Baustelle. Viele Bauherren lassen sich daher derzeit von einer Anwendung des Verfahrens abhalten. Zu dem würde eine Reduktion des Over-Sprays auch die Akzeptanz des Sprühverfahrens unter den Verarbeitern steigern.

6.5.3. Mischungsproblematik am Sprühkopf

In einem ersten Schritt wurde versucht, verschiedenste am Markt befindliche Düsen der Aufspritztechnik von Zelluloseflocken in Bezug auf die mögliche Eignung für die Zugabe von flüssigen Bindemitteln zu testen. Die Problematik liegt vor allem im Detail. So haben Kleber- oder Bindemittellösungen andere mechanische Eigenschaften insbesondere hinsichtlich ihrer Viskosität. Dieser Faktor hat aber entscheidenden Einfluss auf die Anwendbarkeit von speziellen Düsen. Aus diesem Grund sind Düsen, welche für die Anwendung von reinem Wasser (CSO-Verfahren) verwendet werden, für Klebelösungen zum Teil ungeeignet. Ein wesentliches Kriterium ist vor allem auch die Betriebssicherheit des Sprühkopfs. Wird trockenes Pulver zu Klebelösungen angerührt, so können sich trotz großer Sorgfalt immer wieder kleinste Partikel bilden, welche dazu geeignet sind, die feinen Öffnungen der Zerstäuberdüsen zu verstopfen. Ein wesentliches Augenmerk muss auf die Sprühkopfgeometrie gelegt werden um eine möglichst einheitliche Benetzung zu erzeugen.

Die Qualität der Vermischung des Flockenstromes mit der Klebmatrix kann gegenwärtig bei den handelsüblichen Sprühköpfen als weitgehend unzureichend bezeichnet werden, insbesondere unter dem Blickwinkel der Herstellung von isotropen Verhältnissen.

6.5.4. Förderungstechnik

Die Einblasmaschinen erzeugen durch den Einsatz von Zellradschleusen einen diskontinuierlichen Eintrag der Flocken in den Förderschlauch. Dadurch wird bereits durch die Einblasmaschine ein pulsierender Flockenstrom abgegeben, welcher auch schubweise den Sprühkopf erreicht. Dieser Umstand unterstützt eine inhomogene Vermischung der Flocken mit der Klebmatrix. Die

Steuerungsmöglichkeiten der Einblasmaaschinen sind unzureichend, um eine Vergleichmäßigung des Förderstromes zu erreichen.

6.5.5. Kleber- bzw. Bindemittelmischungen

Die erzielbaren mechanischen Eigenschaften von aufgespritzten Zelluloseschichten hängen neben dem Durchmischungsgrad von Flocke und Bindemittel auch von der Klebewirkung der zur Anwendung kommenden Bindemittelmischungen ab. Die speziellen Anforderungen an das Klebesystem sind neben der Umweltverträglichkeit (ev. Kompostierbarkeit) vor allem eine Unterstützung der schnellen Austrocknung bzw. Abbindens der Flocken-/Klebermischung. Im besten Falle sollte diese Mischung eine Spontanhaftung ermöglichen und - zumindest zum Teil - hydraulisch abbinden, dh. die Feuchte im Zuge der Härtung aufnehmen.

Zusammenfassend ergeben sich durch die genannten Detailprobleme drei größere komplexere Fragestellungen:

- ≠# Wie kann eine kontinuierliche und gleichmäßige Förderung der Flocken in den Förderschläuchen erzielt werden?
- ≠# Welche Mischungs- bzw. Benetzungstechniken sind geeignet, eine flüssige Phase gleichmäßig und vollständig mit einem luftgeförderten Flockenstrom zu vermengen?
- ≠# Welche Maßnahmen sind dazu geeignet, den Over-Spray und die Trocknungszeit der Schichtdicke zu verbessern?

6.6. Lösungsansätze

6.6.1. Verbesserung der Aufspritstechnik

Die hier angeführten Verbesserungen haben den Zweck das Aufspritverfahren hinsichtlich seiner erzielbaren Resultate entscheidend zu verbessern. Ziel ist es Kleber bzw. Bindemittel möglichst homogen mit den Zelluloseflocken zu mischen. Es sollen gleichmäßigere, reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden, die nicht zuletzt Voraussetzung für bautechnische Zulassungen sind.

6.6.2. Verbesserungsansätze im Bereich Over-Spray

Im Hinblick auf das Forschungsziel und unter Verwendung bestehender Technologien besteht aus heutiger Sicht nur die Möglichkeit, relativ viel Flüssigkeit beim Aufspritzvorgang zu verwenden, um einen Großteil der Zellulosefasern weitestgehend zu befeuchten. Diese Strategie ist dazu geeignet, einerseits die Durchmischung am Sprühkopf zu verbessern und andererseits den Over-Spray deutlich zu reduzieren.

Allerdings verursacht die Erhöhung des Wassergehaltes beim Aufspritzen eine längere Austrocknungszeit der Dämmschichte, welche theoretisch durch hydraulische, rasch aushärtende Bindemittel verkürzt werden könnte. Zusätzlich erhöht sich mit dem Wassergehalt auch das Gewicht der aufgespritzten Dämmschichte, was vor allem ein Abgleiten und Nachbrechen von Schichtpaketen während des Aufspritzvorgangs verursachen kann. Die beschriebene Strategie kann nur erfolgreich angewandt werden, wenn es zusätzlich gelingt, eine Klebefraktion mit Spontanbindekräften in die Schichte einzutragen, welche unmittelbar nach dem Aufspritzen bereits eine Stützung der relativ feuchten und somit schweren Schichte garantiert.

6.6.3. Neue Düsen

Bei den durchgeführten Versuchen wurden zusätzlich Düsensysteme aus „verwandten“ Anwendungsgebieten getestet. So zeigten Sprühdüsen, welche in der Praxis zB zum Auftrag von Spritzbeton verwendet werden, interessante Ergebnisse. Eine weitere Adaption dieser Geräte hinsichtlich der Regulierbarkeit der Wassermenge bzw. hinsichtlich des Spritzbildes und der Geometrie der Wasseraustritte scheinen gegenwärtig erfolgversprechend. Konkret besteht Innovationsbedarf hinsichtlich des für unterschiedliche Bindemittelviskositäten optimalen Düsendurchsatzes und hinsichtlich der Möglichkeit, Bindemittel alleine vorzuspritzen – was bei den vorhandenen Spritzbeton-Düsen nicht möglich ist. Diese Maßnahme könnte die Haftung der Zelluloseflocken speziell auf saugenden Untergründen deutlich verbessern.

Der größte Vorteil dieser Düsentechnik liegt vor allem in der leichten Reinigung der Sprühdüsen. Die Verstopfungsgefahr wird gegenwärtig als gering beurteilt. Die Spritzbeton-Düsen wurden auch für die Einmischung von mineralischen Bindemittelmischungen in den Flockenstrom verwendet.



Abb. 31 Zerlegte Spritzbetondüse



Abb. 32 Spritzbetondüse - Eigenentwicklung



Abb. 33 Düsenringe der Düse aus Abb. 32



Abb. 30 Spritzbetondüse, Standard



Abb. 34 Innenansicht der Düse aus Abb. 32



Abb. 35 Pulverzudosierer



Abb. 36 100 l Versuchsreaktor
Die drehbare Düse im Zentrum der Flocken wird von unten mit Pressluft versorgt.

6.6.4. Ausrüstung der Zelluloseflocken mit pulverförmigem Bindemittel

Dieser Arbeitsgang sollte nicht bauseits sondern bereits während der Produktion der Zelluloseflocken erfolgen, damit eine einheitliche Qualität garantiert werden kann. In weiterer Folge könnten dann die mit Bindemittel ausgestatteten Flocken auf der Baustelle mit reinem Wasser aufgespritzt werden. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass der Geräteführer auf der Baustelle keine Klebkonzentrationen überwachen muss und somit weitere Fehlerquellen von Beginn an ausgeschaltet werden können.

Die gleichmäßige Einmischung von pulverförmigen Klebersystemen in die Zelluloseflocken im Zuge des Aufspritzvorganges würde ebenfalls einen größeren maschinellen Aufwand bedeuten.

Die eleganteste Methode der Vermischung wäre allerdings das Aufbringen des Klebepulvers im Zuge des Produktionsprozesses der Zelluloseflocken. Das zum damaligen Zeitpunkt erfolgversprechenste Klebemittel hat allerdings stark hygroskopische Eigenschaften und entwickelt spontan und unmittelbar einen Klebe- bzw. Gel-Effekt. Da das Altpapier vor der Vermahlung auch mit Wasser benetzt werden muss um den optimalen Wassergehalt des Endprodukts zu gewährleisten, hätten sich sehr leicht Altpapier-Klebergel-Klumpen bilden können.

Ein In-Situ-Versuch in der Produktionsstätte der CPH erschien aus diesem Blickwinkel äußerst riskant, da im schlimmsten Fall sogar ein Maschinenschaden verursacht werden hätte können.

Deshalb wurde am Institut für Thermische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik der TU Graz - Vorstand O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Rolf Marr - versucht, Flocken und Bindemittel in einem Glasreaktor mittels Luftwirbelstrom-

Mischverfahren möglichst gleichmäßig zu vermengen.

Mittels verschiedener statischer und später rotierender Düsen sollten etwa 500 g Zelluloseflocken durch Pressluft in einen Schwebезustand gebracht werden um anschließend mit feinst zerstäubtem Wasser befeuchtet und mit pulverförmigen Bindemitteln vermischt zu werden.

Trotz intensiver Bemühungen gelang es allerdings nicht, die durch das Befeuchten schwerer gewordenen Flocken in Schwebе zu halten. Vielmehr wurden die Bindekräfte des Hemizellulosenanteils durch die Wasserzugabe aktiviert und es kam sehr rasch zu einer Klumpenbildung und Anlagerung an die Reaktorwände.



Abb. 37 Drehbare Düse des Glasreaktors

Weitere verfahrenstechnische Untersuchungen zur Lösung dieses Problems wurden im Rahmen des gegenständlichen Projektes nicht für realisierbar erachtet. Daher mußte in weiterer Folge versucht werden, mit den vorhandenen Förder- und Aufspritztechnologien das Auslangen zu finden.

6.6.5. Verbesserungen der Kontinuität des Förderstroms

Wie bereits diskutiert, sollte eine gleichmäßige Förderung der Zelluloseflocken durch die Einblasgeräte erreicht werden, welche eine wichtige Voraussetzung für eine gleichmäßige Befeuchtung und Durchmischung am Sprühkopf darstellt. Gegenwärtig kommt es vor allem durch den Einsatz von Zellradschleusen zu einem pulsierenden Förderstrom.

Eine unmittelbare Verbesserung wäre der Ersatz der Zellradschleuse durch eine kontinuierlich fördernde luftdichte Förderschnecke.

Eine weitere Adaptionsmöglichkeit stellt die Änderung des Übersetzungsgetriebes und somit der Umdrehungszahl der Zellradschleuse dar.

Es wurde auch ein finnischer Maschinentyp getestet, welcher keine Zellradschleuse integriert hat, sondern die Flocken direkt über den Gebläseventilator fördert.

Die Förderleistung dieses Gerätetyps wurde allerdings als zu gering für den baupraktischen Einsatz beurteilt. Zu dem war die Auflockerungsqualität der Zelluloseflocken mangelhaft. Grundsätzlich erscheint diese Fördertechnik jedoch interessant zu sein.

Zu dem wurde ein Zusatzgerät getestet, das in Form eines Zwischenstückes in den Förderschlauch eingebaut wurde und eine Homogenisierung des Zellulosestroms bewirken sollte. Der lichte Querschnitt dieser sogenannten statischen Mischer erwies sich allerdings als zu gering, so dass es nach kurzer Zeit zur Verstopfung der Elemente kam.



Abb. 38 Automatischer Nachmischer Putzmeister „Dynamat“

Automatischer Nachmischer

Weiters wurden Versuche mit einem bei der Dämmputzverarbeitung verwendeten Zusatzgerät durchgeführt. Dieser sogenannte automatische Nachmischer wird einige Meter vor der Spritzdüse in den Förderschlauch eingebaut und dient dazu, das Fördergut nochmals durchzumischen. Die erzielte Verbesserung bezüglich der Homogenisierung des Zellulosestroms war allerdings minimal. Dies vermutlich deshalb, weil die Ein- und Austrittsöffnungen für die Zelluloseflocken zu gering dimensioniert sind und weil die Geometrie des Rührwerkes auf relativ schweres, wenig komprimierbares Fördergut optimiert ist.

6.7. Klebewirkung verschiedener Bindemittel

Folgend wird die Klebewirkung im Zusammenhang mit verschiedenen Aufspritzversuchen beschrieben. Die Fragestellung der Beimischung der Bindemittel ist jeweils im Zusammenhang mit den typischen Eigenschaften des Klebers zu sehen. So entstanden zB große verfahrenstechnische Probleme bei der Aufbringung von Klebern mit Spontanklebekraft. Besonders bei der Aufbringung von Klebemittellösungen entstanden fördertechnische Probleme, wie zB Verstopfungen im Bereich der Pumpe oder Düse. Im Bereich der unmittelbaren Vermischung zwischen Flocke und Bindemittel konnten bereits nach kurzer Betriebszeit Verkrustungen oder Ablagerungen beobachtet werden, welche bei einem längeren Spritzvorgang sicher Funktionsstörungen zur Folge hätten.

6.7.1. Mineralische Bindemittel

Die Versuche mit mineralischen Bindemitteln (verschiedenen Zementen, Wasserglas und Kauster) ergaben durchwegs enttäuschende Ergebnisse hinsichtlich der erreichten mechanischen Eigenschaften. Die mineralisch gebundenen Dämmschichten entwickelten im

Trockenzustand geringe Festigkeiten. Der Grund dafür liegt wahrscheinlich in der enormen Feuchtigkeitsaufnahmekapazität der Zelluloseflocken. Die Dämmschichten saugen das verfügbare Wasser wie ein Schwamm auf und halten es fest. Der Wassergehalt einer aufgespritzten Dämmschicht kann durchaus über 100 % betragen, ohne dass ein Wassertropfen sichtbar wäre. Erst durch Auspressen wird die tatsächlich vorhandene Wassermenge sichtbar.

In Kombination mit mineralischen Bindemitteln ist dieser Umstand ein großer Nachteil, weil zu wenig freies Wasser verfügbar ist, welches für das eigentliche Abbinden benötigt wird. Die mineralischen Bindemittel „verbrennen“ quasi im Zuge des Aushärtens.

Aus diesem Grund scheint die Verwendung von mineralischen Bindemitteln nur in Kombination mit einer vorhergehenden Hydrophobierung der Zelluloseflocken sinnvoll.

Da die Entwicklung einer geeigneten Hydrophobierung für Zelluloseflocken nicht Gegenstand dieses Forschungsprojektes war, wurden keine weiteren Versuche mit mineralischen Bindemitteln durchgeführt.

Unmittelbar vor Redaktionsschluß des Berichts konnten Zelluloseflocken ausfindig gemacht werden, die bereits werkseitig hydrophobiert waren. In Zukunft wird der Frage der Eignung dieser Flocken für den konkreten Anwendungsfall besonderes Augenmerk zu schenken sein.

6.7.2. Organische Bindemittel

Gute Ergebnisse konnten mit organischen Bindemitteln erzielt werden. Es wurden insbesondere Versuche mit Guar-Gum, Jaguar, verschiedenen Stärken und Methyl-Zellulosen durchgeführt.

Verfahrenstechnische Probleme wie Verstopfung von Düsen und Pumpe, Verkrustungen in Mischköpfen, mangelnde homogene Einmischung

sowie unzureichende Zerstäubung treten besonders bei der Einbringung von Bindemittellösungen in den luftgeförderten Zelluloseflockenstrom auf. Aus diesem Grund wurde ein Verfahren entwickelt, welches auf Flockenmischungen mit bereits produktionstechnisch beigemengten Bindemitteln aufbaut. Die Durchfeuchtung wurde im Sprühverfahren mit reinem Wasser durchgeführt.

6.7.3. Thermoplastische Bindemittel

Thermoplastische Bindemittel wurden vor allem für Screening Versuche verwendet, welche darüber Aufschluss geben sollten, ob diese Art der Bindung prinzipiell realisierbar wäre.

Es wurden sowohl pulver- als auch faserförmige Thermoplaste (Polyethylen-PE, Polypropylen-PP) in verschiedenen Konzentrationen in die Flockenmatrix eingemischt. Anschließend wurden die Probekörper in einem Trockenschrank erwärmt bis im Kern der Dämmschichte die erforderliche Schmelzpunkttemperatur von 130 - 140 °C erreicht wurde. Diese ersten Versuche haben gezeigt, dass sich Thermoplaste prinzipiell zur Bindung von Zellulosefasern eignen. Die erforderlichen Temperaturen und Verweilzeiten bedingen allerdings einen nicht unerheblichen gerätetechnischen Aufwand. Daher scheinen diese Bindemittel vor allem für die industrielle Herstellung von Dämmplatten interessant zu sein.

6.8. Austrocknungsverhalten einer 8 cm dicken Zellulosedämmschicht

Eine Testwand wurde mit einer 8 cm dicken Zellulosedämmschicht versehen. In verschiedenen Zeitabständen wurden an verschiedenen Stellen der Wand Proben entnommen und die Wassergehalte bestimmt. Die Trocknung der Zellulosedämmschicht erfolgte vorwiegend einseitig an der offenliegenden Seite. Die tiefergelegenen

Dämmstoffschichten trockneten nur sehr langsam ab und erreichten erst nach etwa vier Wochen die Ausgleichsfeuchte von 10 %. An der Oberfläche bildete sich bereits nach ca. einer Woche eine relativ trockene Schicht, welche wie eine Membran den weiteren Feuchtigkeitsaustausch aus der inneren der Dämmschicht verlangsamte.

Der Trocknungsprozess wurde in einem Innenraum durchgeführt, welcher ein Temperaturniveau von ca. 24 °C aufwies.

Obwohl das Trocknungsverhalten bei diesen Randbedingungen nicht unmittelbar auf eine Wand im Außenbereich übertragen werden kann, liefert

diese Untersuchung gute Erkenntnisse. An einer Außenwand sind insbesondere Windbewegungen zu erwarten, welche den Abtransport der Feuchte beschleunigen. Von höherer Bedeutung für die Austrocknung an Wandaußenflächen sind aber Niederschläge und eventuell Kondensation der Luftfeuchte (Tauanfall), welche die Zellulosedämmschicht wieder befeuchten.

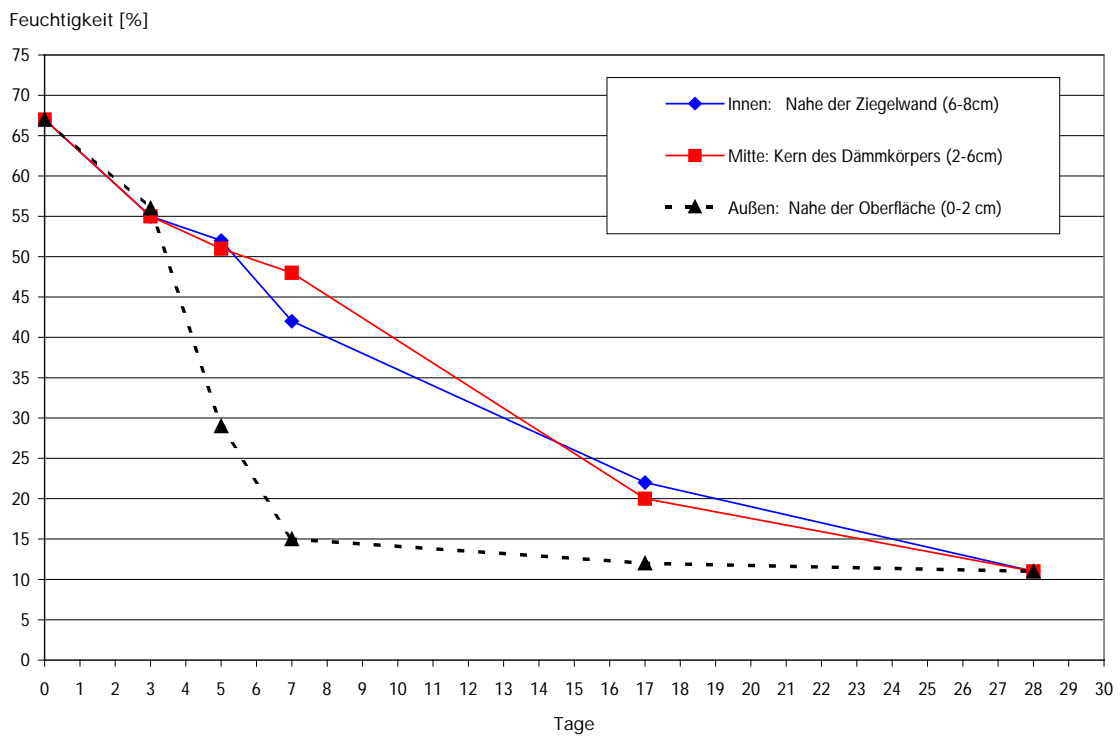


Abb. 39 Trocknungsverhalten einer auf eine Ziegelwand aufgespritzten Zellulosedämmschicht von 8 cm Dicke

Der Trocknungszeitraum dieser 8 cm dicken Dämmschichte von 28 Tagen stimmt mit der Putz-Faustregel „sieben Tage Standzeit je cm Putzdicke“ gut überein und liegt im Vergleich zu üblichen Dicken bei Wärmedämmputzen von 3 - 5 cm durchaus im baupraktisch akzeptierten Bereich.

7. Probekörper

7.1. Herstellung von Rohlingen für Prüfkörper

Da die Gewinnung homogener Probekörper aus den mobilen Wandelementen aufgrund der beschriebenen Probleme nicht im gewünschten Ausmaß möglich war, wurde die Herstellung im „Labormaßstab“ versucht.

7.1.1. Herstellung von Proben mittels Bedampfung im Labor

Die erste Charge der Probekörper wurde im Labor unter Verwendung eines geschlossenen Wasserdampf-Systems hergestellt. Es sollte eine relativ gleichmäßige Durchfeuchtung der Dämmstoffflocken unter kontrollierten Randbedingungen erfolgen. Dabei wurden die Zelluloseflocken in einen Autoklaven (Dampf-Sterilisator) eingebracht und über eine Zeitspanne von ca. 24 Stunden bei einem Druckniveau von 1 bar und 121 °C mit Wasserdampf beaufschlagt. Dabei nahmen die Flocken die bereitgestellte Feuchtigkeit wie ein Schwamm auf. Durch die geringe Lagerungsdichte im Autoklaven wurde eine relativ gleichmäßige Durchfeuchtung erzielt. Nach dem Bedampfen erfolgte eine Pressung unter geringer Kraftaufwendung um die Dichte zu erhöhen. Die Bilderserie zeigt die einzelnen Schritte der Herstellung.

Die mit dieser Herstellungsweise gewonnenen Proben wurden auf ihre Wärmeleitfähigkeit untersucht (Probe Charge 00).

In weiterer Folge wurde versucht, das beschriebene Verfahren zur Herstellung einer größeren Serie von Probekörpern anzuwenden, welche für die systematischen Versuche hinsichtlich verschiedener Bindemittel bzw. Konzentrationen notwendig war. Dazu wurde ein größerer Autoklav adaptiert, um Probekörper mit größeren Abmessungen zu



Abb. 40 Autoklav zur Probenherstellung

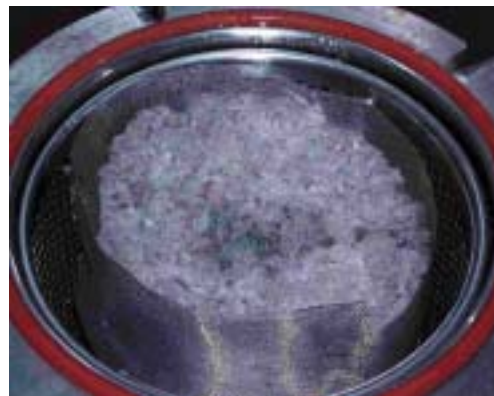


Abb. 41 Zelluloseprobekörper nach der Bedampfung



Abb. 42 Herstellung plattenförmiger Prüfkörper

erzeugen. Mit dem größeren Bedampfungssystem wurden mehrere Prüfkörper hergestellt, welche hinsichtlich der Durchfeuchtung jedoch stark inhomogen waren. Die Vergrößerung des Probekörpervolumens verursachte eine ungleichmäßige Aufnahme des Wasserdampfes. Die nachgeschaltete Pressung zur Erhöhung der Dichte der Dämmkörper erzeugte bei den großen Probevolumina zusätzliche Scherflächen bzw. Schichtungen, welche bereits mit freiem Auge erkennbar waren. Bei Belastung waren die lokalen Inhomogenitäten Ausgangspunkt von progressiv fortschreitenden Bruchflächen. Aus diesem Grund wurde davon Abstand genommen, Prüfkörper nach diesem Verfahren zu erzeugen. Die Anwendung des kleineren Autoklaven zur Herstellung von Prüfkörpern in großer Stückzahl war aufgrund des erzeugbaren Volumens bzw. des erforderlichen Zeitaufwandes nicht zielführend.

7.1.2. Herstellung von Proben im Auspritzverfahren

Die Erhöhung des Druckes bei der Flüssigkeitszugabe über das normalerweise beim CSO-Verfahren verwendete Druckniveau, sowie die Veränderung der Geometrie des Sprühkopfes hatte ein besseres Zerstäuben des Wassers in kleine Wasserteilchen bzw. einen Sprühnebel zur Folge. Durch den höheren Druck wurde die Strahllänge vergrößert, wodurch ebenfalls eine bessere Vermischung zwischen Flocken und flüssigem Medium ermöglicht wurde. Im Vergleich mit den bis dato verwendeten Verfahren war diese Sprühanordnung hinsichtlich der Homogenität der erzeugten Durchfeuchtung deutlich besser. Deshalb wurden die Probekörper für die Laboruntersuchungen mit dem beschriebenen Verfahren hergestellt.

Die Zugabe der Bindemittel erfolgte in den meisten Fällen getrennt von der Wasserzugabe, da die Bindemittel pulverförmig vorlagen. Die Bindemittel

wurden durch Umluft-Umwälzung der Zelluloseflocken kontinuierlich beigemischt. Nachgeschaltet war immer eine längere Phase der Homogenisierung durch längeres Umwälzen. Einige Bindemittel wurden auch im Zuge des Produktionsprozesses der Flockenmatrix eingemischt. Die Kontrolle der Einmischung durch ein farbles Indikatorverfahren ergab eine sehr homogene Verteilung innerhalb der Zellulosematrix. Der Ansprühvorgang zur Herstellung der Rohlinge für die Proben erfolgte unter möglichst gleichbleibenden Randbedingungen. Folgende Parameter wurden möglichst konstant gehalten:

- ## Wasserdruck und Düsengeometrie
- ## Fördermenge an Zelluloseflocken
- ## Verteilung des Bindemittels in der Flockenmatrix

Bei der Herstellung der Rohlinge für die Gewinnung der Prüfkörper wurden unterschiedliche Bindemittel mit verschiedenen Konzentrationen verwendet. Das Sprühverfahren an sich wurde in zwei Variationen durchgeführt:

- ## großzügige Zugabe von Wasser zur Gewährleistung einer durchdringenden Befeuchtung; dabei wurden Feuchten von ca. 60 bis 70 % erreicht
- ## reduzierte Wassermenge (Feuchte ca. 50 %); der dabei entstehende Marmorierungseffekt wurde toleriert

Neben dem Hochdruck-Aufspritzverfahren wurde noch ein weiteres Verfahren verwendet:

Schaumverfahren

Dazu wurde ein Schaumprühkopf in Kombination mit schaubildenden Klebemitteln verwendet, um Zelluloseflocken in einen Klebeschaum einzumischen. Dieses Verfahren erzeugte eine Dämmschicht mit relativ niedriger Dichte und Feuchte, welche relativ homogen in die Flockenmatrix eingetragen worden war.

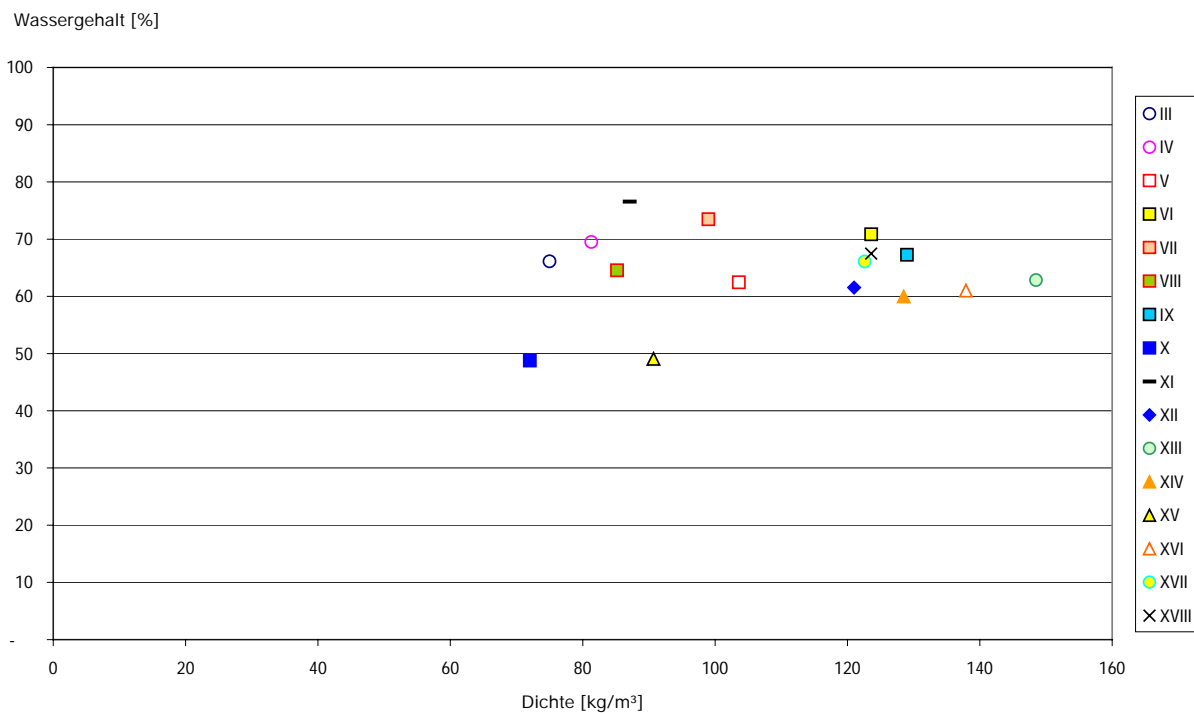


Abb. 43 Mittelwerte von Wassergehalt und Dichte der einzelnen Probekörperserien

In Abb. 43 sind die verschiedenen Proben hinsichtlich der Parameter Dichte und Wassergehalt zusammengefaßt. Bei dem Großteil der Proben lag der Wassergehalt unmittelbar nach dem Aufspritzen zwischen 60 und 70 %. Bei den dargestellten Wassergehalten handelt es sich um errechnete Mittelwerte auf Basis eines errechneten Trockengewichtes der jeweiligen Probekörperrohlinge. Die erzeugten Dichten der Proben variieren deutlich zwischen 80 und 150 kg/m³. Die Variation der Dichten war nicht beabsichtigt, sondern es wurde vielmehr versucht, vergleichbare Prüfkörper zu erzeugen. Die Variabilität der Dichten dürfte durch das Sprühverfahren selbst verursacht worden sein. Bis auf eine Ausnahme (XI) wurden die in Abb. 43 dargestellten Proben mit dem Hochdruckverfahren hergestellt.



Abb. 44 Aufgespritzte Zelluloserohlinge für die Gewinnung von Probekörpern in der Umlufttrockenkammer

7.1.3. Trocknung der Rohlinge

Die Rohlinge wurden in Holzkästen (70 x 40 cm) mit einer Bodenplatte aus Lochblech eingesprüht, und mittels eines Rotationsabzugsgerätes (Bürste) auf eine Dicke von 8 cm planparallel zur Bodenplatte abgezogen. Die Trocknung der Probekörper erfolgte im Umluftverfahren über ein Kondensations-Entfeuchtungsgerät bei einem mittleren Temperaturniveau von 38 °C. Die Abmessungen der Probekörper leiteten sich von der Größe der zur Verfügung stehenden Trockenkammer ab.

Der Wassergehalt jeder einzelnen Probe wurde zum Zeitpunkt des Aufspritzvorgangs anhand des Oversprays, welcher beim Bürsten anfällt, bestimmt. Dieser Wert kann nicht als Absolutwert gesehen werden, sondern ergibt einen Anhaltspunkt.

Die lokalen Wassergehalte können in Abhängigkeit von der erzielten örtlichen Benetzung der Probenmatrix deutlich schwanken.

Das Trocknungsverhalten der einzelnen Rohlinge wurde durch eine Messreihe dokumentiert, welche in Abb. 45 graphisch dargestellt ist. Die Messpunkte zeigen das aktuelle Gewicht einer Probe zu einem spezifizierten Zeitpunkt. Das Probengewicht wurde in Prozent des ursprünglich feuchten Ausgangsgewichtes angegeben.

Der Graph zeigt, dass sich nach ca. 120 Stunden (5 Tagen) im Probekörper ein Trockenzustand einstellt. In weiterer Folge ändert sich der Wassergehalt bzw. das Gewicht nur mehr gering. Zu diesem Zeitpunkt stellt sich in der Probe ein Wassergehalt von ca. 8 - 10 % ein, welcher der üblichen Ausgleichsfeuchte der Zellulosedämmung entspricht.

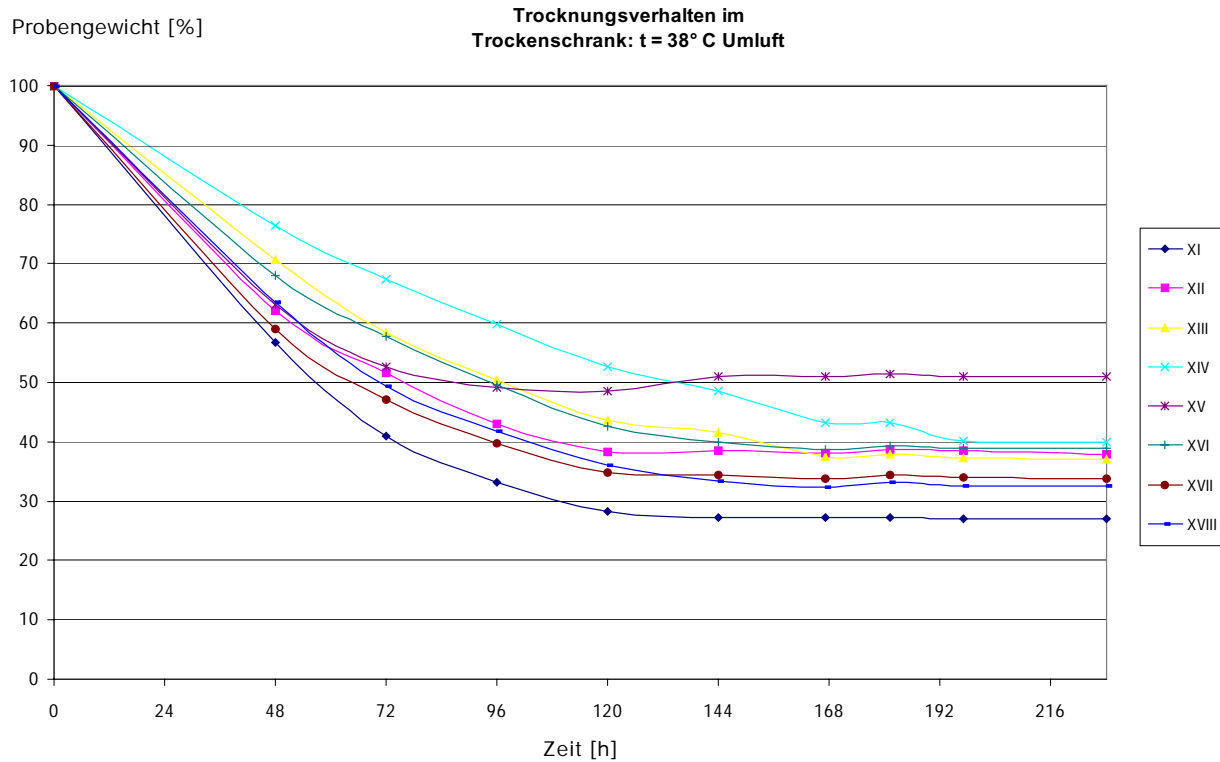


Abb. 45 Trocknungsverlauf für die Rohlinge der Proben XI - XVIII

Die Bestimmung der Zugfestigkeit normal zur Probenebene wurde mit diesen Proben durchgeführt. Die ausgewiesenen Dichte-Werte der einzelnen Proben beziehen sich auf den Wassergehalt von 10 %. Eine Trocknung der Proben auf Massekonstanz bei 105 °C wurde nicht durchgeführt, da Versuche ergeben haben, dass sich dieser Trockenvorgang über viele Tage bis Wochen hinziehen kann. Andererseits ist der so erzielte Trockenzustand nur von kurzer Dauer, da sich bei Lagerung unter normalen Raumbedingungen wieder eine Ausgleichsfeuchte von ca. 10 % einstellt. Im übrigen sind die innerhalb einer Schicht aufgrund des Aufspritzvorganges auftretenden Schwankungen in ihrer Auswirkung auf die Dichte größer zu bewerten, als der entstehende „Fehler“ durch die Vereinfachung bei der Dichtebestimmung.

7.2. Gewinnung der Prüfkörper aus den Rohlingen

Aus den auf ca. 10 % Wassergehalt getrockneten Proben wurden in weiterer Folge Prüfkörper für die Laboruntersuchungen erzeugt. Dazu wurden mittels einer Kreissäge Quader mit den Abmessungen 8 x 8 cm gewonnen und auf eine Dicke von 3,5 cm zugeschnitten. Prüfkörper mit ersichtlichen Inhomogenitäten oder Schwachstellen wurden von Beginn an ausgeschieden.

8. Materialprüfung

8.1. Grundlagen

Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) werden zur Zeit ausschließlich aus industriell gefertigten, plattenförmigen Dämmstoffen hergestellt. Diese werden mittels Verklebung und ggf. zusätzlicher Verdübelung an der Außenwand befestigt und mit armierten ein- oder mehrlagigen Putz-Deckschichten beschichtet.

Aufgrund der Tatsache, dass sich die bestehenden Prüfnormen auf plattenförmiges Material beziehen, wurden im Labormaßstab aus dem Standard-Zellulosematerial unter Beigabe verschiedener Bindemittelmischungen plattenförmige Prüfkörper hergestellt und nach den unten stehenden Normen geprüft.

Die Materialprüfungen wurden am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung der TU Graz - Vorstand O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmuth Geymayer - durchgeführt.

Als Grundlage für die Prüfungen der Zellulosedämmung wurden folgende Normen verwendet:

ÖNORM B 6010

Dämmstoffe für den Wärme- und/oder Schallschutz im Hochbau, Prüfmethode (01/99)

ÖNORM B 6015-1

Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät – Durchführung und Auswertung (12/89)

ÖNORM B 6015-2

Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät – Ermittlung der baustoffspezifischen Wärmeleitfähigkeit (09/00)

ÖNORM B 6015-3

Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät - Weiterbehandlung der Meßwerte geschichteter Materialien für die Anwendung im Bauwesen (12/91)

ÖNORM B 6015-5

Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät - Ermittlung des Nennwertes der Wärmeleitfähigkeit für Dämmstoffe (03/90)

ÖNORM B 6035

Dämmstoffe für den Wärme- und/oder Schallschutz im Hochbau, Gebundene Mineralwolle MW (11/00)

ÖNORM B 6100

Außenwand-Wärmedämm-Verbundsysteme, Prüfverfahren (10/98)

ÖNORM EN 826

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen, Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung (07/96)

ÖNORM EN 1602

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen, Bestimmung der Rohdichte (02/97)

ÖNORM EN 1607

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen, Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene (02/97)

ÖNORM EN 1608

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen, Bestimmung der Zugfestigkeit in Plattenebene (02/97)

ÖNORM EN 12090

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen, Bestimmung des Verhaltens bei Scherbeanspruchung (09/97)

ÖNORM EN 12429

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen,
Einstellen der Ausgleichsfeuchte bei
definierten Temperatur- und
Feuchtebedingungen (12/98)

ÖNORM EN 12430

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen,
Bestimmung des Verhaltens unter Punktlast
(12/98)

ÖNORM EN 13494

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen,
Bestimmung der Haftzugfestigkeit zwischen
Kleber und Wärmedämmstoff sowie zwischen
Unterputz und Wärmedämmstoff; Entwurf
(05/95)

8.2. Versuchsdurchführung

Die Probekörper der Serie 0 wurden in Anlehnung an ÖNORM B 6035 Dämmstoffe für den Wärme- und/oder Schallschutz im Hochbau, gebundene Mineralwolle MW (11/00, Tabelle 6, MW-PT) bzw. gemäß ÖNORM B 6010 Dämmstoffe für den Wärme- und/oder Schallschutz im Hochbau, Prüfmethode (01/99) geprüft.

Verwendet wurde eine Universalprüfmaschine der Type Messphysik (Shimadzu) mit einem Lastbereich von 0 bis 100 kN und einer Kraftmesszelle EDC5KN von 0 bis 5 kN, einstellbarer konstanter Vorschubgeschwindigkeit und der Möglichkeit, die Kraft auf 1 % Genauigkeit zu messen.

Da für Zellulosedämmstoffe keine Produktnorm vorliegt, konnten die Abmessungen und die Auswahl der Probekörper gemäß den jeweiligen Prüfnormen frei gewählt werden. Aus produktionstechnischen Gründen wurden die Probekörper in den Abmessungen 8 x 8 cm und 3,5 cm Dicke hergestellt.



Abb. 46 Zug-/Druckprüfmaschine

Mit den Probekörpern der Charge 0 wurden folgende Versuche durchgeführt:

≠ Bestimmung der Druckspannung bei 10% Stauchung nach ON EN 826

Bei dieser Prüfung werden in der Probenvorbereitungsphase die fünf Prüfkörper gemäß der oben genannten Norm vor der Prüfung sechs Stunden im Normklima bei 23 °C/50 % r. F. gelagert. Danach werden die Proben vermessen und die Ebenheit, sowie die Rechtwinkeligkeit bestimmt. In weiterer Folge werden gewogene 8 mm dicke Metallplatten auf die Ober- und Unterseite der Proben mittels Zweikomponentenkleber aufgebracht, wobei darauf zu achten ist, dass der Kleber seitlich nicht die Probe benetzt, da die Steifigkeit im Randbereich erhöht, und der Prüfquerschnitt somit verringert wird. Die Probe wird zentrisch in die Zug/Druckprüfmaschine eingebracht und die Proben entsprechend der Norm belastet. Die Lasteinleitung erfolgt dabei mittig mit einem Stempel. Die Bestimmung der Druckspannung erfolgt in graphischer Ausführung gemäß Norm.

≠ Zugfestigkeit normal zur Probenebene gemäß ON EN 1607

Als Zugfestigkeit normal zur Probenebene [in kPa] wird die während des Zugvorganges ermittelte größte Zugkraft [in kN] senkrecht zur Oberfläche dividiert durch die Querschnittsfläche des Probekörpers [in m²] bezeichnet. Die Probenvorbereitung erfolgt wie oben erwähnt. Beim Zugversuch sind die oben erwähnten Metallplatten über eine zentrische Gewindebohrung an der Ober- und Unterseite mit jeweils einem Kardangelenk verbunden.



Abb. 47 Bestimmung der Druckspannung
Unter der Probe ist ein Kugelkalotten-Auflager zur zentrischen Lastverteilung zu sehen



Abb. 48 Bestimmung der Zugfestigkeit normal zur Probenebene



Abb. 49 Bestimmung der Zugfestigkeit in Probenebene

Das zweite Ende des Gelenkes wird in der Zug/Druckprüfmaschine mit Bolzen fixiert, so dass durch die Gelenke ein mittiges Ausrichten der Probe und eine zentrische Lasteinleitung ermöglicht wird. Anschließend werden die beiden Platten mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/min auseinandergezogen. Der tatsächliche Bruch findet am Gipfel einer Glockenkurve statt (Abb. 52).

≠ Zugfestigkeit in Probenebene nach ON EN 1608

Die Zugfestigkeit in Probenebene ist im Prinzip gleich wie jene nach ON EN 1607, der Unterschied liegt in der Form der Probe für die eine eigene Vorrichtung zum Einbau in die Prüfmaschine erforderlich ist.

≠ Abscherung nach ON EN 12090

Bei dieser Prüfung werden zwei Proben benötigt, auf die jeweils links und rechts eine Preßspanplatte aufgeklebt wird. Die Proben werden in die Vorrichtung zentrisch eingebaut. Mit einer Lasche wird mittig jeweils eine Platte herausgezogen, während die zweite Platte festgehalten wird. Es kommt somit zur Abscherung der Proben.

8.3. Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden den Anforderungen an gebundene Mineralwolle gemäß ÖNORM B 6035 gegenübergestellt, da die Zellulosefaserdämmung bezüglich der Materialstruktur der Dämm-Materialien, für die Produktnormen existieren, am ehesten mit der Mineralfaserdämmung „verwandt“ ist. Zu Vergleichszwecken wurden Probekörper einer handelsüblichen Steinwolle-Putzträgerplatte in denselben Abmessungen und nach derselben



Abb. 50 Bestimmung der Scherfestigkeit

Methode auf Zugfestigkeit normal zur Probenebene geprüft.

Die Messergebnisse für die Probe 0 sind in folgender Tabelle zusammengefasst und beschreiben, abgesehen von Zeile 9 und 12 jene Punkte, die gemäß ÖNORM B 6035 für Mineralwolle Putzträgerplatten MW-PT zu erfüllen sind.

	Dämmstoffeigenschaft		Ist-Wert	Soll-Wert gemäß ÖNORM B 6035	Bezugsnorm ÖNORM B
1	Allgemeine Beschaffenheit, Ebenheit		-	-	EN 825
2	Länge und Breite		35 x 35 cm	∂ 2 mm	EN 822
3	Dicke		3,4 cm	+ 5mm 4 2mm	EN 823
4	Rechtwinkeligkeit		-	Ω4mm/m	EN 824
5	Rohdichte	ρ	98 kg/m ³	∂ 15% od. ∂ 2,5 kg/m ³ v. Nennrodichte	EN 1602
6	Wärmeleitfähigkeit 10°, trocken	$\zeta_{10, tr}$	0,043 W/mK ¹⁾	-	6015-1
	Baustoffspezifischer Zuschlag	Z_b	20 %	-	6015-2
	Baustoffspezifische Wärmeleitfähigkeit	ζ_b	0,052 W/mK	-	6015-2
7	Brandverhalten		B2/B1	unbeschichtete Produkte: A, Q1, Tr1	3800-1
8	Wasserdampf-Diffusionswiderstand (ungeb. Material)	σ	1 - 2	1 – 1,2	EN 12086
9	Zugfestigkeit in Probenebene (bei MW-PT nicht erf.)	ω	78,0 kPa	-	EN 1608
10	normal zur Probenebene	ω_{nt}	12,0 kPa	Ø12,0 kPa	EN 1607
11	Druckspannung bei 10% Stauchung	ω_{10}	55,0 kPa	Ø30,0 kPa	EN 826
12	Scherfestigkeit (bei MW-PT nicht erforderlich)	ϑ	29,0 kPa	-	EN 12090

¹⁾ Die Wärmeleitfähigkeit $\zeta_{10, tr}$ des ungebundenen Zellulosedämmstoffes beträgt 0,033 W/mK

Anmerkung:

Der baustoffspezifische Zuschlagswert Z_b trägt der Zunahme der Wärmeleitfähigkeit durch Feuchtigkeitsaufnahme und Alterung Rechnung. Er kann sich länderspezifisch stark unterscheiden (zB Deutschland, Schweiz) und das im Widerspruch zur physikalischen Realität [28]. Der baustoffspezifische Zuschlagswert beträgt zB in Deutschland für Zellulosedämmstoffe nur 10 %.

Eine diesbezügliche Anpassung des österreichischen Wertes ist laut Herstellerangaben geplant.

Der produktbezogene Nennwert der Wärmeleitfähigkeit wird für die Berechnung des Wärmedurchlasswiderstandes von Baustoffschichten herangezogen. Dies setzt voraus, dass das zur Anwendung kommende Produkt eines Erzeugers bereits feststeht.

Der Nennwert der Wärmeleitfähigkeit ζ_n ergibt sich aus dem Wert der baustoffspezifischen Wärmeleitfähigkeit ζ_b mit zusätzlicher Berücksichtigung der Streuungen aus Produktionsschwankungen und wird für Dämmstoffe gemäß ÖNORM B 6015-5 ermittelt.

Der erzielte Wert für die baustoffspezifische Wärmeleitfähigkeit ζ_b von 0,052 W/mK ist mit großer Wahrscheinlichkeit noch - wie bei anderen Dämmstoffen auch - durch weitere Produktentwicklung zu optimieren.

Hinsichtlich der restlichen Bindemittelvarianten wurden die Materialprüfungen vorerst auf die Ermittlung der Zugfestigkeit normal zur Plattenebene als dem sensibelsten Kriterium für faserförmige Dämmstoffe beschränkt. Dies vor allem deshalb, weil es nicht sinnvoll erschien, das gesamte Messprogramm für jede Variante durchzuführen, bevor nicht die Auswahl der Bindemittel auf ein oder zwei optimale Mischungen eingegrenzt wurde.

8.4. Zugversuche normal zur Probenebene

In einem nächsten Schritt wurden 16 weitere Probekörperserien auf Zugfestigkeit normal zur Probenebene geprüft, um die Auswahl der Bindemittelvarianten und -konzentrationen eingrenzen zu können, mit denen anschließend das gesamte Prüfprogramm der Serie 0 durchgeführt werden soll.

Die Ermittlung der Zugfestigkeit besteht aus fünf Parallelversuchen, aus welchen der arithmetische Mittelwert gebildet wurde. Die Prüfproben selbst repräsentieren eine Auslese der besten fünf Prüfkörper jeder Serie nach optischen Gesichtspunkten. Prüfkörper, welche offensichtliche Mängel hinsichtlich ihrer Homogenität aufwiesen, wurden von Beginn an ausgeschlossen.

In einer ersten Untersuchung betreffend der Größe der erforderlichen Prüfkörper wurden die Zugfestigkeiten an Prüfkörpern derselben Charge mit einer Größe von 15 x 15 cm und 8 x 8 cm ermittelt. Die Dicke der geprüften Schicht war in beiden Fällen produktionstechnisch mit 3,5 cm vorgegeben. Es zeigte sich, dass die Mittelwerte der drei besten gemessenen Zugfestigkeitswerte der beiden Serien gleich groß war.



Abb. 51 Prüfkörper 8 x 8 und 15 x 15 cm

PROBE XII	Zugfestigkeit α_{mt} [kPa]			
	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Mittel
Probe 15 x 15 x 3,5cm	23	26	19	23
Probe 8 x 8 x 3,5 cm	26	25	18	23

Da kein signifikanter Unterschied der Messwerte durch die Größe des Messquerschnitts zu erkennen war, wurden für die weiteren Zugfestigkeitsversuche Probekörper der Größe 8 x 8 x 3,5 cm verwendet.

Durch die kleineren Abmessungen konnte eine größere Stückzahl an Prüfkörpern gewonnen werden, wodurch eine bessere Auswahlmöglichkeit für die Versuche gegeben war.

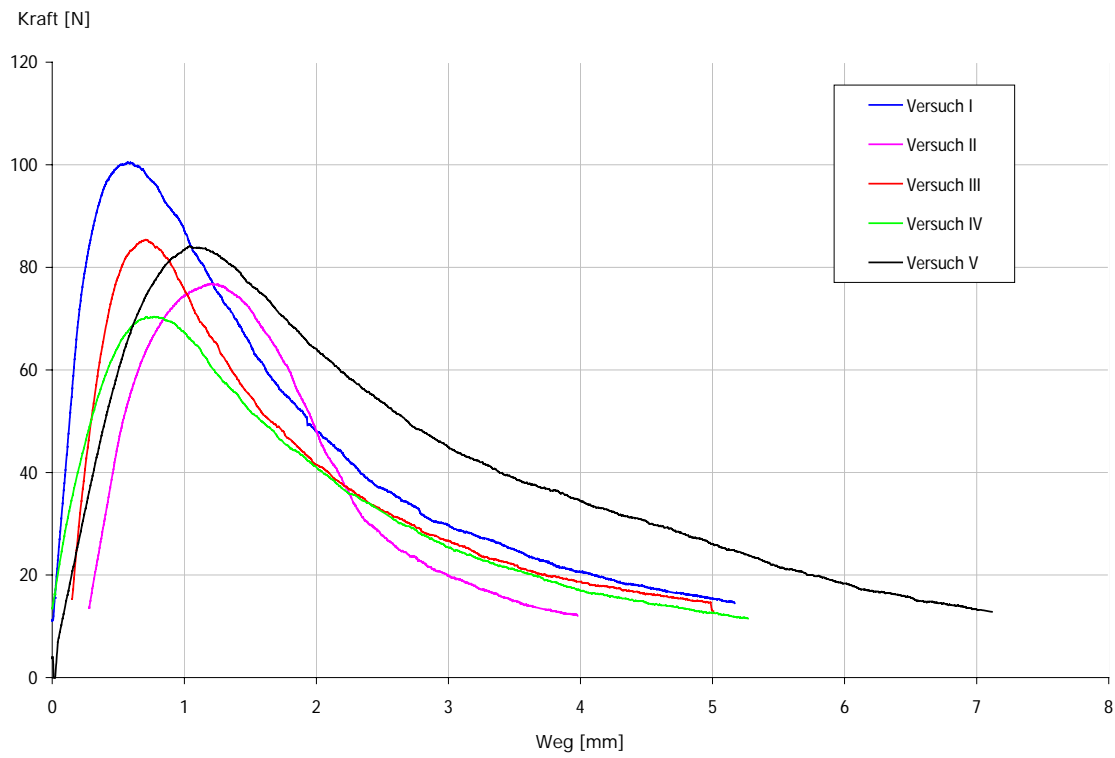


Abb. 52 Kraft-Dehnungs-Verhalten der Prüfkörper von Probe 0



Abb. 53 Eingebauter Zelluloseprüfkörper vor dem Lastspiel



Abb. 54 Eingebauter Zelluloseprüfkörper nach dem Lastspiel

Probe Nr.	Mittelwert [kPa]	Wert 1 [kPa]	Wert 2 [kPa]	Wert 3 [kPa]	Wert 4 [kPa]	Wert 5 [kPa]
I	2,47	2,79	2,30	2,33	-	-
V	4,07	5,33	3,87	5,26	3,45	2,43
IV	4,17	5,27	5,64	3,56	1,96	4,41
VI	8,37	4,61	6,88	7,35	11,00	12,00
VIII	3,46	1,66	4,26	4,08	5,48	-
IX	5,66	4,83	6,43	1,82	5,55	9,65
XI	3,49	3,73	3,74	3,74	2,76	-
	20,00	18,00	25,00	13,00	26,00	17,00
XIII	9,60	8,02	14,00	9,00	8,43	8,54
XIV	19,00	19,00	14,0	21,00	24,00	19,00
XV	11,00	17,00	7,59	9,79	14,00	8,93
XVI	10,00	11,00	7,97	7,53	16,00	8,76
XVII	6,44	6,82	8,00	7,87	7,21	2,31
XIX	2,33	2,14	3,22	1,80	2,17	-
XX	9,46	9,00	9,60	9,77	-	-
	54,60	67,00	56,00	39,00	66,00	45,00

Abb. 55 Zugfestigkeiten normal zur Probenebene der einzelnen Prüfkörperserien

Die Zugfestigkeiten normal zur Probenebene der einzelnen Probekörperserien sind in Abb. 55 zusammengefasst. Die hinterlegten Zeilen bezeichnen diejenigen Serien, die die gemäß ÖNORM B 6035 für Mineralwolle MW-PT erforderlichen Werte überschreiten.

Die Tabelle verdeutlicht die große Schwankungsbreite der einzelnen Messwerte für Proben der gleichen Charge. In manchen Fällen ist der beste gemessene Wert doppelt so hoch wie der kleinste Messwert der Serie. Dieses Faktum zeigt deutlich die lokalen Unterschiede der mechanischen Eigenschaften auf, welche durch Schwankungen im inneren Aufbau des Zellulosedämmkörpers verursacht wurden. Die Gründe dafür sind in der Verfahrenstechnik des Aufsprühens zu suchen.

Die Mittelwerte der Zugfestigkeit normal zur Probenebene und die Dichten der einzelnen Proben sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

Probe	Dichte [kg/m ³]	Zug [kPa]
0	98,00	12,00
I	76,60	2,47
IV	81,30	4,17
V	103,60	4,07
VI	123,60	8,37
VIII	85,20	3,46
IX	129,00	5,66
XI	87,10	3,49
XII	121,00	20,00
XIII	148,50	9,60
XIV	128,50	19,00
XV	90,70	11,00
XVI	137,90	10,00
XVII	122,60	6,44
XIX	70,00	2,33
XX	154,20	9,46
XXI	132,90	54,6

Abb. 56 Dichten und Zugfestigkeiten der Proben

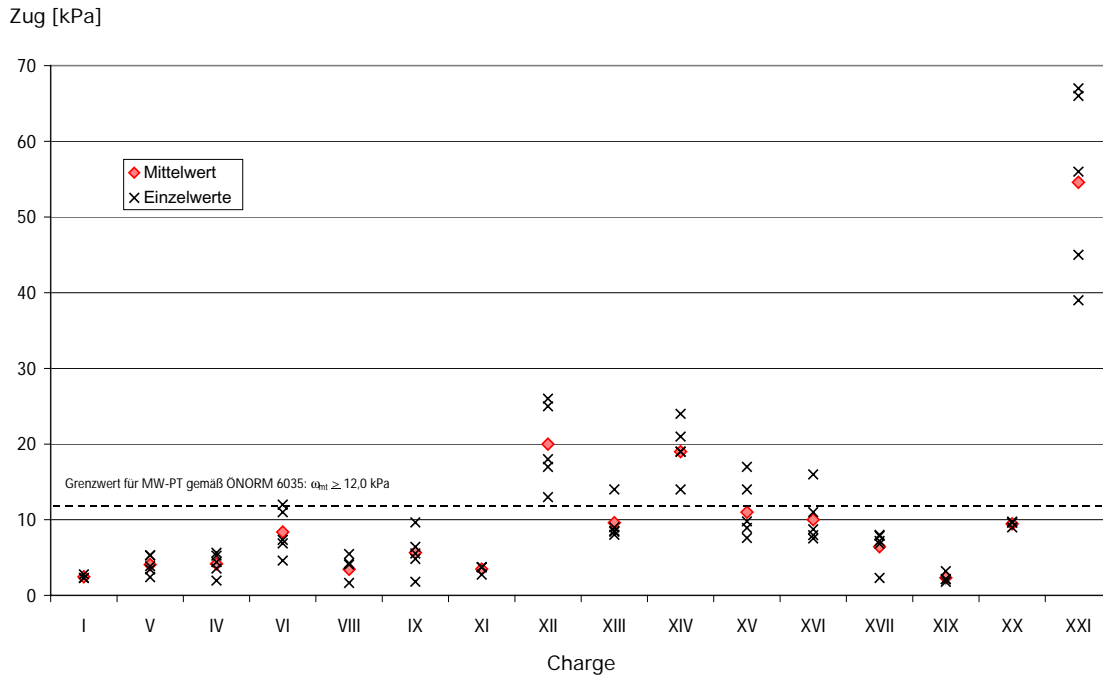


Abb. 57 Streuung der Zugfestigkeitswerte normal zur Probenebene

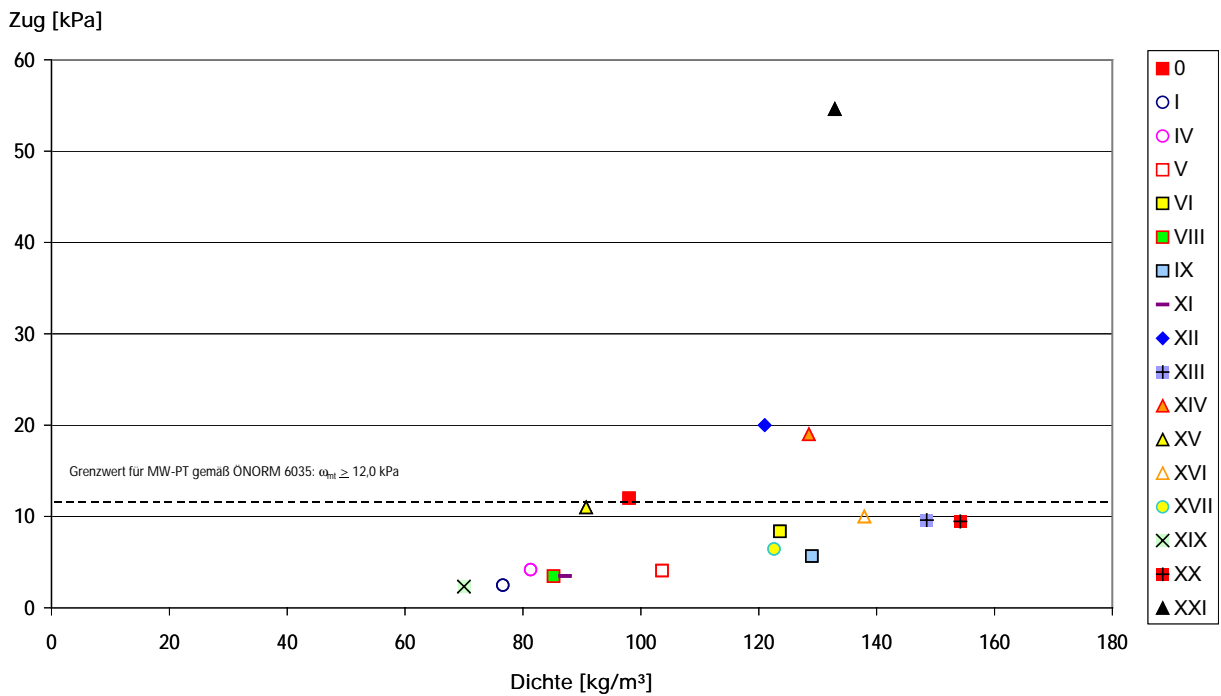


Abb. 58 Mittelwerte der Zugfestigkeiten normal zur Probenebene im Vergleich zur Dichte

Bei der Interpretation des Zugfestigkeitswerts muss berücksichtigt werden, dass zwischen Dichte und mechanischen Eigenschaften von Proben derselben Bindemittelart bzw. -konzentration ein allgemeiner Zusammenhang besteht. Weiters können die Zugfestigkeitswerte verschiedener Proben mit stark unterschiedlichen Dichten nicht unmittelbar miteinander verglichen werden.

In Abb. 57 und Abb. 58 ist der Grenzwert von 12,0 kPa für die Zugfestigkeit normal zur Probenebene für Mineralfaserplatten MW-PT (laut ÖN B 6035) als Relationsgröße eingetragen. Dieses Produkt ist eine Dämmplatte, welche mittels Dübelsystem an der Wand befestigt wird und auch als Putzträger fungiert. Zu Vergleichszwecken wurde auch eine Steinwollendämmplatte (Probe XX), die oben genannter Norm entspricht, geprüft.

Die besten Zugfestigkeitswerte für bindemittelgebundene Zellulosedämmstoffe wurden für die Probe XXI gemessen. Der Mittelwert von 54,0 kPa überschreitet die Zugfestigkeit der anderen Proben deutlich. Der Bindemittelanteil in dieser Probe ist allerdings ebenfalls um ein Vielfaches höher als in den anderen Proben.

Die unteren Werte bilden Zellulosedämmschichten, welche mit reinem Wasser aufgespritzt wurden (Probe I und IV). Die Zugfestigkeiten von schaumgespritzten Proben (XIX) liegen ungefähr auf ähnlichem Niveau, allerdings bei geringerer Dichte.

Die Messpunkte der Probenpaare VIII und IX bzw. XIV und XV sind miteinander vergleichbar hinsichtlich der Art und Konzentration des Bindemittels. Eine gedachte Linie zwischen den Messpunkten VIII und IX sowie XIV und XV in der Grafik könnte den Einfluss der Dichte auf die Zugfestigkeit darstellen.

Die ermittelten Werte der Zugfestigkeit zeigen, dass bindemittelverstärkte Zelluloseschichten ab einer Dichte von ca. 90 kg/m³ bereits die geforderten Zugfestigkeiten für Fassadendämmplatten aus

Mineralwolle erreichen können. Bei höheren Dichten kann der laut ÖN B 6035 geforderte Grenzwert von 12,0 kPa deutlich übertroffen werden.

Wenn die Homogenität der aufgespritzten Zellulosedämmschichten erhöht werden kann, ist auch eine deutliche Verbesserung der Zugfestigkeiten normal zur Probenebene zu erwarten. Die besten Messwerte der Serien liegen in den meisten Fällen um ca. 25 % höher als der Mittelwert.

9. Anputzversuche

9.1. Herstellung der Putzflächen

Für die Anputzversuche wurden die drei besten, vollständig durchgetrockneten Versuchswände der ersten Evaluierungsphase mit jeweils 8 cm dick aufgespritzter Zellulosedämmung unterschiedlicher Bindemittelmischungen verwendet. Diese Versuchswände zeichneten sich durch steife, teilweise sogar harte Oberflächen aus, sodass ein Putzauftrag prinzipiell möglich schien.

Zudem wurde eine Wand etwa eine Woche nach Aufspritzen der Zellulosedämmung verputzt.

Ziel dieser Putzversuche war es, die Eignung der erzeugten Oberflächen für einen Putzauftrag zu beurteilen und erste Erkenntnisse für die Auswahl eines geeigneten Deckputzes zu gewinnen.

Selbst Fachleute auf dem Gebiet der Putztechnologie waren infolge des neuartigen Putzgrundes auf Vermutungen bezüglich der Gebrauchstauglichkeit bestehender Putze angewiesen.

Für die Putzversuche wurde auf das Know-How der Firma Wietersdorfer & Peggauer Zementwerke (W & P) zurückgegriffen, welche die Zellulosewände durch Fachpersonal vor Ort in Hartberg verputzte.

Folgende drei Dickputze wurden für die Anputzversuche ausgewählt, da sie einerseits aufgrund ihrer bauphysikalischen Eigenschaften für diese Anwendung besonders geeignet erschienen und andererseits zum Teil auch in der Praxis oftmals zur Anwendung kommen:

ThermoPutz

Produkt: Werksgemischter, wärmedämmender Trockenfertigmörtel mit Leichtzuschlägen für händische Verarbeitung.

Zusammensetzung: Hydraulische Bindemittel, Perlite, Zusätze

Eigenschaften: Einfache Verarbeitung, wärmedämmend, wasserdampfdurchlässig, universell anwendbar.

Anwendung: Wärmedämmender Unterputz auf mineralischen Untergründen für innen und außen, nicht im Sockelbereich.

ThermoExtra

Produkt: Werksgemischter, hochwärmedämmender Trockenfertigmörtel mit Leichtzuschlägen für maschinelle und händische Verarbeitung.

Zusammensetzung: Hydraulische Bindemittel, organische Leichtzuschläge (EPS), Zusätze

Eigenschaften: Einfache Verarbeitung, hochwärmedämmend, wasserdampfdurchlässig

Anwendung: Hochwärmedämmender Unterputz auf mineralischen Untergründen für außen und innen, auch in Stiegenhäusern zur Verbesserung der Wärmedämmung, nicht im Sockelbereich.

FaserLeichtPutz

Produkt: Werksgemischter, faserarmer Kalk/Zement-Trockenfertigmörtel mit Leichtzuschlägen für maschinelle und händische Verarbeitung.

Zusammensetzung: Baukalk, Zement, Schaumglasgranalien, Fasern, Putzsande, Zusätze

Eigenschaften: Wasseraufnahmehemmender, mineralischer, feinkörniger Kalk/Zementputz, gute Wasserdampfdurchlässigkeit, abgestimmte Elastizität, kein Vorspritzer bei maschineller Verarbeitung.

Anwendung: Maschinenputz, abgezogen oder verrieben, für außen und innen, insbesondere für hochwärmedämmende Wandbildner und Wandsysteme

Putzart	Größtkorn	Druckfestigkeit (28d)	Biegezugfestigkeit (28d)	Wärmeleitfähigkeit λ	σ -Wert	Trockenroh- dichte
Baumit ThermoPutz	2 mm	> 1,5 N/mm ²	> 0,6 N/mm ²	0,13 W/mK	ca. 8	450 kg/m ³
Baumit ThermoExtra	2 mm	> 0,5 N/mm ²	> 0,3 N/mm ²	0,09 W/mK	ca. 8	280 kg/m ³
Baumit FaserLeichtPutz	2 mm	> 2,5 N/mm ²	> 1,0 N/mm ²	0,35 W/mK	ca. 15	800 kg/m ³

Abb. 59 Materialkennwerte der verwendeten Putze

Versuchswand	Anmerkung
Wand 1	Bindemittel Guar-Gum, Anfangsfeuchte ca. 75 %
Wand 2	Bindemittel Guar-Gum, Anfangsfeuchte ca. 85 %; besonders steife Oberfläche durch Nachspritzen mit Bindemittellösung
Wand 7	Bindemittel Zement, Anfangsfeuchte ca. 70 %
Wand 0	Bindemittel Stärke, Wand hergestellt eine Woche vor Anputzversuch

Abb. 60 Bindemittelmischungen der jeweiligen Putzgründe

Die Putzdicken betragen dabei innerhalb einer Probefläche infolge der durch das Aufspritzen bedingten Unebenheiten des Zellulosedämmkörpers 2,5 – 4 cm.

Die Putze wurden in kleinen Mengen angerührt und mit der Kelle von Hand angeworfen. Pro Versuchswand wurden zwei unterschiedliche Putze aufgetragen, um einen unmittelbaren Vergleich zu ermöglichen. Es entstanden in Summe acht verschiedene Musterflächen.

Ein maschineller Auftrag des Putzes ist sicher anzustreben, doch waren die zur Verfügung stehenden Wandflächen zu klein, um den gerätetechnischen Aufwand einer Putzmaschine zu rechtfertigen.

Bei den Anputzversuchen wurden keine „Vorspritzer“ aufgebracht. Eine Befeuchtung der Wandfläche vor dem Putzauftrag, wie sie bei stark saugenden Materialien normalerweise angewandt wird, wurde ebenfalls nicht durchgeführt, da man befürchtete, die Bildung von oberflächennahen Gleitschichten im Dämmstoff zu initiieren bzw. zu begünstigen.

Eine Versuchswand (Wand 0) wurde sieben Tage vor den Anputzversuchen durch Aufspritzen einer frischen Dämmschicht hergestellt. Der Dämmkörper war nur an der Oberfläche getrocknet und hatte sozusagen eine trockene Membran. Das Innere der Dämmstoffschicht war noch sehr feucht (ca. 55 % Feuchte) und verlieh der Schicht eine komprimierbare und federnde Eigenschaft.

9.2. Charakteristik der einzelnen Putzarten

Der ThermoPutz ist hinsichtlich seiner Kompaktheit eindeutig verschieden von den anderen verwendeten Putzen. Beim Anwurf muss ein sehr steifer Putzgrund vorliegen, damit der Putz kraftschlüssig auf die Zellulosewand aufgetragen werden kann. Ist der Putzgrund hingegen nachgiebig, wird die Energie des Anwurfs durch die Federwirkung reflektiert. Auf diese Weise kann keine ausreichende Haftung des Putzes auf der Zelluloseschicht erzeugt werden. In Folge kann es zu einem lokalen Bruch kommen, welcher Auslöser für ein großflächiges Abgleiten des noch feuchten Putzes ist. Dieses Bruchverhalten wurde beim Auftragen des ThermoPutzes auf Wand 1 bzw. Wand 0 festgestellt.

Auf der Versuchswand 2 konnte der ThermoPutz ohne besondere Probleme appliziert werden, da die Dämmschicht eine ausreichende Steifigkeit aufwies.

Wird unmittelbar auf die Zelluloseschicht eine dünne Putzschicht mit einer Abzugskelle aufgezogen, kann auf diese Schicht auch der ThermoPutz angeworfen werden. Dieser Verarbeitungsablauf ist für den ThermoPutz in der Praxis allerdings nicht üblich.

Beim ThermoExtra wird in der Praxis auf jeden Fall - ungeachtet des Putzgrundes - eine dünne Putzschicht aufgestrichen, um in weiterer Folge überhaupt eine dickere Putzschicht aufbringen zu können. ThermoExtra hat einen großen Anteil an EPS-Kügelchen, welche das ganze Putzsystem sehr leicht machen und ein besonders hohes Dämmverhalten verursachen. Sowohl das Aufbringen als auch das Abziehen dieses Putzes auf den Versuchswänden funktionierte relativ gut.

Der FaserLeichtPutz ist eine Neuentwicklung der Firma W & P und beinhaltet eine Füllstoffkomponente aus Schaumglaskügelchen, welche in eine durch Kunststofffasern verstärkte Bindemittelmatrix eingebettet ist. Dieser Putz wurde



Abb. 61 Anrühren des Putzes



Abb. 62 Anwurf von ThermoExtra



Abb. 63 Abziehen der Putzschichte - ThermoExtra



Abb. 64 "Vorstreichen" einer dünnen Putzschicht



Abb. 65 Anwurf FaserLeichtPutz



Abb. 66 Fertiggestellte Putzversuche

speziell für die Aufbringung durch Anputzmaschinen optimiert.

Hinsichtlich seiner Konsistenz ist er im Vergleich zum ThermoPutz und ThermoExtra viel weicher und fließfähiger. Dieser Putz ist von Hand nur sehr schwer aufzutragen, da durch die charakteristische breiige Konsistenz ein Abgleiten von der Kelle beim Anwerfen sehr erschwert wird. Durch die breiig-pastöse Konsistenz passt sich der Putz besonders gut an die eher raue Oberfläche der Zelluloseschicht an. Dieser Umstand hatte einen besonders guten Verbund zwischen Putz und Zelluloseschicht zur Folge. Die Aufbringung auf die Versuchswände war im Vergleich zu den anderen Putzen beim FaserLeichtPutz besonders einfach. Die Putzoberflächen wurden besonders glatt und gleichmäßig.

Dieser Putz hat laut Datenblatt die höchsten Festigkeitswerte der drei verwendeten Putze, allerdings auch die höchste Rohdichte und die höchste Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl. In wie weit sich diese Umstände negativ auf das Verbundsystem auswirken, ist durch zukünftige Untersuchungen zu klären.

9.3. In-situ Haftzugversuche an den angeputzten Versuchswänden

Nach einer Lagerung der Probewände über 33 Tage bei 24 °C Raumtemperatur wurden an den Versuchsflächen in-situ-Haftzugversuche durchgeführt.

Die Putzhaftung auf den Dämmkörpern war augenscheinlich gut, die Oberflächen zeigten keinerlei Risse.

Die Bestimmung der Haftzugfestigkeit erfolgte in Anlehnung an DIN 18 550 - Teil 3 „Putz - Wärmedämm- Putzsysteme mit mineralischen Bindemitteln und expandiertem Polystyrol (EPS) als Zuschlag“, Absatz 8.

Verwendet wurde dabei ein Abziehprüfgerät der Type Proceq mit einem Lastbereich von 0 bis 2000 N und der Möglichkeit, die Kraft auf 5 % genau zu messen.

Die Prüfwände wurden mit einer Kettensäge entlang eines Führungspfostens bis auf die Ziegeloberfläche eingeschnitten, die Gesamtschnitttiefe betrug je nach Putzdicke 10 - 11 cm.

Zuerst wurde versucht, die Haftzugprüfungen an Probequadern mit den Abmessungen 8 x 8 cm durchzuführen, um einen direkten Vergleich mit den Labormessungen der Zugfestigkeiten normal zur Probenebene zu erhalten.

Dazu wurden Stahlplatten 80 x 80 x 8 mm, die mit einer zentrischen Gewindebohrung zur Aufnahme des Zugstempels der Prüfmaschine versehen waren, mittels Zweikomponenten-Kleber auf die eingeschnittenen Putzflächen aufgeklebt.

Das Gewicht der Stahlplatten betrug ca. 500 g. Es zeigte sich allerdings, dass diese Probekörper sehr geringe Festigkeiten aufwiesen, was möglicherweise auf mechanische Beeinträchtigung der Dämmschichten durch den Einschneidevorgang zurückzuführen war.

Um einerseits möglichst große Prüfquader zu gewinnen, deren größere Querschnittsflächen die Einschneidevorgänge gegebenenfalls unbeschadeter überstehen würden, und andererseits möglichst viele Probekörper aus einer Versuchsfläche zu erhalten, wurden in der Folge Prüfquader mit den Abmessungen 12 x 12 cm hergestellt.

Auf die Stahlplatten der ersten Serie wurde jeweils eine zusätzliche Stahlplatte 120 x 120 x 5 mm zentrisch aufgeschweißt um eine möglichst gleichmäßige Lasteinleitung zu gewährleisten. Das Gewicht beider Platten zusammen betrug ca. 1000 g.

Das Aufbringen der Zugkraft erfolgte bis zum tatsächlichen Bruch des Prüfkörpers. Die dabei auftretenden Dehnungen wurden nicht



Abb. 67 Abzugsggerät für die in-situ-Versuche



Abb. 68 Ansetzen des Prüfgerätes



Abb. 69 Herausgetrennter Prüfkörper

aufgezeichnet, da die Abzugversuche lediglich als erstes Screening hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften des Verbundsystemes Ziegel - Zellulosedämmschicht - Putz zu verstehen sind.

9.3.1. Ergebnisse der Abzugversuche

Die einzelnen Meßwerte der Abzugversuche sind in Abb. 70 zusammengestellt.

In dieser Tabelle ist die Zugkraft, die zum tatsächlichen Bruch der Probe führte, angegeben und durch die Querschnittsfläche dividiert. Die ermittelte Zugfestigkeit in kPa ermöglicht einen unmittelbaren Vergleich mit den Werten der Zugprüfung normal zur Probenebene der „Labordämmkörper“.

Generell zeigte sich bei den Versuchen, dass das Versagen des Verbundsystems Dämmkörper - Putz vorzugsweise an den Grenzschichten stattfindet. Es kommt entweder zu einer Ablösung relativ nahe an der Wandfläche (1) oder direkt an der Schichtgrenze Dämmkörper - Putz (2). In diesem Zusammenhang sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

Ad 1. Beim Aufbringen der Dämmschicht wurde kein Vorspritzen des Bindemittels bzw. Nässen der Wand durchgeführt, sondern die Dämmstoffmischung direkt auf den trockenen Ziegel aufgespritzt. Durch die starke Saugwirkung der Ziegelwand ist zu vermuten, dass an der Ziegeloberfläche zu wenig Feuchtigkeit für die Ausbildung eines optimalen Haftverbundes zur Verfügung stand. Eine Verbesserung des Kraftschlusses zwischen Wand und Dämmkörper sollte in Zukunft durch ein Vorspritzen von Wasser bzw. Klebemittel auf die Ziegelwand erreicht werden.

Ad 2: Beim Aufbringen der Putze wurde auf ein Befeuchten des Putzgrundes verzichtet. Dies vor allem deshalb, weil befürchtet wurde, dass ein „Nässen“ der Oberfläche die Ausbildung von lokalen Bruchflächen auslösen bzw. fördern könnte.

Im Nachhinein stellte sich aber heraus, dass zum Zeitpunkt des Abbindens des Putzes an der Grenzschicht Dämmkörper - Putz ein Mangel an Feuchtigkeit herrschte. Durch das Saugverhalten der Zellulosedämmschicht wurde die unterste Putzschicht zu schnell entwässert, was zu einem „Verbrennen“ der unmittelbaren Kontaktfläche führte. Sämtliche Prüfkörper zeigen eine deutlich farbig abgestufte Grenzschicht zwischen Putz und Dämmkörper.

Zudem wurden die Putzschichten ohne „Vorspritzen“ hergestellt, welche gemäß den Datenblättern für die manuelle Verarbeitung empfohlen werden.

Aus diesem Blickwinkel ist es notwendig, in Zukunft systematische Untersuchungen zur Optimierung des Haftverbundes an den Grenzflächen durchzuführen.

Die Prüfung der noch feuchten Wand zeigte deutlich, dass feuchte Dämmstoffe keine wesentlichen Zugkräfte aufnehmen können. An den Bruchflächen wurde noch ein Wassergehalt von ca. 18 % gemessen. Die Standsicherheit der aufgetragenen Putzschicht wurde im wesentlichen durch die bereits ausgehärtete Oberfläche des Dämmkörpers bedingt.

In Zukunft sollten die Prüfkörper nicht aus der stehenden Wand gewonnen werden, sondern entweder aus einer umgelegten, also horizontalen Wandfläche oder sie sollen überhaupt zB im Ziegelformat hergestellt und komplett in die stationäre Prüfmaschine eingebaut werden. Dies deshalb, weil das Gewicht der ca. 1 kg schweren Stahlprüfplatten den nur 144 cm² großen Querschnitt des Dämmkörpers durch den Hebelsarm von etwa 11 cm mit einem beträchtlichen Moment vorbelastet hatte bevor noch eine Quersugbeanspruchung aufgebracht worden war.

In einigen Fällen kam es zum Versagen innerhalb des Dämmkörpers, was für den Anwendungsfall

Wärmedämm-Putzsysteme gemäß DIN 18 550 - Teil 3 bzw. „ungedübeltes System“ bei bestehenden plattenförmigen WDVS der Regelfall ist.

Allerdings weisen die dort verwendeten Dämmplatten (EPS und MW-PT-stehende Lamellen) eine Zugfestigkeit normal zur Probenebene von mindestens 150 bzw. 80 kPa auf.

Da Windsogkräfte unter Berücksichtigung einer 3fachen Sicherheit mit etwa 15 bis max. 20 kN/m² angesetzt werden müssen, wird die Frage zu klären sein, ob mit Zugfestigkeiten normal zur Probenebene in der Größenordnung von etwa 30 kN/m² (entspricht 30,0 kPa) - zumindest bis zu einer bestimmten Gebäudehöhe – nicht das Auslangen gefunden werden kann. Dabei müssen jedenfalls auch Kräfte aus unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Putz und Dämmstoff bei Temperaturschwankungen berücksichtigt werden. Ebenso wie Kriechverformungen und möglicherweise die Herabsetzung der Bindekräfte der Bindemittel infolge von Wasserdampfdiffusionsvorgängen.

Versuchswand	Zugkraft [N]	Zugfestigkeit [kPa]	Querschnittsfläche [m ²]	Abmessungen [cm]	Anmerkung
Wand 7 FaserLeichtPutz Schnitttiefe 7 cm (nicht bis zur Ziegelwand)					
Probe 1	15	2,34	0,0064	8x8	Versagen: Dämmstoff
Probe 2	12	1,88	0,0064	8x8	Versagen: Dämmstoff - Ziegel
Probe 3	-	-	0,0064	8x8	nicht geprüft (bereits kaputt)
Wand 7 ThermoExtra					
Probe 1	120	8,33	0,0144	12x12	Versagen teilw. zwischen Ziegel - Dämmstoff
Probe 2	64	4,44	0,0144	12x12	Versagen: Ziegel - Dämmstoff
Probe 3	83	5,76	0,0144	12x12	Versagen teilw. zwischen Ziegel - Dämmstoff
Wand 1 FaserLeichtPutz					
Probe 1	160	11,11	0,0144	12x12	Versagen im Dämmkörper, 10% a d. Putzfläche
Probe 2	164	11,39	0,0144	12x12	Versagen im Dämmkörper, 5% am Ziegel
Probe 3	102	7,08	0,0144	12x12	Versagen im Dämmkörper, 10% am Ziegel
Wand 1 ThermoExtra					
Probe 1	50	3,47	0,0144	12x12	Versagen teilw. zwischen Ziegel - Dämmstoff
Probe 2	-	-	0,0144	12x12	nicht geprüft (bereits kaputt)
Probe 3	63	4,38	0,0144	12x12	
Wand 1 ThermoPutz					
Probe 1	23	1,60	0,0144	12x12	Versagen der Verbindung Putz - Dämmstoff
Probe 2	29	2,01	0,0144	12x12	Versagen der Verbindung Putz - Dämmstoff
Probe 3	34	2,36	0,0144	12x12	Versagen der Verbindung Putz - Dämmstoff
Wand 2 ThermoExtra sehr steife Oberfläche; in situ Probe XXI					
Probe 1	51	3,54	0,0144	12x12	Versagen: Putz - Dämmstoff
Probe 2	100	6,94	0,0144	12x12	Versagen: Putz - Dämmstoff
Probe 3	195	13,54	0,0144	12x12	Versagen: Putz - Dämmstoff
Probe 4	48	3,33	0,0144	12x12	Versagen: Putz - Dämmstoff
Wand 2 ThermoPutz sehr steife Oberfläche; in situ Probe XXI					
Probe 1	27	1,88	0,0144	12x12	Versagen: Putz - Dämmstoff
Probe 2	93	6,46	0,0144	12x12	Versagen: Putz - Dämmstoff
Probe 3	121	8,40	0,0144	12x12	Versagen: Putz - Dämmstoff
Wand 2 in situ Dämmstoff Probe XXI; Abzugsversuch ohne Putzschichte					
Probe 1	219	15,21	0,0144	12x12	Versagen des Klebers (nicht trocken)
Probe 2	122	8,47	0,0144	12x12	Versagen des Klebers (nicht trocken)
Wand 0 ; Dämmkern noch feucht			Wand 1 Woche nach Anspritzen verputzt; keine Austrocknung innen		
Probe 1	30	2,08	0,0144	12x12	Versagen: im feuchten Dämmstoff
Probe 2	29	2,01	0,0144	12x12	Versagen: im feuchten Dämmstoff

Abb. 70 Ergebnisse der Abzugsversuche

Die Messwerte der in-situ Abzugsversuche sollten vorweg nicht übermäßig interpretiert werden.

Das Versagen der Grenzfläche Putz - Dämmung weist darauf hin, dass die Dämmschichten an sich höhere Festigkeiten aufweisen als die angegebenen Bruchlasten vermuten lassen.

Bemerkenswert sind auch die gemessenen Werte an der Versuchswand 2. Das Bruchversagen trat

ausschließlich an der Grenzschicht zwischen Putz und Dämmkörper auf. Die große Streuung der Bruchlasten zeigt die unzureichende Kraftübertragung vom Putz auf die Dämmschicht auf. Aus dieser Dämmschicht wurde die Probe XXI für die Zug-Normal Messreihe gewonnen und erzielte die besten Zugfestigkeitswerte.

In der Labormessung erreichte dieser Dämmkörper eine durchschnittliche Zugfestigkeit von 54,6 kPa.

Der gemessene Spitzenwert der Haftzugversuche lag bei derselben Dämmschicht allerdings nur bei 13,5 kPa, was einerseits auf die in ad. 2) erläuterten Umstände und andererseits auf die mangelhafte Trocknung des Zwei-Komponenten-Klebers zurückzuführen ist.

Hinsichtlich der Verarbeitbarkeit zeigte der FaserLeichtPutz die besten Ergebnisse.

Eine Aussage darüber, welcher der verwendeten Putze insgesamt am besten für Zellulosedämmschichten geeignet wäre, ist anhand der konkreten Messwerte allerdings nicht abzuleiten. Vielmehr sind dafür weitere umfangreiche Untersuchungen erforderlich, welche in Zusammenarbeit mit einem Know-How Träger aus dem Bereich der Putzherstellung durchzuführen wären.

Es erscheint wahrscheinlich, dass sogar eine neue Putzmischung entwickelt werden muss, die für den speziellen Anwendungsfall Zelluloseputzgrund optimiert ist. Insbesondere hinsichtlich der Rohdichte und des Diffusionswiderstands besteht vermutlich noch Entwicklungspotenzial.

10. Ausblick

10.1. Weitere Forschungsstrategie

Hinsichtlich der Verbesserung der Durchmischung von Flocken und Bindemitteln besteht intensiver Forschungsbedarf insbesondere in Bezug auf die Adaptierung der Spritzdüsen und der Fördertechnologie. In diesem Zusammenhang ist die Einbindung zusätzlicher Know-How-Träger - zB aus dem Bereich der Spritzbetontechnik anzustreben.

Da der Zellulosedämmstoff einen sehr spezifischen, in der Praxis bis dato nicht vorhandenen, Putzgrund darstellt, ist es zudem unbedingt erforderlich, Kooperationspartner aus dem Bereich der Putzentwicklung zu gewinnen. Diesbezügliche Gespräche wurden bereits begonnen und scheinen erfolversprechend zu verlaufen.

In diesem Zusammenhang hat die Fragestellung besondere Bedeutung, ob es durch geeignete Einstellung der Wasseraufnahmefähigkeit bzw. Diffusionsoffenheit der Putzschichte gelingt, kritische Feuchtezustände im Dämmstoff hintanzuhalten. Weiters ist die Frage zu klären, inwieweit sich die Bindekräfte der unterschiedlichen Bindemittel unter Feuchtigkeitseinfluss verändern. Um derartige Einflüsse beurteilen zu können, sollen die ursprünglich geplanten Klimakammer-Versuche unmittelbar nach Eingrenzung der Bindemittel auf eine oder zwei Varianten und nach erfolgter Homogenisierung des Förderstromes durchgeführt werden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht auch im Bezug auf die Reduktion der Trocknungszeiten - gegebenenfalls unter Verwendung zusätzlicher Additive.

Schließlich sind Versuche mit frei bewitterten Probewänden durchzuführen. Diese sollen den Einfluß von Schlagregen und thermischen Beanspruchungen sowohl der noch nicht verputzten als auch der „fertigen“ Wand klären.

Sollten die erzielbaren Zugfestigkeiten normal zur Probenebene der ungedübelten Dämmstoffschicht nicht ausreichen, um die Fassadenlasten aufzunehmen, wird die Adaptierung bestehender Dübelsysteme in Angriff zu nehmen sein. Seitens der Rückmeldungen aus der Praxis wird das Verankern von Putzschichten an der Unterkonstruktion mittels Dübel oder Tragschienen allerdings als wenig innovativ bewertet. Vor allem die zusätzlichen Kosten durch weitere Arbeitsgänge werden kritisch beurteilt.

Alternativ dazu ist die Produktion von Fassadendämmplatten aus Zellulosedämmstoff, die konventionell geklebt und gedübelt werden, denkbar. Die erzielten Festigkeitswerte lassen – vorbehaltlich noch durchzuführender hygrothermischer Untersuchungen - die grundsätzliche Eignung hierfür erwarten.

Im Hinblick auf innovative Wege zur Fassadendämmung bzw. -sanierung und unter Berücksichtigung des anzustrebenden Zieles eines im günstigsten Fall in nur zwei Arbeitsgängen aufspritzbaren Wärmedämm-Verbundsystems sollten in Zukunft auch gerüstlose Verfahren evaluiert werden (zB mobile Arbeitsbühnen oder -kräne).

10.2. Weitere Anwendungsgebiete

Im Innenbereich können offenliegende, aufgespritzte Zelluloseschichten, welche mit umweltfreundlichen Bindemitteln gebunden wurden, auch für die Herstellung großflächiger schallabsorbierender Schichten verwendet werden. Die effiziente und kostengünstige Verbesserung der Raumakustik durch Verminderung der Nachhallzeiten stellt eine interessante Marktnische dar.



Abb. 71 Aufgespritzte Akustikbeschichtung

Die bereits jetzt erzielbaren Festigkeitswerte eröffnen für aufgespritzte Zellulosedämmschichten neue, im Zuge der Althaus-Modernisierung immer wichtiger werdende Anwendungsgebiete wie die Dämmung der obersten, eventuell begehbaren Geschoßdecke oder der Kellerdeckenunterseite. In beiden Fällen ist ein rasches Austrocknen der Dämmschicht unter Umständen nicht notwendig. Besonders die Dämmung der Kellerdeckenunterseiten mit ihren oft unebenen und gekrümmten Flächen stellt ein potenzielles Anwendungsgebiet dar.

Ein weiteres interessantes Anwendungs- und Forschungsgebiet ist die Innendämmung von Gebäuden ohne Dampfsperre. Dies ist insbesondere für Gebäude mit denkmalgeschützten Fassaden ein Thema. Die Idee einer kapillaraktiven Innen-Dämmschichte, aus in diesem Fall 30 mm dicken, faserdotierten Calciumsilikat-Platten ohne zusätzliche Dampfsperre wurde zB in den Jahren 1996 – 1998 von Forschern der TU Dresden im Rahmen eines Forschungsprojektes evaluiert und erbrachte sehr gute Ergebnisse. Mögliches Kondensat hinter der Dämmschicht wurde durch die hohe kapillare Saugfähigkeit der Calciumsilikat-Platten verteilt und entspannt, so dass keine Dampfsperre notwendig war [70].

Der Umstand, dass Zellulosefasern ebenfalls in der Lage sind, relativ viel Feuchtigkeit zu puffern [23], legt den Schluss nahe, dass sich eine fugenlos gespritzte Zellulosedämmschichte insbesondere, aber nicht nur, für unregelmäßiges Mauerwerk als Innendämmung ohne Dampfsperre eignet.

11. Zusammenfassung

Im beschriebenen Projektvorhaben wurden für aufgespritzte, bindemittelverstärkte Zellulosedämmschichten grundlegende bauphysikalische und werkstofftechnische Parameter ermittelt. Die Dämmschichten wurden durch die in der Praxis übliche Verfahrenstechnik unter Verwendung verschiedener Bindemittel in Kombination mit marktüblichen Zelluloseflocken aus Altpapier hergestellt. Das Anwendungspotenzial aufgespritzter Zellulosedämmschichten für Außenfassaden mit Putzauflage wurde ermittelt und die verwendete Verfahrenstechnologie beurteilt. Anhand der Ergebnisse wurde der weitere Forschungsbedarf evaluiert und weitere Anwendungsbereiche für aufgespritzte Zellulosedämmschichten aufgezeigt.

Grundlagen

Die Grundlagenrecherche ergab, dass die meisten Entwicklungen zu Zellulosedämmschichten im Ausland - insbesondere in den USA und Finnland - gemacht wurden. In diesen Ländern sind gegenwärtig auch zwei Forschungsprojekte im Gange, welche sich mit aufgespritzten Dämmschichten beschäftigen, in Finnland allerdings ohne Putzauflage. Über aufgespritzte Zellulosedämmschichten wurden bis dato relativ wenig systematische Untersuchungen durchgeführt, was die verfügbare Fachinformation bzw. Literatur stark eingrenzt. Eine Reihe von Entwicklungen für Zellulosedämmstoffe ist durch Patente geschützt. Im Zuge der praktischen Versuche wurde - soweit möglich - auf in der Praxis üblichen Techniken und Geräten aufgebaut. Ein Wärmedämm-Verbundsystem auf Basis aufgespritzter Zellulosedämmstoffe mit darüberliegendem Deckputz stellt im Prinzip eine Neuheit dar.

Simulationsberechnungen

Ziel dieses Arbeitsschrittes war die Abschätzung des eindimensionalen instationären hygrothermischen Verhaltens der Verbundkonstruktion Mauerwerk – Dämmung – Putz. Da sowohl für den Anwendungsfall der außenliegenden, bindemittelverstärkten Zellulose-Dämmschichte als auch für die verwendeten Spezialputze nicht alle Materialkennwerte zur Verfügung stehen, wurden die Simulationsberechnungen in einem ersten Schritt mit denjenigen Kennwerten durchgeführt, die aus der Literatur für gewöhnliche „loose fill“ Zellulose bzw. herkömmliche Außenputze bekannt sind.

Da diese die speziellen Eigenschaften der neuartigen Baustoffe nur unzureichend beschreiben, können die Ergebnisse nur bedingt als aussagekräftig bezeichnet werden. Es sind jedenfalls Laboruntersuchungen des endgültigen Dämmstoffes und des vermutlich speziell für diesen Anwendungsfall zu optimierenden Außenputzes unabdingbar, um das hygrothermische Verhalten des zu entwickelnden Wärmedämm-Verbundsystems genauer beurteilen zu können.

Mit den gewonnen Messdaten sollen anschließend die ersten Simulationsberechnungen wiederholt und mittels Klimakammer-Messungen an einer 1:1 Versuchswand überprüft werden.

Bindemittel und Aufspritzeversuche

Nach einer grundlegenden Recherche im Bereich Kleber und Bindemittel wurde für den konkreten Anwendungsfall eine Reihe geeigneter Bindemittel ausgewählt. Besonderes Augenmerk wurde auf die Umweltverträglichkeit der verwendeten Zusätze gelegt.

Mit den Bindemitteln Guar-Gum, Jaguar, diversen Stärken, CMC (Carboxy-Methyl-Cellulose), Casein, PVA (Polyvinylalkohol), Spezialzement, Magnesiumoxid und Wasserglas wurden Aufspritzeversuche durchgeführt. Die Anwendbarkeit von Thermoplasten als Bindemittel wurde für den Anwendungsfall „Dämmplatte“ ansatzweise getestet.

Für die Aufspritzeversuche wurden übliche Fördermaschinen für Zelluloseflocken in Kombination mit Spritzköpfen oder Mischdüsen verwendet. Es zeigte sich, dass die in der Praxis üblichen Spritzdüsen des CSO-Verfahrens nur bedingt für die Herstellung von bindemittelverstärkten Dämmstoffschichten geeignet sind. Ein homogener Eintrag von Wasser oder Bindemittellösung in den luftgeförderten Flockenstrom war durch die üblichen Sprühköpfe nicht erzielbar. Die Folge waren aufgespritzte Dämmschichten, welche lokal stark unterschiedliche Eigenschaften aufwiesen und deutliche Marmorierungseffekte zeigten. Aus diesem Grund wurden verschiedene Mischköpfe und Düsen aus teilweise verwandten Anwendungsgebieten getestet und Adaptionen durchgeführt.

Eine unzureichende Förderung des Dämmstoffes durch die Einblasmaschinen sowie ein „pfropfenweiser“ Transport der Flocken im Luftstrom waren Auslöser der schlechten Vermischung und Homogenisierung am Sprühkopf. Durch Erhöhung der Drehzahl der Zellradschleuse in der Einblasmaschine konnte eine Verbesserung der Fördertechnik erreicht werden. Im Rahmen der verschiedenen Versuche mit unterschiedlichen Bindemitteln traten eine Reihe von verfahrenstechnischen Problemen bei der Einmischung von Bindemittelpulver sowie der Zerstäubung von Bindemittellösungen auf. Verstopfungen von feinen Zerstäuberdüsen, Verkrustungen und Anlagerungen bei innenliegenden Mischsystemen sowie eine zu hohe Beanspruchung der verwendeten Pumpen waren die Folge. Um diese Probleme zu beseitigen, wurden Bindemittel in Pulverform vor dem Aufspritzen möglichst gleichmäßig in die Flockenmatrix eingebracht und mit reinem Wasser aktiviert. Durch Veränderung der Düsengeometrie

und die Erhöhung des Wasserdruckes konnte die Einbringung von Wasser in den Flockenstrom verbessert werden.

Die Aufspritzversuche mit mineralischen Bindemitteln ergaben hinsichtlich der erzielten mechanischen Festigkeiten enttäuschende Ergebnisse. Durch das starke Wasseraufnahmevermögen der Zelluloseflocken wurden die mineralischen Lösungen zu stark entwässert, um gute Bindekräfte zu entwickeln. Eine vorangehende Hydrophobierung der Zelluloseflocken wurde nicht durchgeführt, da es umfangreicher Untersuchungen und Experimente bedurft hätte, die nicht Gegenstand dieses Forschungsprojektes waren. Untersuchungen zum Trocknungsverhalten einer aufgespritzten Zellulosedämmschicht zeigten, dass eine Schicht von 8 cm Dicke bei einseitiger Lufttrocknung etwa vier Wochen für ein vollständiges Austrocknen benötigt. An der Oberfläche bildet sich bereits nach rund sieben Tagen eine weitgehend trockene Deckschicht, welche den weiteren Trocknungsvorgang der tiefergelegenen Bereiche behindert.

Bauphysikalische und mechanische Laborversuche

Für die Probe 0 wurden die Wärmeleitfähigkeit, die Druck-, Scher- sowie die Zugfestigkeit in und normal zur Probenebene gemessen. Nach Verbesserung des Aufspritzverfahrens wurden insgesamt 20 weitere verschiedene Rohling-Serien für die Gewinnung von Prüfkörpern hergestellt. Es wurden verschiedene Bindemittel in unterschiedlichen Konzentrationen eingesetzt. Die Proben wurden in einer Trockenkammer bei 38 °C Durchschnittstemperatur auf ca. 10 % Wassergehalt getrocknet. Aus den getrockneten Rohlingen wurde eine Vielzahl einzelner Prüfkörper der Größe 8 x 8 cm mit einer Dicke von 3,5 cm gewonnen, aus welchen die „besten“ für die Laborprüfung ausgewählt wurden. Für den Vergleich von 17 ausgewählten Proben untereinander wurde die Zugfestigkeit normal zur Probenebene als das sensibelste Kriterium ermittelt.

Die Auswertungen zeigen, dass aufgespritzte Zellulosedämmstoffe durchaus jene Zugfestigkeiten normal zur Probenebene ($\approx 12,0$ kPa) erreichen können, die für Mineralfaserplatten für den Fassadenbereich (MW-PT) gefordert werden. Die Dichten der aufgespritzten Zellulosedämmschichten betragen dabei 70 bis 150 kg/m³. Kann die Homogenität der aufgespritzten Schichten durch eine Verbesserung der Aufspritztechnik gesteigert werden, ist eine weitere Verbesserung der mechanischen Parameter zu erwarten.

In Anputzversuchen wurde die grundsätzliche Eignung der Zellulosedämmschichten als Putzgrund für Fassadenputze untersucht. Die Putze ThermoPutz, ThermoExtra und der FaserLeichtPutz wurden unmittelbar auf die trockenen Zellulosedämmschichten aufgetragen.

Die Versuche zeigten, dass ein kraftschlüssiger Auftrag von Putzen auf Zellulosedämmstoffe bei ausreichender Härte der Dämmschicht möglich ist. Nach der vorgeschriebenen Trocknungszeit wurde die Verbundwirkung des Systems Ziegel - Dämmstoff - Putz durch Abzugsversuche an den verputzten Probeflächen geprüft. Die Ergebnisse zeigten, dass der Wassergehalt an der Anputzfläche vor allem wegen der stark saugenden Eigenschaften der Dämmschicht optimiert werden muss, um einen guten Haftverbund zwischen Putz und Dämmschicht herzustellen. Weitere systematische Untersuchungen sind in diesem Zusammenhang erforderlich.

Weiterer Forschungsbedarf für aufgespritzte Zellulosedämmstoffe für die Außenfassade mit Putzaufgabe

Die durchgeführten Aufspritzversuche und die Ergebnisse der Materialuntersuchungen zeigen deutlich, dass weiterer Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Verbesserung der Homogenität der aufgespritzten Zellulosedämmschichten besteht. Die in der Praxis üblichen Techniken bzw. Gerätschaften (Förderanlagen, Spritzdüsen bzw. Mischköpfe) sind kaum zur Herstellung von homogenen Dämmschichten geeignet. Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Adaptionen der Verfahrenstechnik haben zwar eine deutliche Steigerung der Homogenität der aufgespritzten Schichten erzielt, jedoch ist bei zukünftigen Untersuchungen eine verbesserte Homogenisierung anzustreben. Begleitende mechanische Labormessungen sind für die Entwicklung der Verfahrenstechnik unbedingt erforderlich, um eine Evaluierung der Verbesserung der Aufspritztechnik anhand konkreter Messwerte zu ermöglichen.

Die Ergebnisse haben auch gezeigt, dass die Kraftübertragung an den Grenzflächen zwischen Wand und Dämmstoff bzw. Dämmstoff und Putzschicht weitere systematische Untersuchungen erfordert. Einen besonderen Stellenwert nimmt in diesem Zusammenhang die Abstimmung des Putzes auf den Putzgrund Zellulosedämmung ein. Um diese Problemstellung erfolgreich zu lösen, ist die Einbindung eines Know-How-Trägers aus der Putzbranche in die weiteren Forschungstätigkeiten erforderlich. Die Eigenschaften der Deckputzschicht haben wesentlichen Einfluss auf den Feuchtehaushalt der Dämmschicht sowie auf die Wärmeleitfähigkeit des Gesamtsystems. Die bereits vorhandenen Ergebnisse der Simulationsberechnung sollen mit den aktuellen Kennwerten sowie durch einen Klimakammer-Versuch evaluiert werden. Anhand einer großflächigen Pilotfassade sind Versuche im Zusammenhang mit der Verbundwirkung zwischen den einzelnen Bestandteilen des Dämmsystems sowie betreffend Witterungs- und Alterungsbeständigkeit durchzuführen.

Weiterer Forschungsbedarf und Anwendungsbereiche für ansprühbare Zellulosedämmstoffe

Neben dem Anwendungsfall Wärmedämmung für die Außenfassade gibt es für aufgespritzte Zellulosedämmstoffe auch weitere interessante Verwendungsmöglichkeiten. Aufgespritzte Zellulosedämmschichten haben auch eine schallabsorbierende Wirkung, wodurch bei offener Anwendung die Raumakustik verbessert werden kann. Besonders bei der Althaus-Modernisierung ist die Dämmung von gewölbten Kellerdecken und der obersten Geschossdecke als Hoffungsgebiet für aufgespritzte Zellulosedämmstoffe zu nennen. In beiden Fällen ist ein rasches Austrocknen der Dämmschicht unter Umständen nicht notwendig.

Ein weiteres interessantes Anwendungs- und Forschungsgebiet ist die Innendämmung ohne Dampfsperre von zB denkmalgeschützten Fassaden. Vor allem die hohe Pufferfähigkeit von ev. anfallendem Kondensat zeichnet die Zellulosedämmstoffe in diesem Zusammenhang aus.

12. Normen

ÖNORM B 2210

Putzarbeiten - Werkvertragsnorm (11/93)

ÖNORM B 2259

Herstellung von Außenwand-Wärmedämm-
Verbundsystemen - Werkvertragsnorm (05/99)

ÖNORM B 3340

Putzmörtel - Begriffsbestimmungen,
Einteilungskriterien, Anforderungen und
Normkennzeichnung (04/99)

ÖNORM B 3343

Mauer- und Putzmörtel - Prüfverfahren für die
Eigen- und Fremdüberwachung (02/97)

ÖNORM B 3344

Baustellengemischte Mauer- und Putzmörtel
(01/98)

ÖNORM B 3346

Putzmörtel - Regeln für die Verwengung und
Verarbeitung (11/93)

ÖNORM B 3359-1

Außenwandsysteme - Teil 1:
Begriffsbestimmungen, wesentliche
Eigenschaften, Prüfungen (08/95)

ÖNORM B 3371

Gips- und gipshaltige Putzmörtel -
Begriffsbestimmungen, Einteilungskriterien,
Anforderungen, Prüfungen (04/00)

ÖNORM B 3414

Fertigputze mit Gips als Bindemittel; Richtlinien
für die Verarbeitung (05/83)

ÖNORM B 3800-1

Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen -
Baustoffe: Anforderungen und Prüfungen
(12/88)

ÖNORM B 3800-2

Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen -
Bauteile: Begriffsbestimmungen,
Anforderungen, Prüfungen (03/97)

ÖNORM B 3800-3

Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen -
Sonderbauteile: Begriffsbestimmungen,
Anforderungen, Prüfungen (12/95)

ÖNORM B 3800-4

Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen -
Bauteile: Einreihung in die
Brandwiderstandsklassen (05/00)

ÖNORM B 4014-1

Belastungsannahmen im Bauwesen - Statische
Windwirkungen (nicht-schwingungsanfällige
Bauwerke) (05/93) und Berichtigung (07/98)

ÖNORM B 4014-1 Bbl 1

Belastungsannahmen im Bauwesen - Statische
Windwirkungen (nicht-schwingungsanfällige
Bauwerke). Berechnungsbeispiele (10/93)

ÖNORM B 6010

Dämmstoffe für den Wärme- und/oder
Schallschutz im Hochbau - Prüfmethode
(01/99)

ÖNORM B 6015-1

Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem
Plattengerät – Durchführung und Auswertung
(12/89)

ÖNORM B 6015-2

Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem
Plattengerät - Ermittlung der
baustoffspezifischen Wärmeleitfähigkeit (09/00)

- ÖNORM B 6015-3
Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät - Weiterbehandlung der Meßwerte geschichteter Materialien für die Anwendung im Bauwesen (12/91)
- ÖNORM B 6015-5
Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät - Ermittlung des Nennwertes der Wärmeleitfähigkeit für Dämmstoffe (03/90)
- ÖNORM B 6021
Dämmstoffe für den Wärme- und/oder Schallschutz im Hochbau – Holzwolle-Dämmplatten WW und Holzwolle-Mehrschicht-Dämmplatten (11/00)
- ÖNORM B 6022
Dämmstoffe für den Wärme- und/oder Schallschutz im Hochbau - Holzspan-Dämmplatten WS und Holzspan-Mehrschicht-Dämmplatten (11/00)
- ÖNORM B 6035
Dämmstoffe für den Wärme- und/oder Schallschutz im Hochbau - Gebundene Mineralwolle MW (11/00)
- ÖNORM B 6041
Dämmstoffe für den Wärme- und/oder Schallschutz im Hochbau - Schaumglas CG (11/00)
- ÖNORM B 6050
Dämmstoffe für den Wärme- und/oder Schallschutz im Hochbau - Expandierter Polystyrol-Partikelschaumstoff EPS (11/00)
- ÖNORM B 6053
Dämmstoffe für den Wärme- und/oder Schallschutz im Hochbau - Polystyrol-Extruderschaumstoff XPS (11/00)
- ÖNORM B 6055
Dämmstoffe für den Wärme- und/oder Schallschutz im Hochbau - Polyurethan-Hartschaumstoff PUR (11/00)
- ÖNORM B 6100
Außenwand-Wärmedämm-Verbundsysteme - Prüfverfahren (10/98)
- ÖNORM B 6110
Außenwand-Wärmedämm-Verbundsysteme aus expandiertem Polystyrol-Partikelschaumstoff EPS-F und Deckschichte (10/98)
- ÖNORM B 6121
Kleber (Klebemörtel) für Außenwand-Wärmedämm-Verbundsysteme (10/98)
- ÖNORM B 6122
Textilglasgitter für Außenwand-Wärmedämm-Verbundsysteme (10/98)
- ÖNORM B 6124 E
Dübel für Außenwand-Wärmedämm-Verbundsysteme (in Vorbereitung)
- ÖNORM B 6135
Außenwand-Wärmedämm-Verbundsysteme aus Mineralwolle-Dämmplatten MW-PT und Deckschichte (10/98)
- ÖNORM B 6410 E
Außenwand-Wärmedämm-Verbundsysteme, -Verarbeitungsnorm (in Vorbereitung)
- ÖNORM B 8110-2 Bbl 2
Wärmeschutz im Hochbau - Massive Baukonstruktionen. Beispiele zur Vermeidung von Oberflächenkondensation (04/97)
- ÖNORM ENV 413-1
Putz- und Mauerbinder - Teil 1: Anforderungen (05/95)

ÖNORM EN 413-2

Putz- und Mauerbinder - Teil 2: Prüfverfahren
(05/95)

ÖNORM EN 826

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen -
Bestimmung des Verhaltens bei
Druckbeanspruchung (07/96)

ÖNORM EN 998-1

Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau -
Teil 1: Putzmörtel (08/00)

ÖNORM EN 1015-12

Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil
12: Bestimmung der Haftfestigkeit von
erhärteten Putzmörteln (05/00)

ÖNORM EN 1015-18

Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil
18: Bestimmung der kapillaren Wasser-
aufnahme von erhärteten Putzmörtel
(Festmörtel) (06/99)

ÖNORM EN 1015-19

Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil
19: Bestimmung der Wasserdampf-
durchlässigkeit von Festmörteln aus
Putzmörteln (01/99)

ÖNORM EN 1015-21

Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil
21: Bestimmung der Verträglichkeit von
Einlagenputzmörteln mit Untergründen durch
Prüfung der Haftung und Wasserdurchlässigkeit
nach Bewitterung (06/99)

ÖNORM EN 1602

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen -
Bestimmung der Rohdichte (02/97) und
Berichtigung (09/97)

ÖNORM EN 1603

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen -
Bestimmung der Dimensionsstabilität im
Normalklima (23 °C/50 % relative Luftfeuchte)
(02/97) und Berichtigung (09/97)

ÖNORM EN 1604

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen -
Bestimmung der Dimensionsstabilität bei
definierten Temperatur- und
Feuchtebedingungen (02/97) und Berichtigung
(09/97)

ÖNORM EN 1605

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen -
Bestimmung der Verformung bei definierter
Druck- und Temperaturbeanspruchung (02/97)
und Berichtigung (09/97)

ÖNORM EN 1606

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen -
Bestimmung des Langzeit-Kriechverhaltens bei
Druckbeanspruchung (02/97) und
Berichtigung (09/97)

ÖNORM EN 1607

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen -
Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur
Plattenebene (02/97) und Berichtigung (09/97)

ÖNORM EN 1608

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen -
Bestimmung der Zugfestigkeit in Plattenebene
(02/97) und Berichtigung (09/97)

ÖNORM EN 1609

Wärmedämmstoffe für das Bauwesen -
Bestimmung der Wasseraufnahme bei
kurzzeitigem teilweisem Eintauchen (02/97)
und Berichtigung (09/97)

- ÖNORM EN 12085
Wärmedämmstoffe für das Bauwesen -
Bestimmung der linearen Maße von
Probekörpern (09/97)
- ÖNORM EN 12086
Wärmedämmstoffe für das Bauwesen -
Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit
(09/97)
- ÖNORM EN 12087
Wärmedämmstoffe für das Bauwesen -
Bestimmung der Wasseraufnahme bei
langzeitigem Eintauchen (09/97)
- ÖNORM EN 12088
Wärmedämmstoffe für das Bauwesen -
Bestimmung der Wasseraufnahme durch
Diffusion (09/97)
- ÖNORM EN 12089
Wärmedämmstoffe für das Bauwesen -
Bestimmung des Verhaltens bei
Biegebeanspruchung (09/97)
- ÖNORM EN 12090
Wärmedämmstoffe für das Bauwesen -
Bestimmung des Verhaltens bei
Scherbeanspruchung (09/97)
- ÖNORM EN 12429
Wärmedämmstoffe für das Bauwesen -
Einstellen der Ausgleichsfeuchte bei definierten
Temperatur- und Feuchtebedingungen (12/98)
- ÖNORM EN 12430
Wärmedämmstoffe für das Bauwesen -
Bestimmung des Verhaltens unter Punktlast
(12/98)
- ÖNORM EN 13494 E
Wärmedämmstoffe für das Bauwesen –
Bestimmung der Haftzugfestigkeit zwischen
Kleber und Wärmedämmstoff sowie zwischen
Unterputz und Wärmedämmstoff, (05/99)
- ÖNORM EN 13658-1
Putzprofile und Putzträger aus Metall -
Definitionen, Anforderungen und Prüfverfahren
- Teil 1: Innenputze (09/99)
- ÖNORM EN 13658-2
Putzprofile und Putzträger aus Metall -
Definitionen, Anforderungen und Prüfverfahren
- Teil 2: Aussenputze (12/99)
- ÖNORM EN 13914-1
Planung, Zubereitung und Ausführung von
Aussenputzen (10/00)
- DIN 1053 Teil 1
Mauerwerk, Berechnung und Ausführung
(11/96)
- DIN 18 550 Teil 1
Putz – Begriffe und Anforderungen (01/85)
- DIN 18 550 Teil 2
Putz – Putze aus Mörteln mit mineralischen
Bindemitteln, Ausführung (01/85)
- DIN 18 550 Teil 3
Putz – Wärmedämm-Putzsysteme aus Mörteln
mit mineralischen Bindemitteln und
expandiertem Polystyrol (EPS) als Zuschlag
(03/91)
- DIN 18 550 Teil 4
Putz – Leichtputze, Ausführung (08/93)
- DIN 18 551
Spritzbeton - Herstellung und
Güteüberwachung (03/1992)
- DIN IEC 60068 2-10
Elektrotechnik – Grundlegende
Umweltprüfverfahren, Prüfung und Leitfadens:
Schimmelwachstum (04/91)

13. Patente

- AU 9.215.218 A
Method of producing lightweight insulation batt;
Rolf K. Hartelt (06.05.93)
- DE 19.529.963 A
Cellulose insulation production from waste paper;
W. Elges (20.02.97)
- DE 19.618.444 A
Hardly flammable cellulose loose fibre;
J. Gadowski (13.11.97)
- EP 0.484.873 A1
Mineralfaser-Spritz- und Einblasverfahren mit Schaumträgersystem;
Knud Gerdes, Dieter Meier (04.11.91)
- GB 2.149.689 A
Sprayed cellulose fibre insulation coating;
Dennis Henry Ogden (19.06.85)
- US 4.213.936
Foam generating and spraying apparatus;
Robert Lodrick (22.07.80)
- US 4.370.249
Fire-retardant cellulose insulation and method of production; talc, boron compound;
Carl H. Bird, Thomas O. Bird, Jack White (25.01.83)
- US 4.514.326
Permanent flame retardant and anti- smoldering compositions; mixture of ammonium pentaborate and an alkali or alkaline sulfate, sulfite and/or hydrophosphate; cellulose insulation;
Stephan I. Sallay (30.04.85)
- US 4.515.633
Polymeric materials combined with modified hydrated magnesium aluminosilicates; fireproofing, insulation;
Mamerto M. Cruz Jr. (07.05.85)
- US 4.755.225
Cellulosic-based particulate insulation and method of manufacturing same flame combustion retardant insulation of cellulose and pulp rejects expanded and made porous by flash drying impregnated or coated with flame or combustion retardant material;
Norman W. Pruitt (05.07.88)
- US 4.773.960
Apparatus for installing fast setting wetting and activating wheat starch adhesive insulation; on cellulose-based insulation;
Bradley Albutus, Alfred J. Vincelli (27.09.88)
- US 4.923.121 A
Spray nozzle for spraying mixture of insulation and adhesive;
Harold F. Boyer (28.09.93)
- US 5.131.590 A;
Fibrous sprayed insulation having homogeneous density
Henry Sperber (27.07.95)
- US 5.684.068
Spray-On Insulation;
H.F. Boyer, St.A. Kempe, W.F. Boyer (04.11.97)
- US 5.776.841
Sheet felt; Roof and siding underlayment and insulation board; Cellulose fibers, glass fibers, Binder, Water repellent sizing agent;
A.A. Bondoc Ch.J. Horner Jr. (07.07.98)

US 5.819.496 A

Cavity wall insulation of building assembly;

Henry Sperber (03.12.98)

US 5.853.802 A

Cellulose fibres pretreated with boric acid and
mixed with polyvinyl alcohol adhesive;

H.F. Boyer, St.A. Kempe, W.F. Boyer (29.12.98)

WO 93/03854

Foamed fibre insulation of foamed adhesive and
fibrous material;

Henry Sperber (04.3.93);

WO 94/24199

Method and apparatus for insulating a cavity;

Henry Sperber (27.10.94);

WO 97/05205

Forming fibrous cellulose spray on insulation
with good water resistance;

H.F. Boyer, St.A. Kempe, W.F. Boyer (13.02.97)

14. Literatur

- 1 Schuster G., Szeider G., Wölfl M.:
Wärmeschutzmaßnahmen an Wohngebäuden,
Zentrum für Bauen und Umwelt, Donau-Universität
Krems, 1999
- 2 zB „Thermo-Fassade“ der Fa. Stauss-Perlite,
A-3100 St. Pölten
- 3 Kießl K., Kapillarer und dampfförmiger
Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen;
Essen, 1983
- 4 Österreichisches Institut für Baubiologie,
Bericht Nr. 01/00/08; 2000
- 5 US Patent Nr. 374208 12/1887
- 6 GDI - Gemeinschaft Dämmstoff Industrie, 1999,
A-1040 Wien, Favoritenstraße 4 - 6
- 7 Künzel, H: Warum sich Wärmedämm-
Verbundsysteme durchgesetzt haben - Vergleiche
mit anderen Wandkonstruktionen; Sonderdruck
aus: 20 (1998), Heft 1, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- 8 Kroiss J, Bammer A. (Hrsg.) – Biologisch natürlich
bauen; Stuttgart, Leipzig: Hirzel 2000
- 9 Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V
Fremersbergstraße 33, D-76530 Baden-Baden
- 10 Institut für Erhaltung und Modernisierung von
Bauwerken e.V. - IEMB - an der TU Berlin,
Salzufer 14, D-10587 Berlin-Charlottenburg
- 11 Institut für Bauforschung e.V. Hannover (Hrsg.),
Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) im
Wohnungsbau, IRB Verlag Stuttgart, 1997
- 12 Frössel, F: Lexikon der Putz- und Stucktechnik, IRB
Verlag Stuttgart 1999
- 13 Austropapier - Vereinigung der österreichischen
Papierindustrie, www.austropapier.at, 2000
- 14 Der große Brockhaus, 18. Aufl., Wiesbaden, 1979
- 15 Staberock Martin, Das Papierbuch; EPN Verlag,
DB-Houten, 1999
- 16 de Biasi, P.-M. und Douplitzky, K., Wie aus Bäumen
Blätter werden - Die Papierindustrie, 1998 in:
www.arte-tv.com/special/papier/dtext/dossier.html
- 17 PPV – Fachverband der Papier- und Pappe
verarbeitenden Industrie Österreichs, www.ppv.at,
2001
- 18 bvse - Bundesverband Sekundärrohstoffe und
Entsorgung e.V., Der Altpapierkreislauf, Bonn, 2000
- 19 Altpapier - Liste der europäischen Standardsorten
und ihre Qualitäten, Stand 07/2000, zu beziehen bei
bvse - Bundesverband Sekundärrohstoffe und
Entsorgung e.V, Hohe Straße 73, D-53119 Bonn
- 20 ARO - Altpapier-Recycling-
Organisationsgesellschaft, www.aro.at, 2001
- 21 Kaila Panu, Talotohtori; WSOY, 1997, S 504 ff.
- 22 Fa. Dämmstatt W.E.R.F GmbH, D-10245 Berlin
- 23 Streule G./Wälti O., Zellulosefasern als
Wärmedämmung, Diplomarbeit Integrale
Bautechnik, Winterthur 1991
- 24 Boonyartikarn/Spiezele, "Colorado-Studie",
University of Colorado, Denver 1989 (bei
www.klimatec-system.de bzw. www.cellulose.org)
- 25 Prof. Dipl.-Ing. Horst Schulze, in
„Bauen mit Holz“ 6/99
- 26 US Patent Nr. 5365716/1993
- 27 US Patent Nr. 4773960/1988
- 28 Österreichisches Institut für Baubiologie und -
ökologie, Donau-Universität Krems (Hrsg.),
Ökologie der Dämmstoffe, Wien 2000
- 29 Patent Nr. WO 94/24199
- 30 Isoprojex S.A., 214 rue Descartes, Z.I.-B.P.5, 54712
Ludres Cedex, France
- 31 Patent Nr. EP 484873, Firma Kematherm,
Posthof 2c, D-38704 Liebenburg
- 32 Patent Nr. WO 97/05205,
US Patent Nr. 4773960/1988
- 33 Römpf Lexikon Chemie - CD Version 1.3,
Stuttgart/New York: Georg Thieme Verlag (1997).
- 34 Aspinall, The Polysaccharides, Bd.2, 462 - 465,
New York: Academic Press 1983. Encycl. Polym.
Sci. Eng. 7, 597 ff. Carbohydr. Polym. 11, 279 - 292
(1989); 12, 1 - 7 (1990).

- 35 Izydorczyk, M.S. (Food Science Department, University of Manitoba, Winnipeg, MB Canada); Billiaderis, G.G. Department of Food Science and Technology, Aristotle University, Thessaloniki, Greece, 54006): Gradient ammonium sulphate fractionation of galactomannans. *Microbiology and Biotechnology* 1, 3 pp.295 - 300 (1996)
- 36 Leenhouts, K.L.(1) (1), A. Bolhuis (1), A. Ledebøer (2), G. Venema (1), J. Kok (1): Production of secreted guar α-galactosidase by *Lactococcus lactis*. *Applied Microbiology and Biotechnology*. Volume 44 Issue 1/2 pp 75 - 80 (1995). ISSN: 0175-7598 (printed version) ISSN: 1432-0614 (electronic version) Groningen Biomolecular Sciences and Biotechnology Institute, Department of Genetics, University of Groningen, Kerklaan 30, 9751 NN Haren, The Netherlands. Fax: + 31 50 632 348 (2) Unilever Research Laboratorium Vlaardingen, Olivier van Noortlaan 120, 3133 AT Vlaardingen, The Netherlands.
- 37 Frollini, E.; W.F. Reed, M. Milas, M. Rinaudo: Polyelectrolytes from polysaccharides: elective oxidation of guar gum - a revisited reaction. *Carbohydr. Polym.* 27, 129 - 135 (1995).
- 38 Kanerva, L. (Institute of Occupational Health (Helsinki): Guar Gum As Cause Of Occupational Allergic Rhinitis E Nordiska Arbetsmiljömötet, 25 - 27 Augusti (1987), Arbetarskyddsstyrelsen, Reykjavik, S. 227 - 228, (1987).
- 39 Stützel, H., Guar - eine tropische Körnerleguminose mit bescheidenen Ansprüchen und vielseitiger Verwendbarkeit. *Entwicklung und Ländlicher Raum* 26(6), 14 - 17 (1989).
- 40 The starch research Group, Department of Biochemistry and Pharmacy Åbo Academi University Project Title: Starch Structure Subprojects: a) Structure of amylopectins from different starches; b) Structure of amyloses from different starches; c) Structure of starch granules; d)Enzymic hydrolysis of granular and solubilised starches; e) Structure and hydrolysis of chemically modified starches; Project Leader: Eric Bertoft, PhD, Docent (1990)
- 41 Krotscheck C., Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe in Österreich, Studie i.A. BMWV, Wien 1997.
- 42 Tänzer, W., Biologisch abbaubare Polymere / Wolfram Tänzer. – Stuttgart: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, (2000).
- 43 Greber M.J., Lehmann E., Van der Werth A.: „Die tierischen Leime“ Geschichte – Herstellung – Untersuchung – Verwendung und Patentübersicht. (1950) (Straßenbau, Chemie und Technik Verlagsgesellschaft m.b.H., Heidelberg.
- 44 Schliephake, D., Luck, T., Borcharding, A., (1995) Abschlußbericht zum Teilvorhaben „Evaluierung der tech. Verwertungsmöglichkeiten für die Nebenprodukte der Ölerzeugung aus Raps“ (BMFT-Verbundprojekt „Kratstoff aus Raps“) Fraunhofer-Institut für Lebensmitteltechnologie und Verpackung (ILV). München.
- 45 Lemoigne, M., (1927). Études sur l'autolyse microbienne: origine de l'acide η -oxybutyrique formé par autolyse. *Ann. Inst. Pasteur* 41, 148-165.
- 46 Kunioka, M., Nakamura, Y., Doi, Y., (1988). New bacterial copolyesters produced in *Alcaligenes eutrophus* from organic acids. *Polym. Commun.* 29, 174-176.
- 47 Braunegg, G., Lefebvre, G., Genser, K.F., (1998). Polyhydroxyalkonates, biopolyesters from renewable resources: Physiological and engineering aspects. *Journal of Biotechnology* 65 (1998) 127-161. Braunegg, G., Lefebvre, G., Renner, G., Zeiser, A., Haage, G., Loidl-Lamthaler, K., (1995). Kinetics as a tool for polyhydroxyalkonate production optimization. *Can. J. Microbiol* 41, 239-248.
- 48 Monsanto (Deutschland) GmbH (1997): Firmenschriften. Düsseldorf. Monsanto (Deutschland) GmbH (1997): Persönliche Mitteilung. Düsseldorf.
- 49 Klapan, D. L., Mayer, J. M., Ball, D., McCassie, J., Allen, A. L., Stenhouse, P., (1993) Fundamentals Biodegradable Polymers. In: Ching, Ch., Kaplan, D. L., Thomas, N., (Hrsg.): Biodegradable Polymers and Packaging. Lancaster (USA), 1-42.

- 50 Wella AG (1990): Firmenschriften. Darmstadt.
- 51 Steinbüchel, A., (1995) Mikroorganismen für die Herstellung von Polymeren. CLB Chemie in Labor und Biotechnik 46, 228-231.
Steinbüchel, A., (1995) Mikrobielle und chemische Synthese von biologisch abbaubaren Polyester. Chemie in unserer Zeit 29 (Nr.5). Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 260-271.
- 52 Menner, M., und Luck, T., (1997). Biologische Vielfalt bakterieller Kunststoffe. Bioworld 1, 8-13.
- 53 Ziegler, K., et al., Das Mülheimer Normaldruck-Polyethylen-Verfahren, Angew. Chem. 67, 541 (1955) und 71,623 (1959); Ziegler, k., Folgen und Werdegang einer Erfindung, Angew. Chem. 76, 545 (1964).
- 54 Beyer, H., Walter, W. (1998): Lehrbuch der Organischen Chemie. Stuttgart: Hirzel Verlag.
- 55 Natta, G., (1964): Von der stereospezifischen Polymerisation zur asymmetrischen autokatalytischen Synthese von Makromolekülen. Angew. Chem. 76, 553.
- 56 Clariant GmbH 1997 Division Cellulose Ethers & Polymerisates D- 65926 Frankfurt am Main; Firmenschrift: <http://www.cep.clariant.com>
- 57 Saechting, H., Woebcken, W., (1992): Kunststoff-Taschenbuch. München: Carl Hanser Verlag.
- 58 Knissel, W., Rückwald, T., Triebel, R.: Grundlagen der untertägigen Entsorgung von zu immobilisierenden Abfällen. In: Glückauf 132 (1996), Nr. 4, S. 148 - 154.
- 59 Landesinnovationskolleg "Synthese wirtschaftlich und ökologisch optimierter Wärmedämmsysteme durch den Einsatz nachwachsender Rohstoffe, textiler Fasern und Wertstoffe". Sprecher: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Offermann, Fakultät Maschinenwesen, TU Dresden (1999).
- 60 Mackwitz H.W., Materialoptimierung und Verfahrensentwicklung für den Faserwerkstoff Zelfo, i.A. der Zellform GmbH, (1999).
- 61 Mortimer, E. Ch., Chemie: Das Basiswissen der Chemie in Schwerpunkten. Georg Thieme Verlag Stuttgart. New York (1980).
- 62 Hengge, E., Guttman, V., Anorganische Chemie. Eine Einführung. Wiley/VCH, Weinheim (1990).
- 63 Duda, Cement Data Book., (1985) Duda, Cement Data Book, Bd. 1, Internationale Verfahrenstechniken der Zementindustrie, 3. Aufl., Wiesbaden: Bauverl. 1985.
- 64 Ullmann; Winnacker-Küchler., (1986) Ullmann (5.) A5, 489–516; Winnacker-Küchler (4.) 3, 214–253. (1996).
- 65 DIN-Katalog Sachgruppe 5875, Berlin: Beuth (jährlich)
- 66 Zement Jahresbericht. (1991) Zement Jahresbericht 90–91 u. Zement 90–91, Zahlen u. Daten, Köln: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie 1991.
- 67 Reinhalt., (1979) Reinhalt. Luft 39, Nr. 12, 457–462 (1979).
- 68 Zem.-Kalk-Gips 42, 120–127 (1989); 43, 121–131 (1990).
- 69 Zem.-Kalk-Gips 28, 94 (1975).
- 70 Fechner, H.; Häupl, P.; Martin, R.; Stopp, H.: Thermische Sanierung eines Gründerzeithauses mit einer kapillaraktiven Calciumsilikat-Innendämmung in: Künzel, H.M. (Hrsg): Praktische Beurteilung des Feuchteverhaltens von Bauteilen durch moderne Rechenverfahren, WTA-Schriftenreihe Heft 18, 1999

Anhang

Wärmedämm-Verbundsysteme

1. Ausführung

Ein Wärmedämm-Verbundsystem besteht aus, auf die massive Außenwand aufgeklebten und/oder gedübelten Dämmplatten, einer Armierungsschicht mit einem in die Armierungsmasse eingebetteten Glasseidengewebe und einer Grundierung mit Schlußbeschichtung. Zusätzlich werden Profile mit Textilglasgitteranbindung wie zB Gewebewinkel, An- und Abschlussprofile, Dehnfugenprofile etc. verwendet.

Als Dämmstoff finden folgende plattenförmige Produkte Verwendung:

- ≠ expandierter Polystyrol-Hartschaum (EPS-F gemäß ÖNORM B 6050)
- ≠ extrudierter Polystyrol-Hartschaum (XPS-R, gemäß ÖNORM B 6053)
- ≠ Polyurethan-Hartschaum (PUR-DO gemäß ÖNORM B 6055)
- ≠ Mineralwolle (MW-PT gemäß ÖNORM B 6035)
- ≠ Holzwolle und Holzwolle-Mehrschicht-Dämmplatten (gemäß ÖNORM B 6021)
- ≠ Dämmkork (DK-F gemäß ÖNORM B 6031)
- ≠ Schaumglas (CG-D und CG-HD gemäß ÖNORM B 6041)
- ≠ Mineralschaum und
- ≠ Holzweichfasern, für die keine Produktnormen vorliegen.

Ein Sonderfall ist die sogenannte Transparente Wärmedämmung (TWD), bei der lichtdurchlässige oder -leitende Strukturen (zB Polymethylmethacrylat – PMMA, oder dünne Glasröhrchen) senkrecht zur Wandoberfläche montiert und mit einem lichtdurchlässigem Gipsputz beschichtet werden.

Für die Zellulosedämmung sowie für aufgespritzte Dämmkörper aus Zelluloseflocken existieren ebenfalls keine Produktnormen.

Grundlagen:

ÖNORM B 2259

Herstellung von Außenwand-Wärmedämm-Verbundsystemen - Werkvertragsnorm (05/99)

ÖNORM B 6110

Außenwand-Wärmedämm-Verbundsystem aus Polystyrol-Partikelschaumstoff und Dünnputz (05/92)

ÖNORM B 6135

Außenwand-Wärmedämm-Verbundsysteme aus Mineralwolle-Dämmplatten MW-PT und Deckschichte (10/98)

ÖNORM B 6410 E

Außenwand-Wärmedämm-Verbundsysteme – Verarbeitungsnorm, Entwurf (noch nicht veröffentlicht)

sowie die Herstellerangaben der Mitgliedsunternehmungen [1].

Bezüglich Sockelausbildung und Übergang zur Perimeterdämmung ist gemäß ÖAP-Merkblatt „Putzen auf XPS-R“, 2. überarbeitete Auflage 06/95 zu verfahren.

Der Untergrund, die Außenseite der Außenwand, muß auf Haft- und Tragfähigkeit geprüft und gegebenenfalls gereinigt werden. Fehlstellen sind beizuputzen; stark saugende Untergründe erfordern eine Grundierung. Unter Umständen kann eine Vorbehandlung durch Abschleifen, Abbürsten, Dampfstrahlen oder Trockenlegen erforderlich werden, wenn ein zu poröser, zu glatter, zu nasser oder zu staubiger Untergrund die Haftung des Klebemörtels beeinträchtigt. Die Klebmasse soll auf die Art der Platten und den Untergrund abgestimmt sein. Für eine kraftschlüssige

1 Qualitätsgruppe Vollwärmeschutz, Verarbeitungsrichtlinie für Außenwand-Wärmedämm-Verbundsysteme A-8074 Raaba, 03/2001

Verbindung des Dämmstoffs mit dem Untergrund muß der Kleber gut auf Dämmstoff und Untergrund haften, eine hohe Haftzugfestigkeit, gutes elastisches Verhalten und hohe Wasserbeständigkeit aufweisen. Außerdem ist ein niedriges Schwindmaß von Bedeutung, um Schwindrisse im Kleber und das Auftreten von Scherkräften, die zum Versagen der Klebeverbindung führen können, weitestgehend zu vermeiden. Möglich ist eine vollflächige oder Batzenverklebung mit Randwulst. Es ist jedoch eine Klebekontaktfläche von mindestens 40 % mit einer Schichtdicke von 1 - 2 cm vorgeschrieben. Gegebenenfalls erfolgt eine zusätzliche Verdübelung.

Polystyrol EPS-F-Platten, Mineralfaser-Lamellen und Kork-DK-F-Platten benötigen zusätzlich zur Verklebung eine Verdübelung nur:

≠# wenn das Flächengewicht von Kleber, Dämmschicht und Deckschicht 30 kg/m² übersteigt

≠# auf Betonflächen

≠# auf Putzflächen

Mineralwolle MW-PT-Platten sind zusätzlich zur Verklebung immer zu dübeln.

Die Höhe des Objektes und seine Lage haben Einfluss auf die erforderliche Dübelanzahl. Dies gilt insbesondere für die Randzonen, da hier bedeutende Windsog-Kräfte auftreten können. Die ÖNORM B 4014-Teil 1, Belastungsannahmen im Bauwesen – Statische Windwirkungen, legt die Breite dieser Randzone fest. Sie beträgt an beiden Seiten aller Gebäudekanten mindestens 1 Meter. Ist die Höhe der Fassadenfläche des Gebäudes größer als seine Länge, beträgt die Breite der Randzone 10 % der Länge, ist sie gleich oder kleiner, beträgt die Breite der Randzone 10 % der Höhe.

In der Fläche sind mindestens 6 Dübel/m² anzubringen, in der Randzone kann eine Erhöhung auf 12 Dübel/m² erforderlich sein. Die Dübel dürfen erst gesetzt werden, wenn der Kleber erhärtet ist.

Dämmplatten der Produktart EPS-F und MW-PT erfordern Dübeltellerdurchmesser \approx 60 mm, jene der Produktart MW-PT mit stehender Faser Dübeltellerdurchmesser \approx 140 mm [1].

Die Windsoglasten erzeugen Quersugkräfte in der Klebung, Zugkräfte in den Dübeln sowie Quersugbeanspruchungen sowohl im Dämmstoff als auch zwischen dem Putz und dem Dämmstoff. Die Abtragung des auf den Putz einwirkenden Windsogs ist abhängig von der Lage der Dübelteller. Je nachdem, ob die Dübelteller über den Gewebematten liegen oder direkt auf der Dämmstoffoberfläche und vom Gewebe überdeckt werden, wird der Windsog entweder im wesentlichen vom Putz über den Dübelteller und Dübel in die tragende Wand abgetragen oder die Verklebung mit dem Putz bewirkt, dass sich die Dämmschicht gegen die Dübel abstützt, so dass eine punktgestützte Platte vorliegt [2].

Durch punktförmige Verklebung oder Verdübelung werden zusätzliche Biegebeanspruchungen in den einzelnen Schichten verursacht, die jedoch von geringer Bedeutung sind.

Die wichtigsten Materialeigenschaften der Dämmstoffe sind eine niedrige Wärmeleitfähigkeit, hohe Elastizität, ausreichende Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene, Unverrottbarkeit und eine Temperaturbeständigkeit von - 30 °C bis + 80 °C.

Eine einwandfreie, ebenflächige Beschichtung erfordert möglichst geringe Längen-, Breiten- und Dickentoleranzen sowie eine exakte Rechtwinkligkeit. Polystyrolhartschaumplatten müssen vor der Verarbeitung mindestens 3 Monate abgelagert sein, da sie in dieser Zeit 2 % schwinden und eine zu kurze Ablagerungszeit zu Rissen im Oberputz, vor allem über den Plattenstößen, führen würde.

Die Wahl des Dämmstoffs beeinflusst die Druckfestigkeit des Systems. Eine hohe

Druckfestigkeit weisen Mineralfaserlamellen auf (senkrecht zur Einbauebene laufende Fasern anstatt der sonst parallel verlaufenden Fasern), die jedoch zu Einbußen der Schalldämmwerte führen.

Je nach Material werden die Dämmplatten in unterschiedlichen Formaten angeboten. Während Hartschaumplatten in der Regel Abmessungen von 100 x 50 cm haben, weisen Mineralfaserplatten Maße von 80 x 62,5 cm und Mineralfaserlamellen solche von 120 x 20 cm auf. Die Standarddicken der Hartschaumplatten liegen zwischen 1 und 16 cm; die von Mineralfaserplatten zwischen 4 und 14 cm. Für die Stoßkanten sind unterschiedliche Ausführungen üblich. Je nach Hersteller gibt es Ausbildungen als stumpfer Plattenstoß, Stufenfalz oder Nut und Feder

Die Armierungsschicht besteht aus einem schiebefesten Glasseidengewebe, das in die Armierungsmasse, deren Material meist mit dem des Klebers identisch ist, eingebettet wird. Die Armierungsmasse dient vor allem dem kraftschlüssigen Verbund des Armierungsgewebes mit den Dämmplatten und dem Schutz des Gewebes. Es ist Aufgabe der Armierung, sämtliche inneren und äußeren Kräfte aufzunehmen und die auftretenden Spannungen schadensfrei über den Verbund abzuleiten. Voraussetzung dafür ist, dass die Gewebeeinlage einen geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten als die übrigen Verbundkomponenten hat. Außerdem ist eine geringe Bruchdehnung und hohe Bruchlast erforderlich. Diese Anforderungen erfüllen nur Glasseidengewebe. Es sollte möglichst alkalibeständig sein, weil es der Alkalität des umhüllenden Putzes ausgesetzt ist.

Die Deckschicht schließt als Witterungsschutz das Gesamtsystem nach außen ab. Als Oberputz kommt Kunstharzputz, Mineralputz, Silikon- oder Silikatputz in Frage. Er kann in verschiedenen Strukturen, von fein bis grob, als Kratzputz, Reibputz, Kellenwurfputz, Scheibenputz ua. ausgeführt werden. Um ein schnelles Austrocknen und damit

eine Haarrissbildung zu verhindern, sollte er in seinem elastischen Verhalten auf die Armierungsschicht abgestimmt sein. Ferner ist der Einsatz von Flachverblendern oder eine Riemchenbekleidung denkbar. Diese werden meist gewählt, wenn der Charakter von Sichtmauerwerk erwünscht ist. Besonders wichtig ist allerdings, dass die einzelnen Systemkomponenten miteinander verträglich und aufeinander abgestimmt sind. Dies dürfte der Fall sein, wenn nur erprobte Systeme eines Herstellers mit Langzeiterfahrung verwendet werden. Die Verarbeitung von Produkten verschiedener Hersteller in einem System kann zu Schäden führen [3].

2. Wirkungsweise [3]

Neben dem Wärmeschutz bieten Wärmedämm-Verbundsysteme der Außenwandkonstruktion Schutz vor Witterungseinflüssen und verhindern somit Bauschäden. Durch die Einsparung von Heizenergie leisten sie einen Beitrag zum Umweltschutz.

Auch eine Verbesserung des Schallschutzes kann erzielt werden. Häufig wird er jedoch verschlechtert. Die außenseitige Wärmedämmung begünstigt ein gesundes, behagliches Raumklima, gute Wärmespeicherung und einwandfreie Wasserdampfdiffusion - unter der Voraussetzung, dass durch Anstriche die Wand nicht dampfdicht wird - und vermeidet Wärmebrücken. An den Innenflächen von Wänden werden unangenehme „Zuglufterscheinungen“ verhindert, da die Temperaturdifferenz zwischen Wandoberfläche und Raumluft sehr klein ist.

Wärmedämm-Verbundsysteme ermöglichen bei Neubauten geringere Außenwanddicken, da der tragende Teil der Konstruktion lediglich statischen

3 Institut für Bauforschung e.V. Hannover (Hrsg.), Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) im Wohnungsbau, IRB Verlag Stuttgart, 1997

Anforderungen genügen muss. Beim Gebäudebestand kann das Aufbringen eines WDVS im Zuge einer eventuell ohnehin notwendigen Sanierung des Außenputzes durch die Heizenergieeinsparungen eine sehr wirtschaftliche Variante sein.

Risse in der WDVS-Fassade treten häufig dort auf, wo diese ungeschützt den Witterungseinflüssen ausgesetzt ist. Sie ermöglichen dann zusätzliches, ungehindertes Eindringen von Wasser in den Baukörper. Untersuchungen haben gezeigt, dass Wärmeschutzmaßnahmen zur Austrocknung von durchnässten Wänden führen können. Dadurch lassen sich Kondenswasserprobleme beseitigen, so dass einer Stockfleckenbildung vorgebeugt wird.

Darüber hinaus wurde in anderen Untersuchungen festgestellt, dass durch das Aufbringen der Wärmedämmung auf Außenwänden aus Stahlbeton eine Bewehrungskorrosion nachhaltig gehemmt werden kann [4].

3. Putze auf WDVS [1]

Putze müssen als End- oder Schlußbeschichtung auf einem Wärmedämm-Verbundsystem vielfältigen Anforderungen gerecht werden. In Verbindung mit der Armierungsschicht übernimmt die Endbeschichtung eine Schutzfunktion gegen Witterungseinflüsse und mechanische Beanspruchungen sowie die Aufgabe der Fassadengestaltung.

Die Ö-Normen B 6110 und B 6135 ermöglichen für Außenwand-Wärmedämm-Verbundsysteme folgende Varianten:

Dünnschicht Deckputz mit einer Schichtdicke von 1,5 – 4,0 mm (bei Überwiegen der Rillenstruktur mind. 2 mm):

≠# kunstharzgebunden (für Systeme mit EPS-F)

≠# silikatgebunden

≠# silikonharzgebunden

≠# mineralisch gebunden (Kalk-Zement),
kunstharzvergütet

Dickschicht-Deckputz mit einer Schichtdicke über 4,0 mm:

≠# mineralisch gebunden (Kalk-Zement),
kunstharzvergütet

Bei Einhaltung der in DIN 18550-1 festgelegten Anforderungen an den Wasseraufnahmekoeffizienten und den Sperrwert (diffusionsäquivalente Luftschichtdicke) der regenschützenden Außenschicht ist der Regenschutz auch bei starker Beanspruchung gegeben. Risse und Fehlstellen in der Außenschicht können aber deren Regenschutzwirkung deutlich mindern. Besonders bei saugfähigen Wandbaustoffen können schadhafte Außenputze oder Beschichtungen bzw. angemörtelte Bekleidungen zu Folgeschäden führen (zB Frostschäden) und den Wärmeschutz durch erhöhte Feuchte reduzieren. Daher sind die handwerkliche Ausführung und das Langzeitverhalten solcher Schichten entscheidend für die Wirksamkeit des Regenschutzes.

Die Hydrophobierung von Putzen bei WDVS erfolgt somit eigentlich nicht zum Schutz des Dämmstoffes, der im Falle von EPS oder Mineralfasern ja kaum flüssiges Wasser aufnimmt, sondern zum Schutz des Putzes selbst, der wegen des nicht saugfähigen Putzgrundes bei Regen höhere Feuchtegehalte annehmen kann („Feuchtestau“) und daher unter winterlichen Bedingungen eher frostgefährdet ist als auf saugfähigem Mauerwerk [5].

5 Künzel, H: Warum sich Wärmedämm-Verbundsysteme durchgesetzt haben - Vergleiche mit anderen Wandkonstruktionen; Sonderdruck aus: 20 (1998), Heft 1, Verlag Ernst & Sohn, Berlin

4 Cziesielski/Safarowsky zit. in [3], Seite 13

Organisch gebundene Putze haben zur Zeit einen Anteil von etwa 50 % an den Deckbeschichtungen auf WDVS, mineralisch gebundene Putze etwa 40 % und auf Verkleidungen und Verblendungen entfallen etwa 10 %.

Oberputze auf WDVS müssen sich gut verarbeiten lassen, spritzbar und silogängig sein und eine geringe Wasseraufnahme bei gleichzeitig hoher Wasserdampfdiffusionsfähigkeit besitzen. Weitere Anforderungen sind die Unempfindlichkeit gegen Rißbildung sowie die Resistenz gegen Algen, Pilze und sonstige Schädlinge. Zur Auswahl stehen mineralisch, silikat-, silikonharz- und kunstharzgebundene Putze. Je nach Putz- oder Beschichtungsart, Auftragsdicke und Körnung sind auch zur Oberflächengestaltung von Putzen und Beschichtungen auf WDVS verschiedene Putzstrukturen entsprechend DIN 18550 bzw 18558 möglich [6].

Bei WDVS ist durch die schubweiche Dämmschicht – ob durch EPS-Platten oder durch Mineralwolleplatten - eine starke Entkoppelung des Außenputzes vom Wandbildner gegeben. Deshalb sind WDVS auch gut geeignet zur Sanierung von gerissenen Fassaden oder Fassaden mit Bewegungsrissen (zB Fachwerkhäuser, Plattenbauten). Die Bewegung solcher Risse aus hygrischer oder thermischer Ursache wird außerdem durch die Dämmschicht vermindert. [5]

Wasserabweisender Putz

Putze, die die Anforderungen der DIN 18550, Teil I erfüllen, werden als wasserabweisende Putze bezeichnet. Dies sind Kunstharz-, Siliconharz-, Silikat- und in Ausnahmen mineralische Putze. In der Regel benötigen mineralische Putze hydrophobierende Zusätze, um den Anforderungen der Normen gerecht zu werden.

Wasserabweisende Putze oder Putzsysteme haben einen Wasseraufnahmekoeffizient von $w \leq 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{h}^{0,5})$.

Soll der Wasseraufnahmekoeffizient eines Baustoffes ermittelt werden, wird die entsprechende Oberfläche der Baustoffprobe einige Millimeter tief in Wasser getaucht. Danach wird die Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Zeit durch regelmäßiges Wiegen ermittelt. Der Wasseraufnahmekoeffizient klassifiziert Baustoffe nach ihrem Wasseraufnahmevermögen [6]:

saugend	$w > 2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{h}^{0,5})$
wasserhemmend	$w \leq 2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{h}^{0,5})$
wasserabweisend	$w \leq 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \times \text{h}^{0,5})$

4. Putzarten [6]

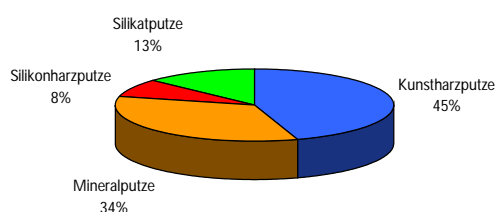


Abb 1. Anteile von Oberputzen auf WDVS

Kunstharzputze

Organisch gebundene Putze bzw. Kunstharzputze sind in der DIN 18558 reglementiert und werden seit ca. 40 Jahren verarbeitet. Hierbei handelt es sich um Beschichtungen mit putzartigem Aussehen. Kunstharzputze stehen mineralischen Putzen der Mörtelgruppe P II (hochhydraulische Kalke, Putz- und Mauerbinder, Kalk-Zement-Gemische) und P III (Zemente) in ihrer Festigkeit gegenüber Druck-, Zug- und Reibungsbeanspruchung nicht nach. Aufgrund ihrer Elastizität eignen sich

6 Frössel, F: Lexikon der Putz- und Stucktechnik, IRB Verlag Stuttgart 1999

Kunstharzputze besonders gut zur Endbeschichtung auf Wärmedämm-Verbundsystemen, weil sie sich den thermisch bedingten Formänderungen der Dämmplatten problemlos anpassen.

Trotz der häufigen Vorurteile, dass Kunstharzputze (oft auch als Kunststoffputze bezeichnet) diffusionsdicht sind und nicht »atmen« können, kann dies durch die Zusammensetzung widerlegt werden.

Kunstharzputze bestehen zu ca. 82 % aus mineralischen Bestandteilen (Quarz, Marmor oder Kalkstein), zu ca. 10 % aus Wasser und zu etwa 8 % aus Bindemitteln und Zusätzen (Dispersionen, Additiven, Konservierungsmitteln). Diese Zusammensetzung kann durch die Korngröße, Struktur und je nach Hersteller variieren und dient lediglich einer Orientierung.

Die mineralischen Bestandteile besitzen einen überwiegenden Kornanteil $> 0,25$ mm. In der DIN 18558 werden Kunstharzputze zudem hinsichtlich der Oberflächenstrukturen und -effekte unterschieden in Reibputz, Rillenputz, Kratzputz, Spritzputz, Modellierputz, Buntsteinputz, Streichputz und Rollputz.

Hinsichtlich des Abtönverhaltens weisen Kunstharzputze von allen derzeit bekannten Putzsystemen die besten Eigenschaften auf. Ihre geringe Alkalität erlaubt die Herstellung jedes gewünschten Farbtons ohne Einschränkung, ob ein Pastell- oder Intensivfarbton gefordert wird. Eine derartige Farbtonvielfalt ist nur unter Verwendung von anorganischen und organischen Pigmenten (zB Sepia, Purpur, usw.) möglich. Die Grundlage für den Erfolg der Kunstharzputze liegt in den vielseitigen Einsatzmöglichkeiten. Sie sind UV-stabil und trotz einer hohen Witterungsbeständigkeit wasserdampfdiffusionsoffen. Hinsichtlich der physikalischen Anforderung schreibt die DIN 18558 folgende Werte für organisch gebundene Putze vor:

$$w_{sd} \leq 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ h}^{0,5})$$

$$w \leq 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ h}^{0,5})$$

$$sd \leq 2 \text{ m}$$

Der Wasseraufnahmekoeffizient w beschreibt, welche Menge Wasser in kg/m^2 ein Baustoff oder die Beschichtung in der ersten Stunde aufnimmt. Der sd -Wert beschreibt die Dicke der ruhenden Luftschicht in Metern, die in ihrem Diffusionsverhalten der jeweiligen Schichtstärke des Baustoffes entspricht. Die mechanisch hohe Beanspruchbarkeit sowie der Einsatz auf nahezu allen (richtig vorbereiteten) Untergründen spiegelt die Vielfältigkeit der Kunstharzputze wider. Durch den rein physikalischen Trocknungsvorgang haben Kunstharzputze den weiteren Vorteil, dass sie während der Verarbeitung nicht nachdicken. Sie sind bei ca. 20 °C Lufttemperatur nach 6 Stunden griffest und nach ca. 14 Tagen durchgetrocknet.

Aufgrund einer neuen QS-Technologie ist es heute bereits möglich, den Trocknungsvorgang soweit zu beschleunigen, dass bereits nach ca. 4 Stunden eine Hautbildung an der Oberfläche dazu führt, dass der Kunstharzputz gegen einsetzenden Schlagregen und/oder Frost geschützt ist und der Trocknungsvorgang ungestört ablaufen kann.

Mineralische Putze

Putze mit mineralischen Bindemitteln gemäß DIN 18550 werden in die Putzmörtelgruppen PI bis PIV eingestuft und als mineralische Putze bezeichnet.

Hierzu zählen Kalk-, Kalkgips-, Kalkzement-, Gips-, Gipskalk-, und Zementputze. Silikatgebundene Putze werden umgangssprachlich aufgrund ihrer mineralischen Eigenschaften ebenfalls als Mineralputz bezeichnet.

Silikatputze

Silikatputze sind kaliwasserglasgebundene Beschichtungen, die durch einen Kunstharzanteil

organisch vergütet sind. Neben dem Bindemittel Kaliwasserglas werden Silikatputzen (je nach Hersteller) unterschiedlich hohe Anteile an Dispersion zugegeben. Durch diese Zugabe werden die Farbtonstabilität sowie die Hafteigenschaften verbessert. Bei der Zugabe des Dispersionsanteils orientieren sich die meisten Hersteller an der DIN 15363, in der die Zusammensetzung der Dispersions-Silikatfarben geregelt wird. Dies bedeutet in der Praxis, dass Silikatputze maximal 5 % Massenanteil an organischen Bestandteilen, bezogen auf die Gesamtmenge des Beschichtungsstoffes, enthalten. Silikatputze zeichnen sich durch eine gute Wasserbeständigkeit und Dauerhaftigkeit aus. Das Brandverhalten von Silikatputzen ist in Prüfbescheiden geregelt.

Besonders hervorzuheben ist die hohe Wasserdampfdurchlässigkeit von silikatgebundenen Beschichtungssystemen. Deshalb werden Silikatputze und -farben schwerpunktmäßig in der Baudenkmalpflege, aber auch als Schlussbeschichtung auf Wärmedämm-Verbundsystemen eingesetzt. Das wasserlösliche Wasserglas als Hauptbindemittel der Silikatputze bindet nicht nur durch das Verdunsten des Wassers (physikalisch), sondern auch durch einen chemischen Vorgang ab. In der Luft enthaltenes Kohlendioxid wird dabei aufgenommen und es entsteht ein wasserunlösliches, polymeres Silikatgerüst sowie Pottasche. Dieser Vorgang wird mit dem Begriff der Verkieselung umschrieben. Die beim Verkieseln entstehende Pottasche ist wasserlöslich. Bei farbigen Putzen kann diese Pottasche zu weißen Ausblühungen führen, die im Laufe der Zeit verschwinden, da sie durch Regen ausgewaschen werden. Die Verkieselung wird im wesentlichen durch Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Art des Untergrundes beeinflusst. Schäden entstehen bei Temperaturen unter + 5 °C, da der Verkieselungsvorgang gestört wird und das Wasserglas zum Teil wasserlöslich bleibt. Bei

Temperaturen um den Gefrierpunkt kommt der Verkieselungsvorgang zum Stillstand. Auch bei langanhaltender hoher Luftfeuchtigkeit wird die Verkieselung des Wasserglases behindert. Durch Taubildung, Nebel oder Regen bildet sich Oberflächenwasser, das in diesem Fall noch nicht verkieseltes Wasserglas an die Oberfläche transportiert. Kommt es bei farbigen Silikatputzen zu weißen Auswanderungen oder Abläufen, ist dies fast immer auf eine der genannten Störungen im Verkieselungsprozess zurückzuführen. Nicht abgebundenes Wasserglas birgt die Gefahr einer weiteren Schädigung: Gelangen während der Verarbeitung von Silikatputzen Spritzer auf Glas, Holz, eloxierte Teile, Metall oder dgl. werden diese verätzt. Diese Verätzungen können kaum oder gar nicht entfernt werden. Die Abdekarbeiten vor Ausführung silikatischer Beschichtungen sollten deshalb sorgfältig und gewissenhaft durchgeführt werden.

Silikatputze werden als Kratz-, Rillen- oder Modellierputze hergestellt. Hinsichtlich des Abtönverhaltens besteht eine ähnliche Problematik wie bei den mineralischen Putzen, bei denen nur alkalibeständige Pigmente eingesetzt werden können. Silikatputze werden sowohl im Innen- und Außenbereich eingesetzt und haben in den letzten Jahren aufgrund ihres mineralputzähnlichen Charakters an Image gewonnen.

Eigenschaften der Putzsysteme	Mineralputz	Silikatputz*	Siliconharzputz*	Kunstharzputz
Ästhetische Eigenschaften				
Farbtonwahl	+	+	+	+++
anorganische Pigmente	+	+	+	+
organische Pigmente	—	—	—	+++
Farbtonstabilität	+	+	++	+++
Fleckenfreies Auftrocknen	—	+	+++	+++
Ausblühneigung	—	+	+++	+++
Verschmutzungsresistenz	++	++	+++	+
Algenresistenz	++	++	+++	+
Kreidungsresistenz	—	+	+	+++
Physikalische Eigenschaften				
Elastizität	—	—	+	++
Porosität	+++	+++	++	++
Wasserdampfdurchlässigkeit	+++	+++	+++	+
Wasserabweisende Wirkung	—	+	+++	+++
Regenschutz	—	+	+++	+++
Feuchtigkeitsabgabe	+++	++	++	—
Widerstandsfähigkeit gegen Luftschadstoffe	—	+	++	+++
CO ₂ -Durchlässigkeit	+++	+++	++	—
Betonschutz	—	—	—	+++
Mechanische Widerstandsfähigkeit	+	+	+	+++
Verarbeitung				
auf mineralischen Untergründen	+++	+++	+++	+++
auf organischen Untergründen	—	+	+	+++
maschinelles Spritzen	+	+	+++	+++
aus dem Silo	+	+	+++	+++
Renovierbarkeit	+++	+++	+	+

* Da für Silikat- und Siliconharzputze keine einheitlichen Anforderungen definiert sind, variiert die Bewertung durch die Qualität einzelner Produkte.

+++ sehr gut ++ gut + zufriedenstellend - schlecht

Abb. 2 Tabelle Grundlegende Eigenschaften von Putzen [6]

5. Thermische Beanspruchungen [3]

Temperaturwechsel und Sonneneinstrahlung bewirken ein unterschiedliches Dehnverhalten in den verschiedenen Baustoffen des

Wärmedämm-Verbundsystems. Eigenspannungen und Zwängspannungen zwischen den einzelnen Schichten sind die Folge. Unmittelbar betroffen von den äußeren Einwirkungen sind die Außenputze.

Sie haben das Bestreben, sich bei Erwärmung mehr auszudehnen und bei Befeuchtung mehr aufzuquellen als die darunterliegenden Wandschichten. Bei Abkühlung würden sie sich als Folge der Wärmekontraktion mehr als die anderen Schichten zusammenziehen bzw. bei Trocknung stärker schwinden. Infolge des Verbunds mit den anderen Schichten sind diese Formveränderungstendenzen behindert, so dass bei Erwärmung bzw. Befeuchtung Druckspannungen, bei Abkühlung bzw. Trocknung Zugspannungen auftreten [5].

Da die Zugfestigkeit geringer ist als die Druckfestigkeit, sind die aus den Zugspannungen resultierenden Oberflächenrisse häufig zu beobachten. Druckspannungen führen zur Bildung von Hohlstellen, Blasen und Ausbeulungen, die wiederum die Ablösung einzelner Putzschichten oder des gesamten Putzes bewirken, sobald eine verminderte Haftfestigkeit vorliegt. Diese Erscheinung tritt auch bei unterschiedlichen Dehnungsverhältnissen der einzelnen Schichten auf, insbesondere bei Kunstharzputzen auf mineralischen Putzschichten.

Laut der Untersuchung von Fouad „Zur Bestimmung der extremen Oberflächentemperatur von Dreischichtenplatten“ [7] sind folgende Temperaturdifferenzen zugrunde zu legen:

Absolute Temperaturdifferenz im Jahr: $\pm T = 95^{\circ}\text{K}$

Absolute Temperaturdifferenz an einem Sommertag je nach Strahlungsabsorptionsgrad:

- helle Fassade: $\pm T = 30^{\circ} - 40^{\circ}\text{K}$

- dunkle Fassade: $\pm T = 60^{\circ}\text{K}$

Bei einer angenommenen Einbautemperatur von $T = 10^{\circ}\text{C}$ wird das WDVS mit folgenden Temperaturbeanspruchungen belastet:

- im Sommer: $\pm T = + 65^{\circ}\text{K}$

- im Winter: $\pm T = - 30^{\circ}\text{K}$

Der Lastfall Temperaturabsenkung beeinflusst das System entscheidend, da hierbei Zugspannungen in der Deckschicht entstehen, die vom Armierungsgewebe aufgenommen werden müssen. Auch Dübel werden durch diese aus der Verbundwirkung resultierenden Zwängsspannungen beansprucht. Um schädliche Einflüsse auf das Tragverhalten des Wärmedämm-Verbundsystems auszuschließen, sind die temperaturbedingten Verformungen der Deckschicht möglichst zu begrenzen.

Die insbesondere durch Sonneneinstrahlung im Wärmedämm-Verbundsystem auftretenden Temperaturen sind abhängig von der Farbe des Putzes, der Wandorientierung und in geringem Maße von der Dicke der Putzschicht, der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmespeicherefähigkeit der Dämmschicht. Dunkle Putze führen im Verlaufe eines Tages zu größeren Temperaturdifferenzen als helle Putze.

Hellbezugswert [6]

Der Hellbezugswert ist eine Meßgröße für die Absorption der Sonneneinstrahlung (auf Fassadenflächen), die den Reflexionsgrad eines bestimmten Farbtones wiedergibt. Mit dem Sonnenlicht wird Wärmeenergie auf der Fassade frei, die wegen der Reflexion respektive Absorption wesentlich durch den Farbton der Oberfläche bestimmt wird. Ist dieser sehr hell, nähert er sich dem »absoluten Weiß«, ist die Reflexion groß, und nur ein geringer Teil der ankommenden Energie verbleibt auf bzw. in der Fassade. Ist die Oberfläche dunkel, findet kaum Reflexion statt. Je nach Farbtonhelligkeit des Putzes, also der Pigmentfarbe, wird ein entsprechend zunehmender Anteil von Sonnenenergie umgesetzt und aufgenommen. Handelt es sich bei dem Putzgrund um einen wärmedämmenden Untergrund (zB Wärmedämmputz, Wärmedämm-Verbundsystem, Leichtputz auf Porenbeton und dgl.), kann eine

Wärmeableitung in die Fassade und den Wandbildner teilweise oder gar nicht erfolgen.

Die Energieaufladung wird dabei durch verschiedene Farbgestaltungen an der Fassade, und zwar abhängig vom jeweiligen Hell- und Dunkelkontrast, erheblich beeinflusst. Infolgedessen entstehen Spannungen, die ab einer bestimmten Größenordnung zu Rissen in der Fassade führen können. Die Folge ist eindringendes Wasser, das beim Frost-Tau-Wechsel zu Schäden führt.

Entscheidend sind der Schwarzton mit der Kenngröße 0 und der (»absolute«) Weißton mit der Kenngröße 100. Der Hellbezugswert gibt an, wie weit der jeweilige Farbton dem Schwarz- oder Weißton angenähert ist. Obwohl vielfach die Meinung vertreten wird, dass der Hellbezugswert durch das Bindemittel oder den Glanzgrad bestimmt wird, ist hierfür das Pigment (Farbkörper) verantwortlich.

Folgende Hellbezugswerte dürfen nicht unterschritten werden [1]:

Bei kunstharzgebundenen Deckputzen	HBW 25
Bei silikat- und silikonharzgebundenen Deckputzen	HBW 30
Bei mineralisch (Kalk-Zement) gebundenen, kunstharzvergüteten Dickschicht-Deckputzen	HBW 30
Dünnschicht-Deckputzen	HBW 50
Dünnschicht-Deckputzen mit Egalisationsanstrich	HBW 30

Es liegen zwar instationäre Temperaturbeanspruchungen vor; Nannen und Gertis haben jedoch rechnerisch nachgewiesen, dass sich in der Praxis immer ein quasistationärer Temperaturzustand einstellt, der auf die meist geringen Putzdicken sowie die thermisch

abgekoppelten Masse der Wand zurückzuführen ist [8].

In Wärmedämm-Verbundsystemen mit zusätzlicher Dübelung treten neben den Zwängspannungen im Putz noch temperaturbedingte Zwängbeanspruchungen der Dübel auf. Cziesielski und Vogdt [2] haben festgestellt, dass die Dübel der Wärmedämm-Verbundsysteme nur an den Rändern der betrachteten Wände ausgelenkt werden und somit die Druck- bzw. Zugspannungen im Putz ihr Maximum im mittleren Bereich der Wand aufweisen und zu den Enden hin auf Null abfallen. Als weiteres Ergebnis ihrer Untersuchung stellen sie heraus, dass die Normalspannungen im Putz wesentlich von dessen Steifigkeit sowie von der Schubsteifigkeit der Wärmedämmung und ihrer Verankerung abhängen. Die im Dübel verursachte Zwangsbeanspruchung sei kleiner als die zulässige Biegebeanspruchung des Dübels.

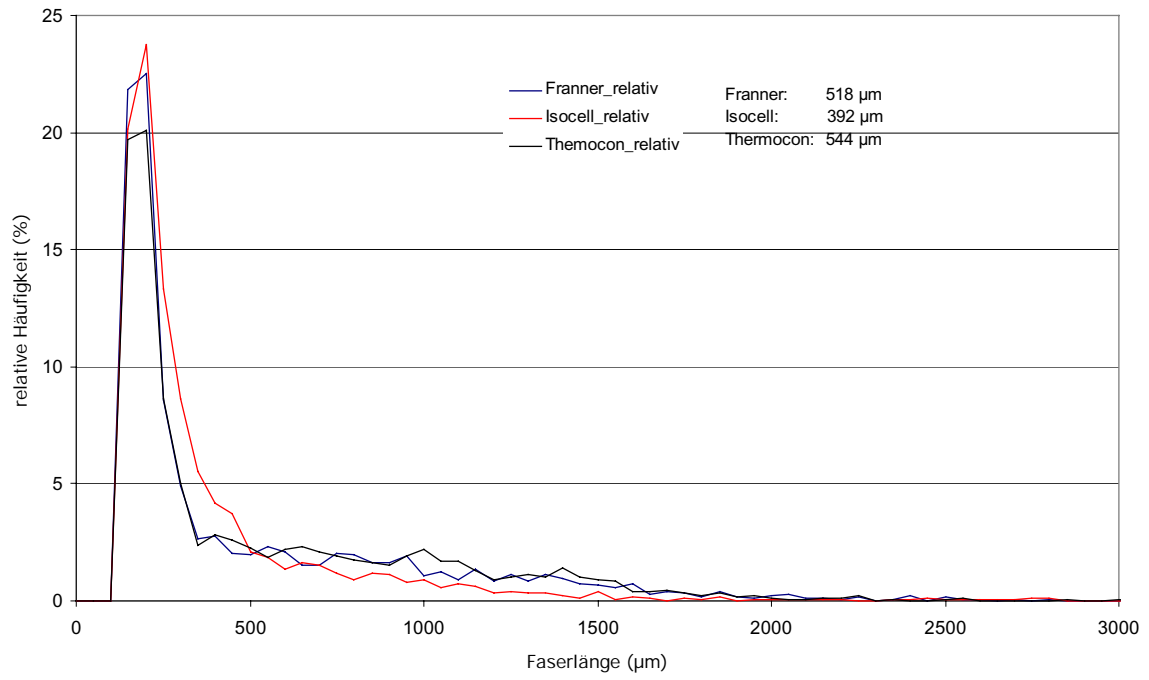
Abgesehen von den Temperaturverhältnissen spielt auch der Wärmedehnkoeffizient und der Elastizitätsmodul der Baustoffe eine Rolle bei der thermischen Beanspruchung. Kunstharzputze verfügen über einen größeren Wärmedehnkoeffizienten als mineralische Putze. Zumeist ist der E-Modul umso kleiner, je größer der Wärmedehnkoeffizient der Kunstharzputze ist. Ebenso verhält es sich bei den sehr hohen Wärmedehnkoeffizienten der Schaumkunststoffe, die laut Künzel durch einen niedrigen E-Modul ausgeglichen werden [9]. Bei Temperaturwechsel führen Polystyrol-Hartschaumplatten entsprechende Formänderungen aus, sofern sie nicht durch den Putz behindert werden. An Versuchsflächen wurde festgestellt, dass ohne Putz Bewegungen des Plattenstoßes von mehr als 2 mm auftreten, die durch einen armierten Putz praktisch verhindert werden. Wichtig ist eine ausreichende Zugfestigkeit des Putzes, damit die auftretenden Zugspannungen

8 Gertis/Nannen zit. in [3], Seite 195

9 Künzel zit. in [3], Seite 196

infolge der Verformungsbehinderung bei Abkühlung nicht zu Rissen führen. Eine Gewebeamierung im Unterputz ist aber auf jeden Fall erforderlich, weil trotz des kleinen E-Moduls der Hartschaumplatten die Zugfestigkeit des Putzes an den Plattenstößen überschritten werden kann. Neben der hohen Wärmedehnung sind auch große Plattenflächen dafür verantwortlich. Je schneller die Wand abkühlt, desto größer sind die auftretenden Zugspannungen und Risse. Solche thermisch bedingten Risse, die sich, wie beschrieben, in der Regel an den Plattenstößen einstellen, treten besonders an den Westseiten auf, an denen die Temperaturdifferenz am höchsten ist, wenn direkt nach der Besonnung die nächtliche Abkühlung erfolgt [3].

Faserlängenverteilungen



Daten zu den Klimaparametern:

Dateiname: \WUF122\BEISPIEL.KLI
 Ursprungsdatei: \KLIMA\IBP1991.WET
 Dateiformat: IBP

Kommentar: Azimut: 90, Neigung: 90, Abgeleitet von IBP1991.WET

Anfang: 1. Januar 1991 0:00 Uhr
 Ende: 1. Januar 1992 0:00 Uhr

Parameter:¹

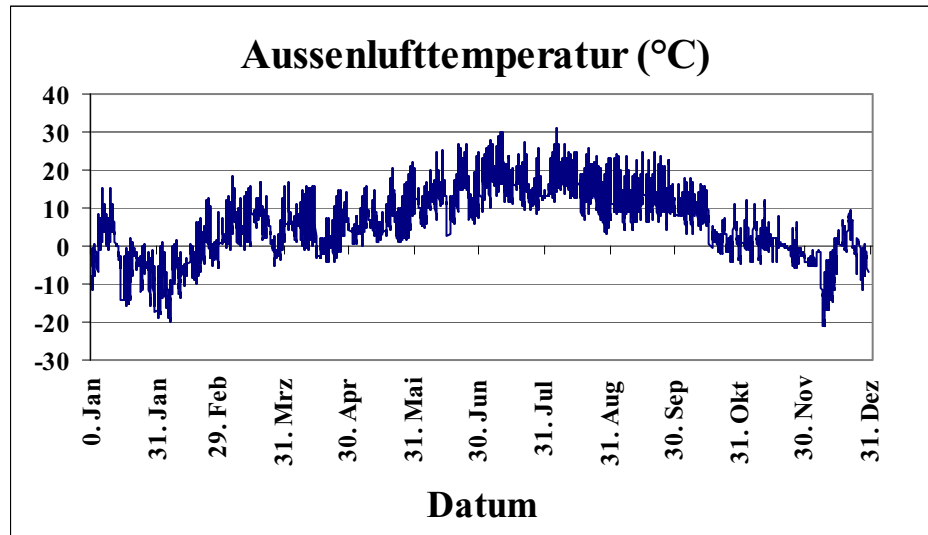
Geografische Breite	47,9	[°]
Geografische Länge	11,7	[°]
Höhe über NN	680,0	[m]
Luftdruck	933,6	[hPa]
Neigung der Fläche gegen Horizontale	90	[°]
Azimut der Flächennormalen ²	90	[°]
Regenkoeffizient R1 ³	1	[-]
Regenkoeffizient R2 ²	0	[-]
Lufttemperatur Innen (Mittelwert)	21	[°C]
Amplitude der inneren Lufttemperatur	1	[°C]
Höchstwert am	3. Juni 12 Uhr	[-]
Relative Feuchte der Innenluft (Mittelwert)	0,45	[-]

¹ IBP – Zusätzliche Parameter (nicht in Tabelle angegeben): Lufttemperatur, Weststrahlung, Schlagregen

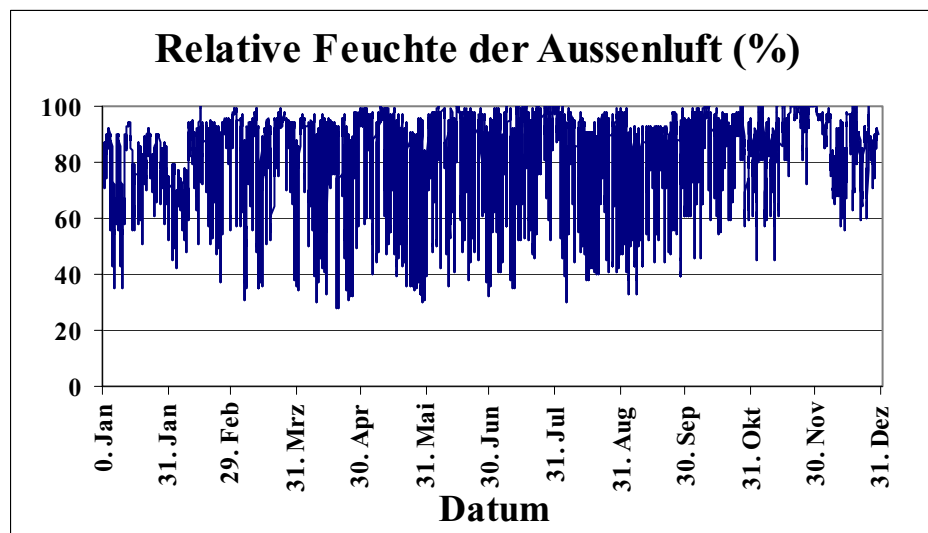
² Azimut: 0 = Süden; + = nach Westen; - = nach Osten

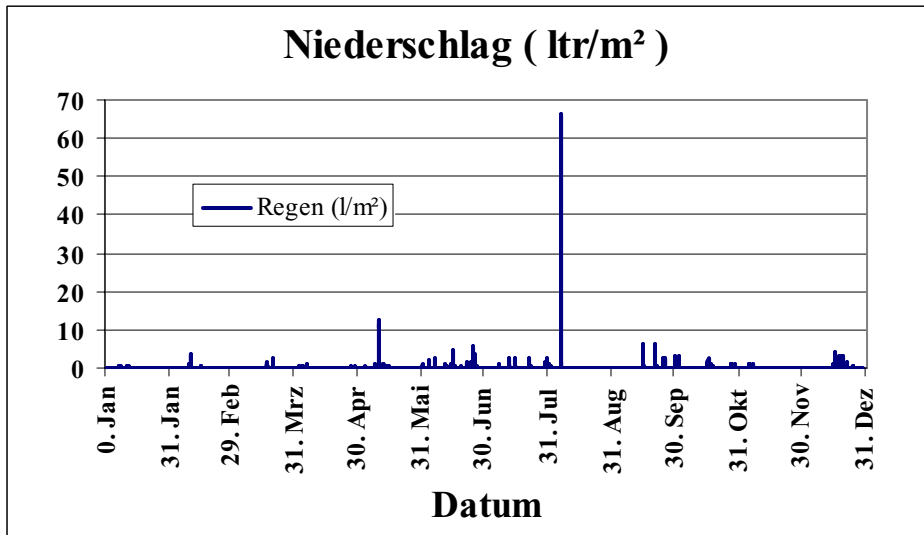
³ Hinweis: Regenbelastung = Regen * (R1 + R2 * Windgeschwindigkeit)

Klimadatensatz „IBP 1991.wet“

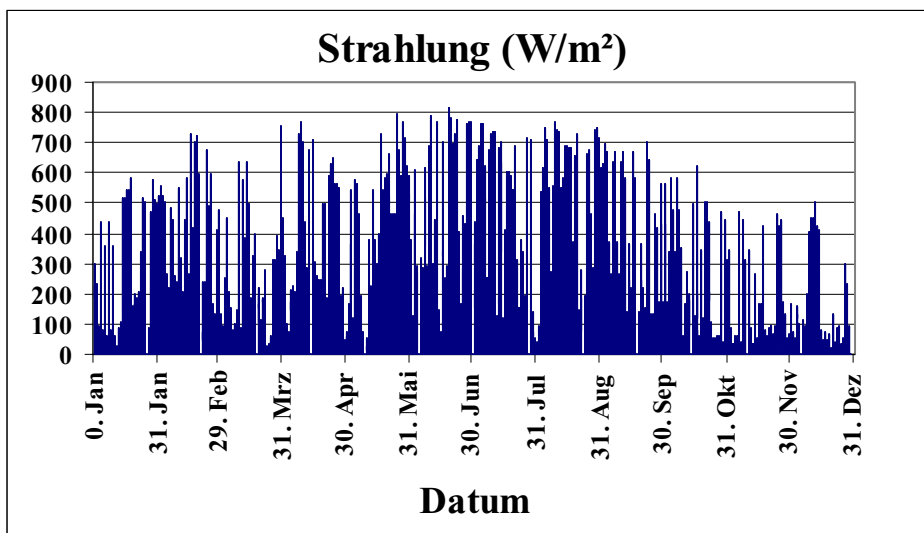


A 14





A 15

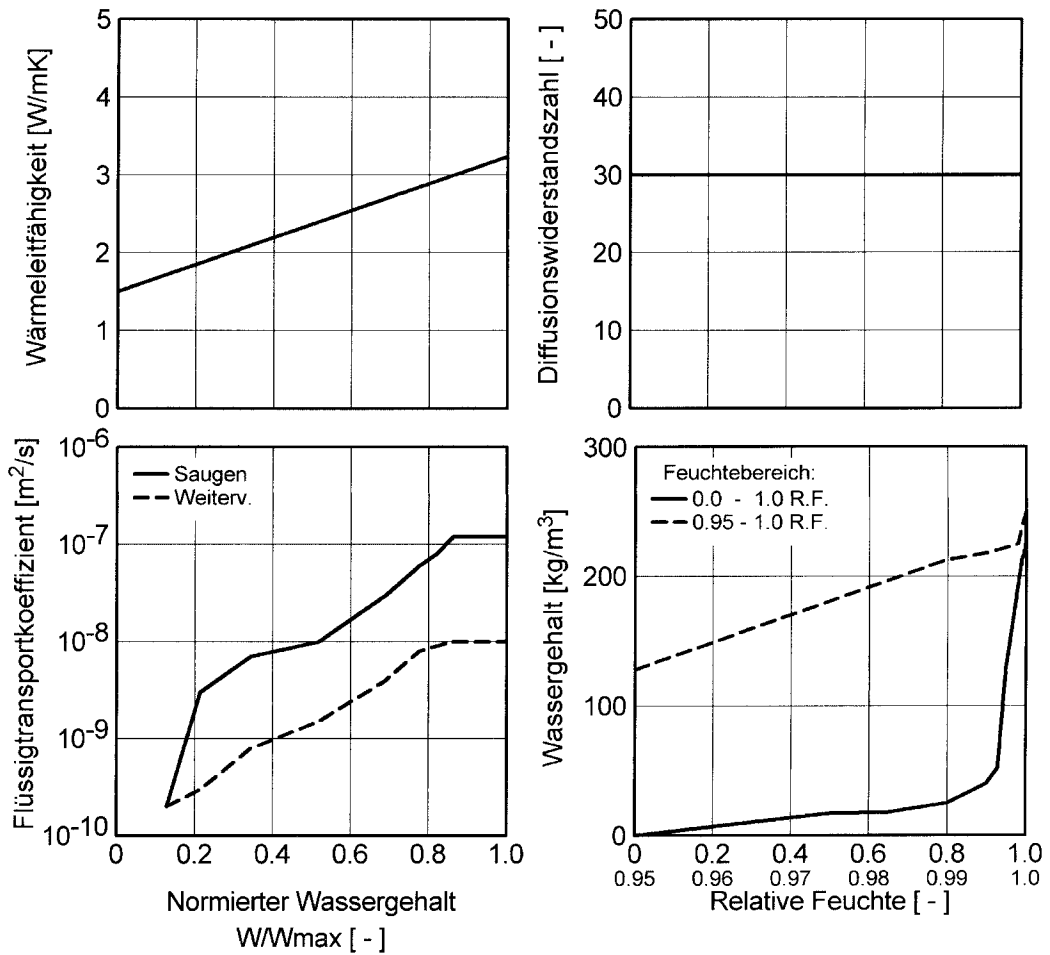


Baustoff : Aussenputz

Bemerkung :

Rohdichte	[kg/m ³]:	2000
Porosität	[m ³ /m ³]:	0.29
Wärmekapazität	[kJ/kgK]:	0.85
Wärmeleitfähigkeit trocken	[W/mK]:	1.5
Feuchtebedingte Zunahme	[%/M-%]:	8
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl trocken	[-]:	30
Freie (kapillare) Wassersättigung	[kg/m ³]:	250.0

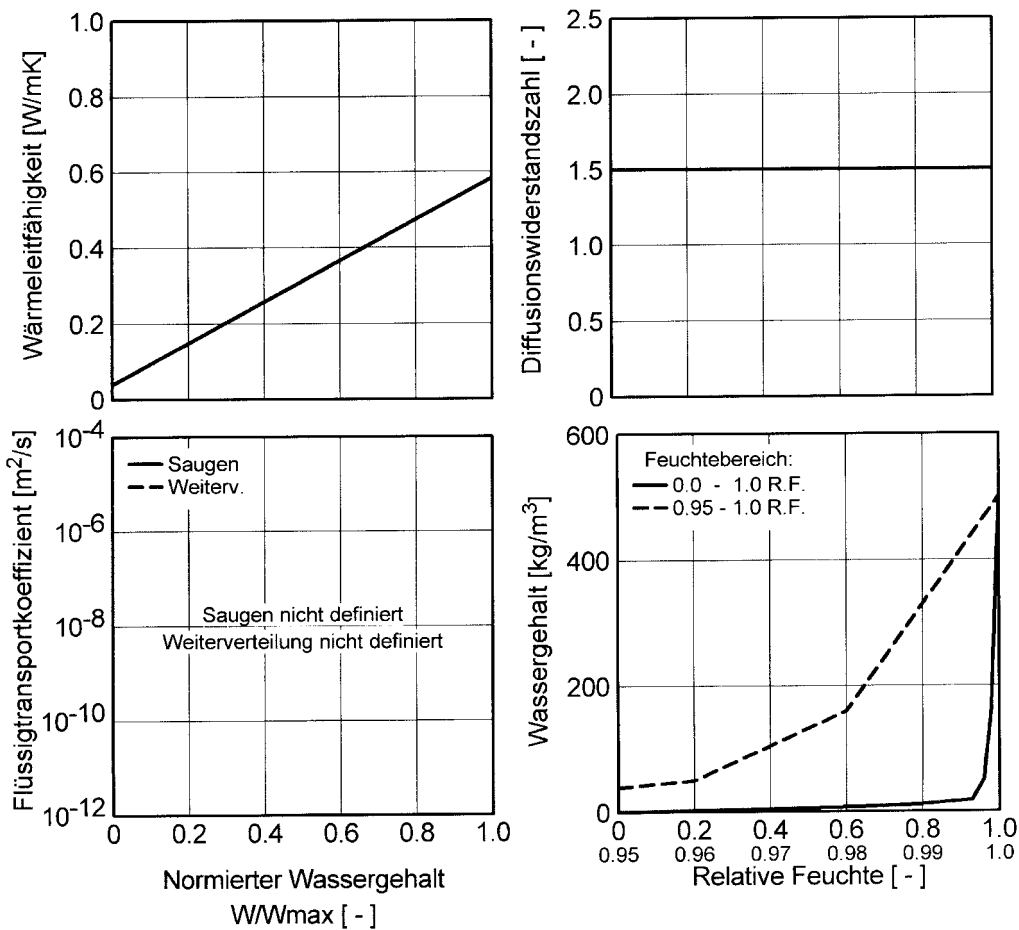
A 16



Baustoff : Zellolose

Bemerkung :

Rohdichte	[kg/m ³]:	70
Porosität	[m ³ /m ³]:	0.95
Wärmekapazität	[kJ/kgK]:	2.5
Wärmeleitfähigkeit trocken	[W/mK]:	0.040
Feuchtebedingte Zunahme	[%/M-%]:	1
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl trocken	[-]:	1.5
Freie (kapillare) Wassersättigung	[kg/m ³]:	500.0

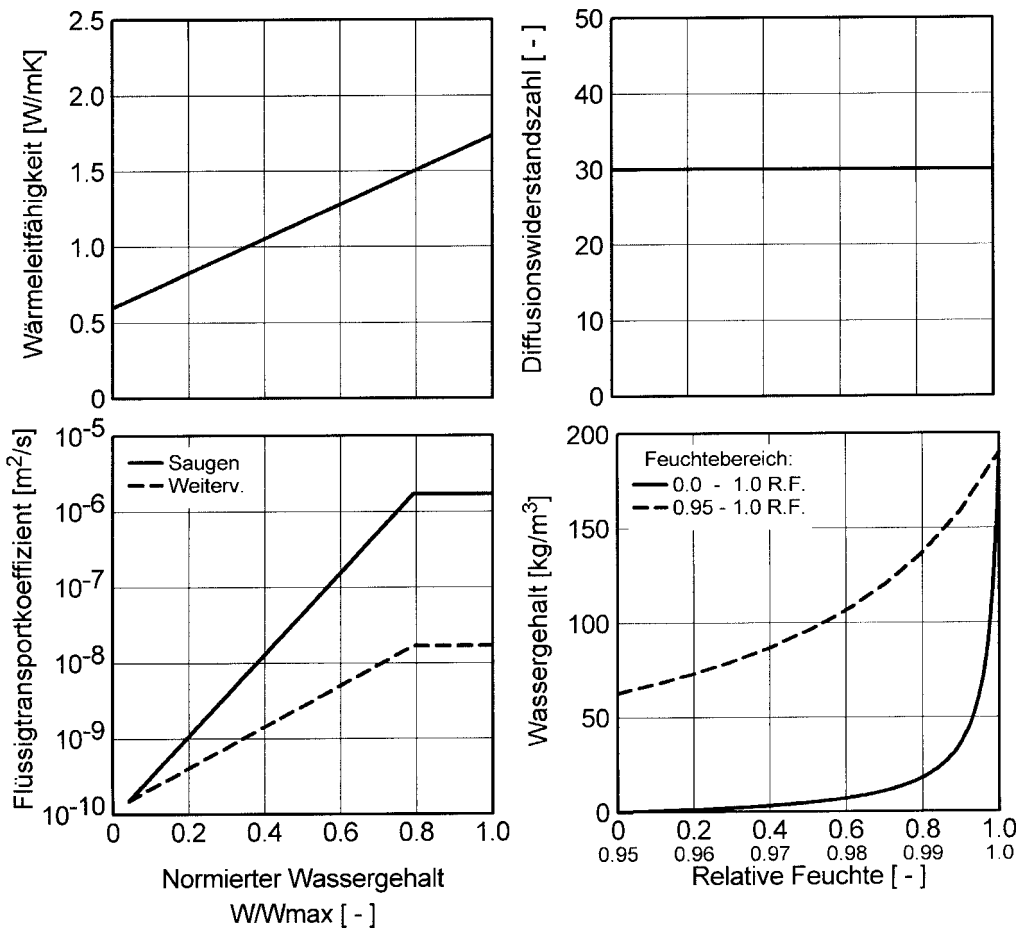


Baustoff : Ziegel

Bemerkung :

Rohdichte	[kg/m ³]:	1900
Porosität	[m ³ /m ³]:	0.24
Wärmekapazität	[kJ/kgK]:	0.85
Wärmeleitfähigkeit trocken	[W/mK]:	0.6
Feuchtebedingte Zunahme	[%/M-%]:	15
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl trocken	[-]:	30
Freie (kapillare) Wassersättigung	[kg/m ³]:	190.0

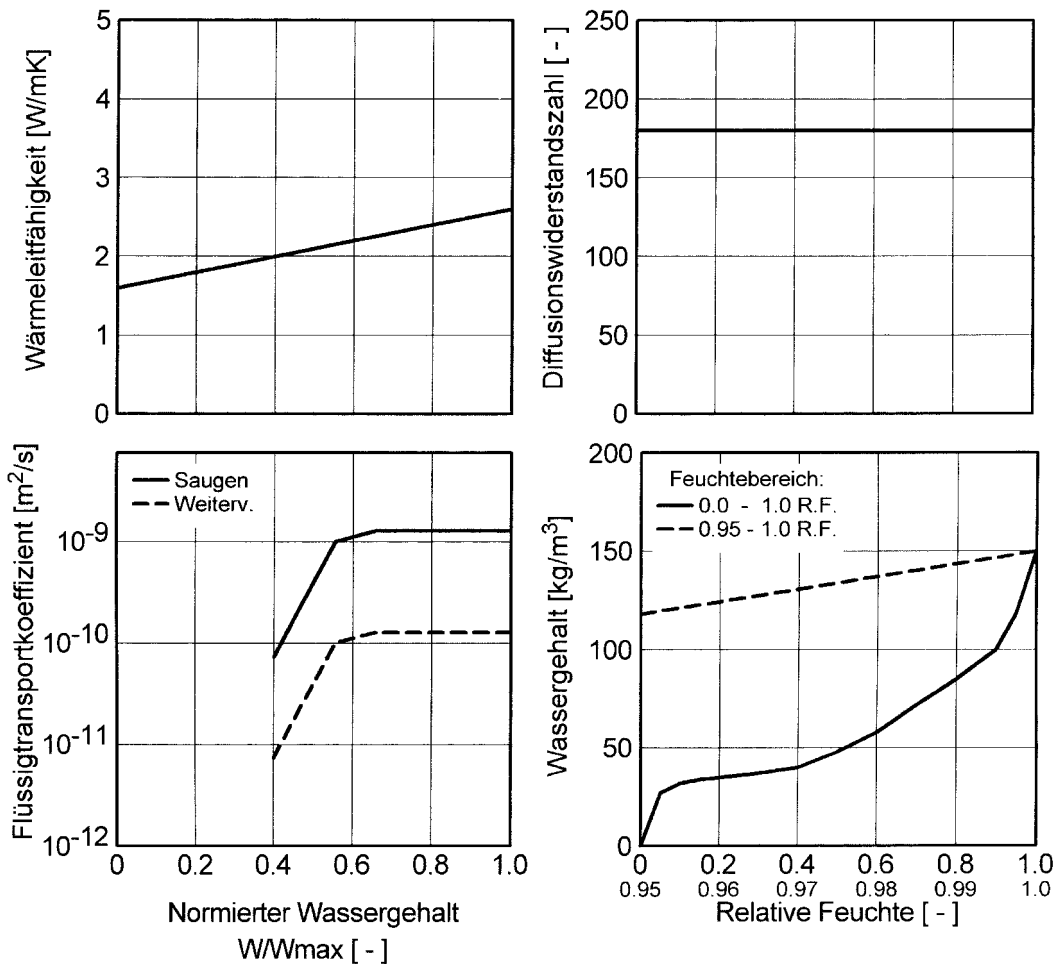
A 18



Baustoff : Beton W/Z=0.5

Bemerkung :

Rohdichte	[kg/m ³]:	2300
Porosität	[m ³ /m ³]:	0.18
Wärmekapazität	[kJ/kgK]:	0.85
Wärmeleitfähigkeit trocken	[W/mK]:	1.6
Feuchtebedingte Zunahme	[%/M-%]:	8
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl trocken	[-]:	180
Freie (kapillare) Wassersättigung	[kg/m ³]:	150.0

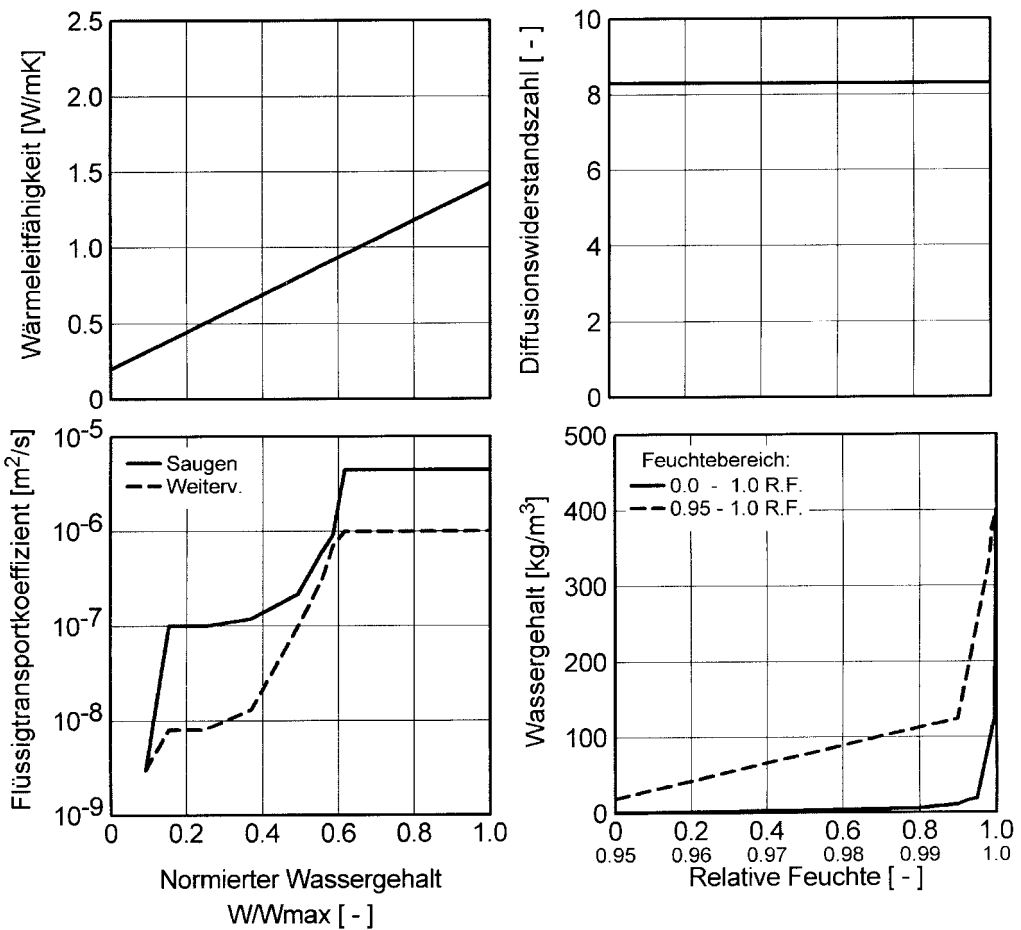


Baustoff : Innenputz (Gips)

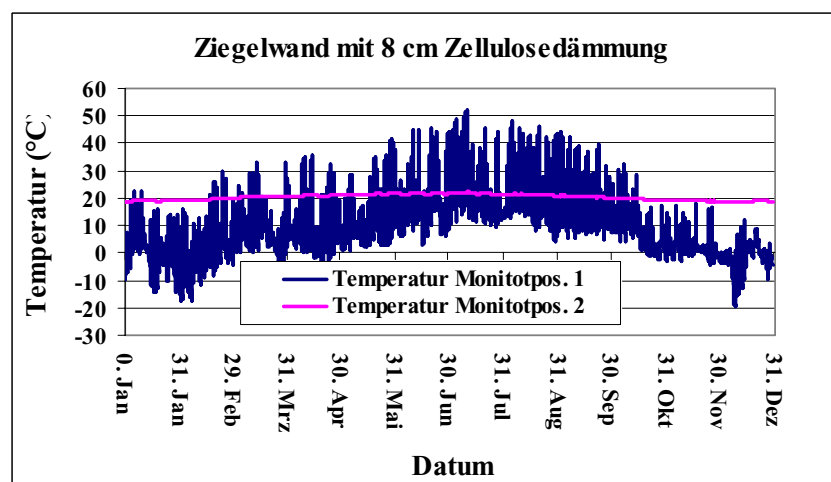
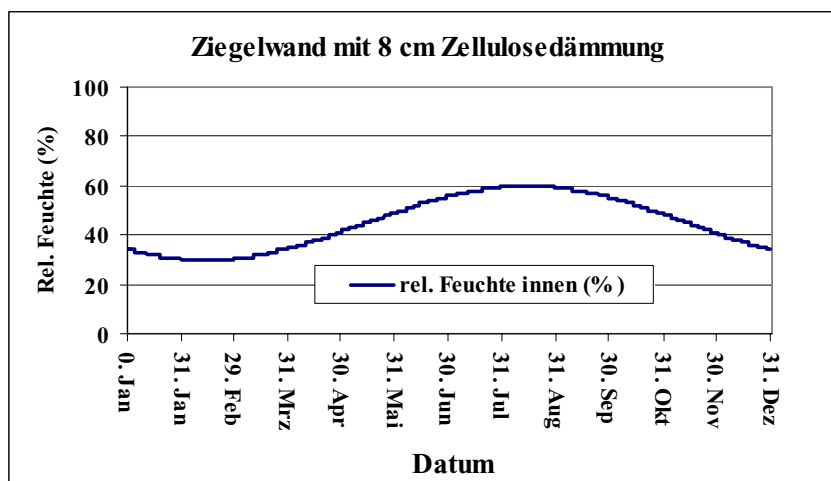
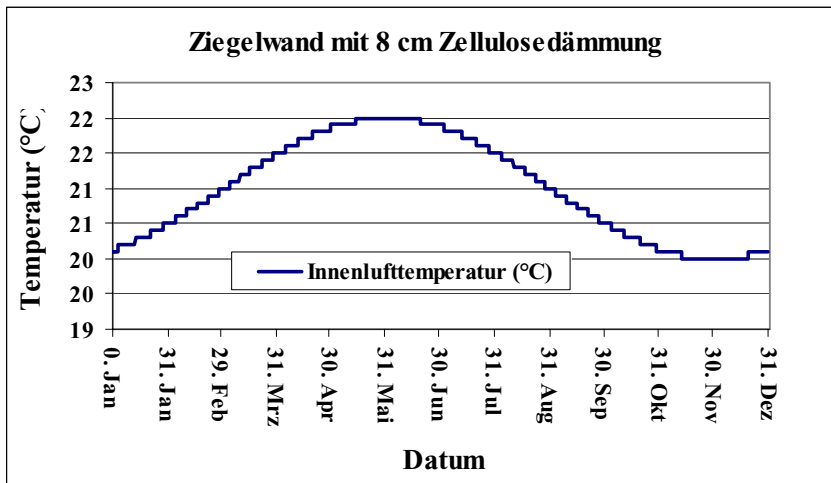
Bemerkung :

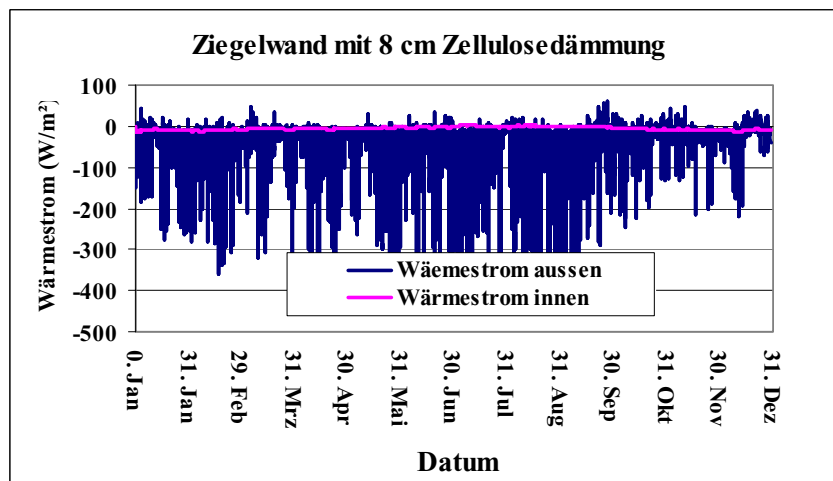
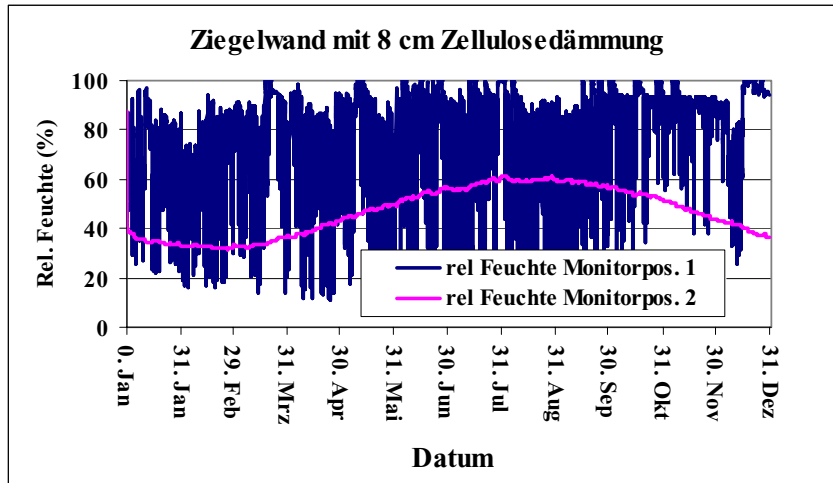
Rohdichte	[kg/m ³]:	850
Porosität	[m ³ /m ³]:	0.65
Wärmekapazität	[kJ/kgK]:	0.85
Wärmeleitfähigkeit trocken	[W/mK]:	0.2
Feuchtebedingte Zunahme	[%/M-%]:	8
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl trocken	[-]:	8.3
Freie (kapillare) Wassersättigung	[kg/m ³]:	400.0

A 20

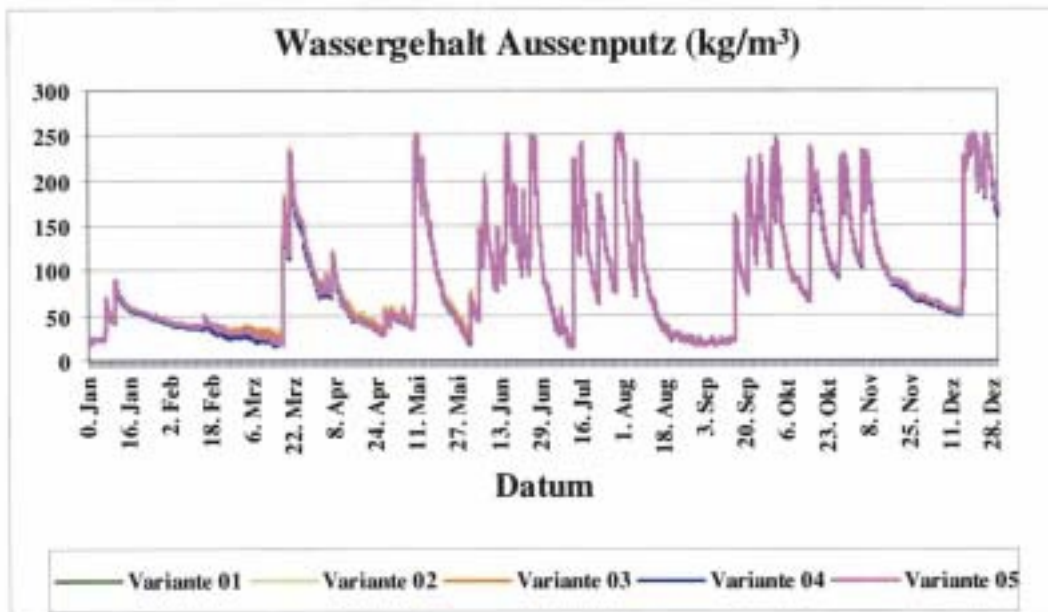
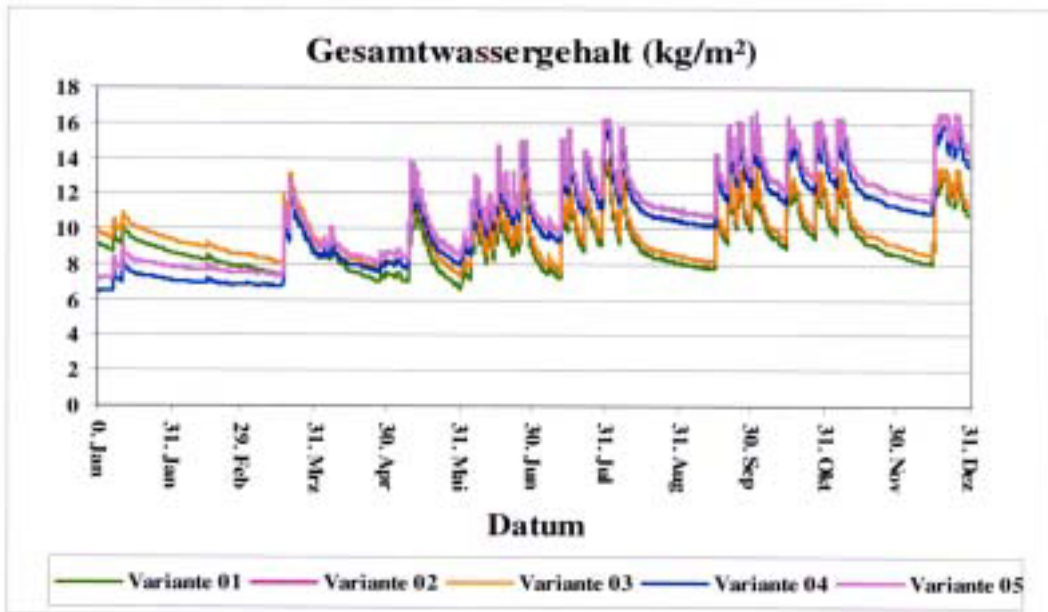


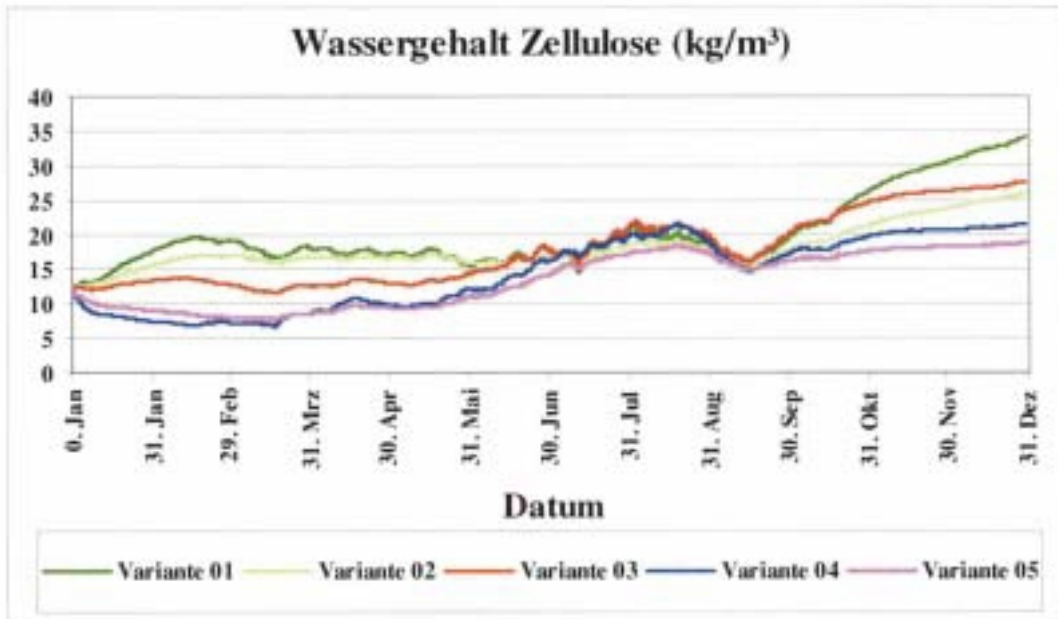
Temperatur- u. Feuchteverläufe, Wärmeströme - Var. 1



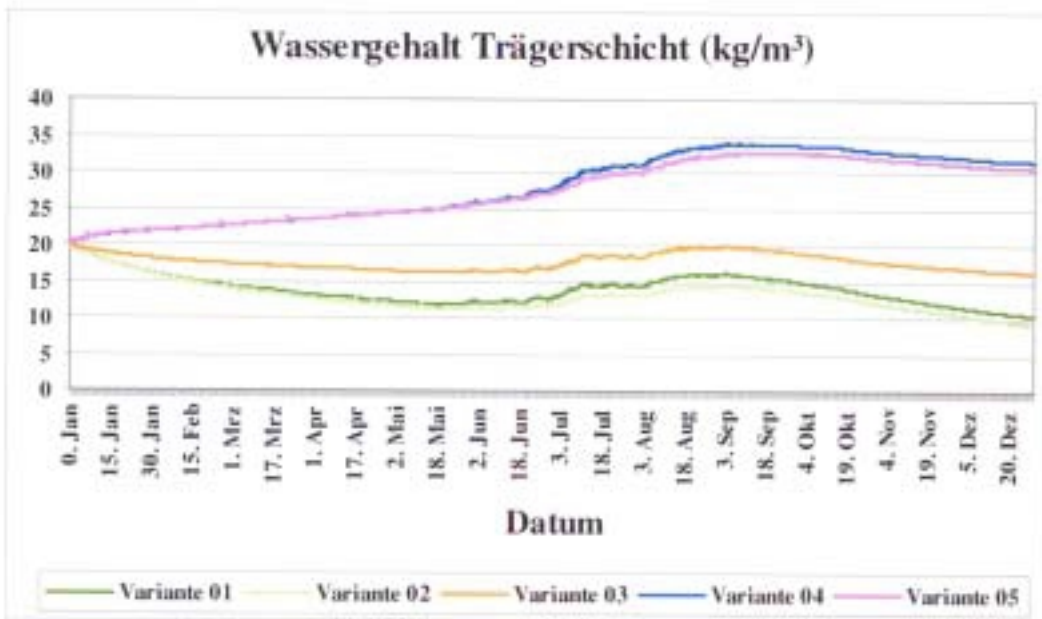


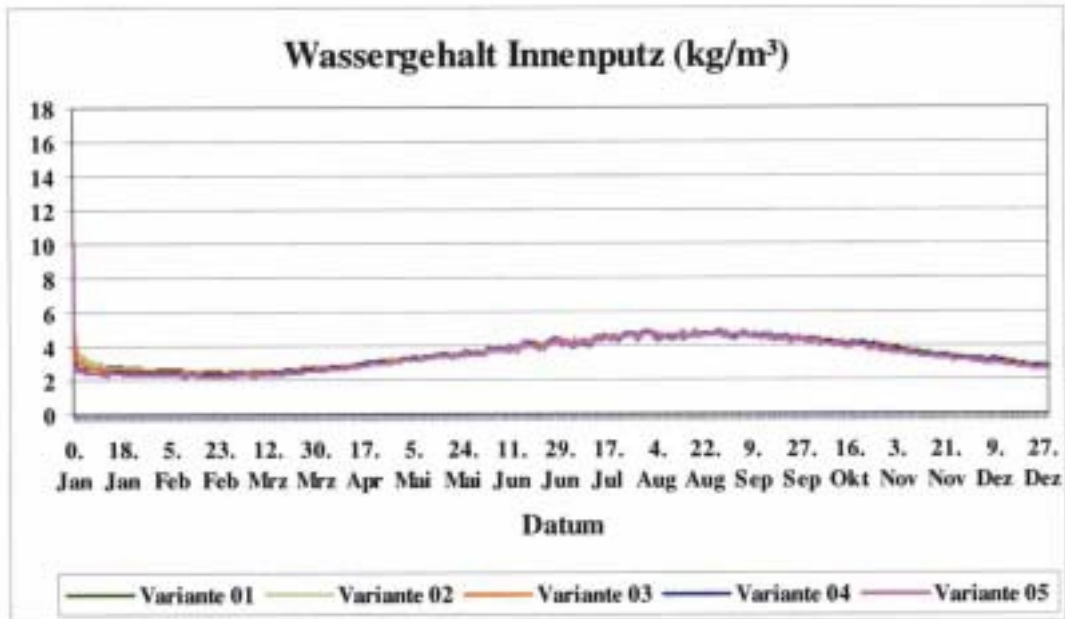
Feuchtigkeitsbilanz der Varianten 1 - 5



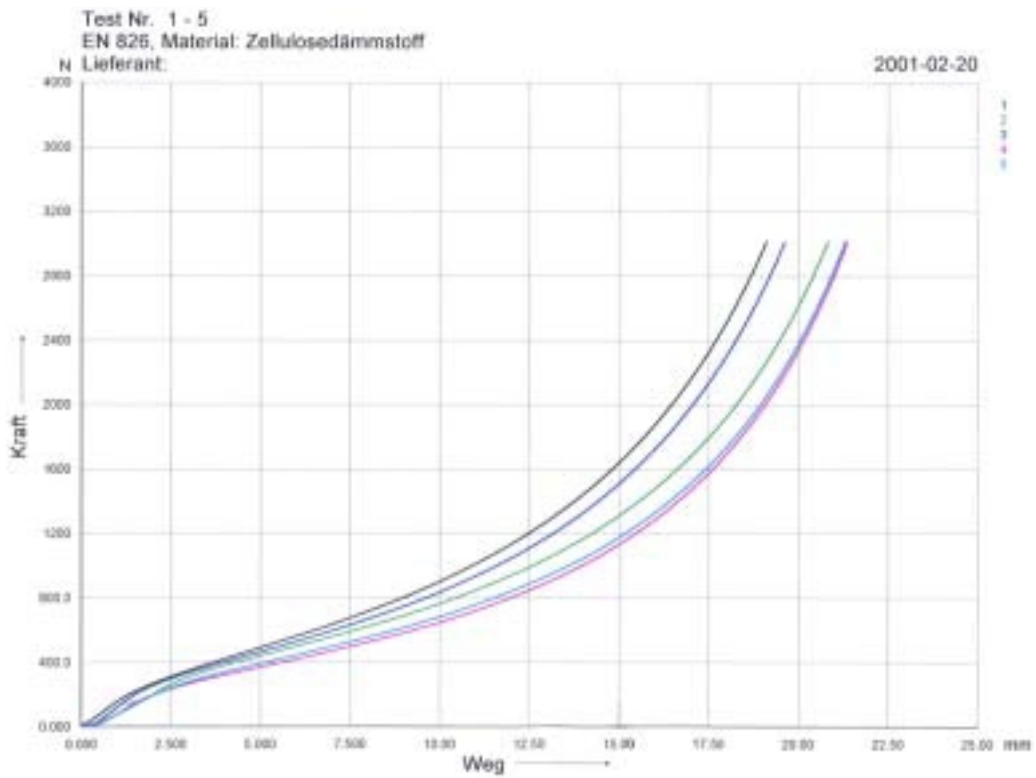


A 24





Druckspannung bei 10 % Stauchung, Charge 0



A 26

Druckversuch

Test Standard EN 826
Material Zellulosedämmstoff
Kunde DI. Hengsberger

Testdatum 2001-02-20
Prüfmaschine Shimadzu 100kN
Meßgerät W 128
Prüfer Ra

Prüfmaschine EDC5kN
Geschwindigkeit f 0 % -> 3 mm/min

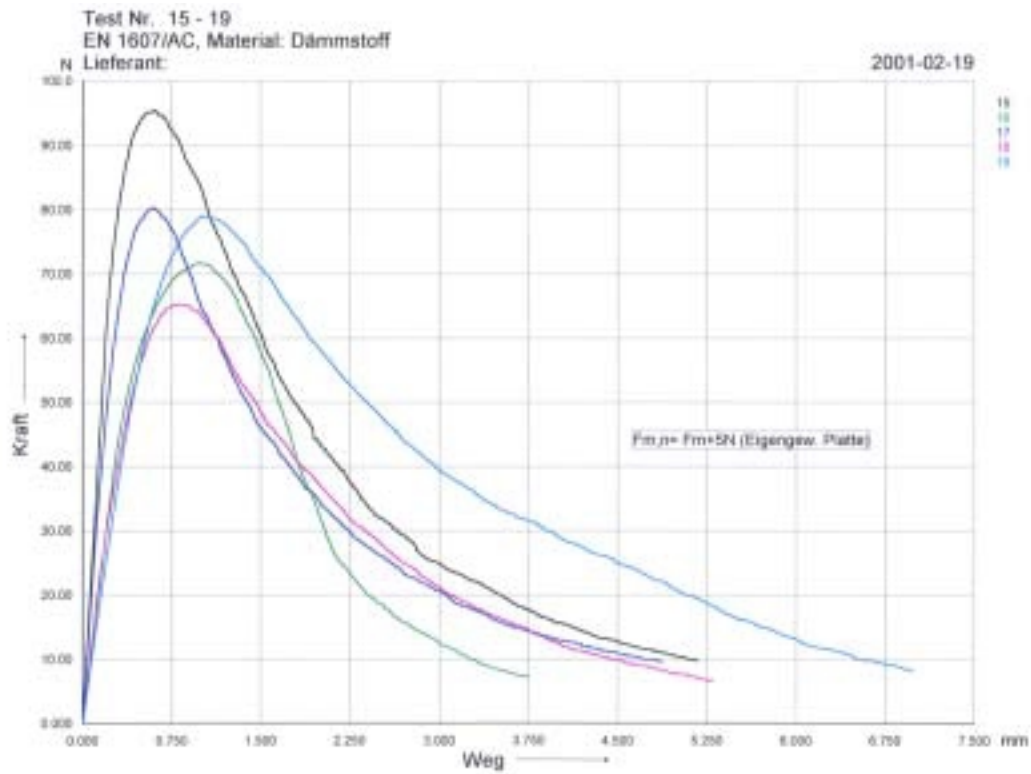
Artikel Dämmstoff
Parametersatz Dämmstoff

Legende

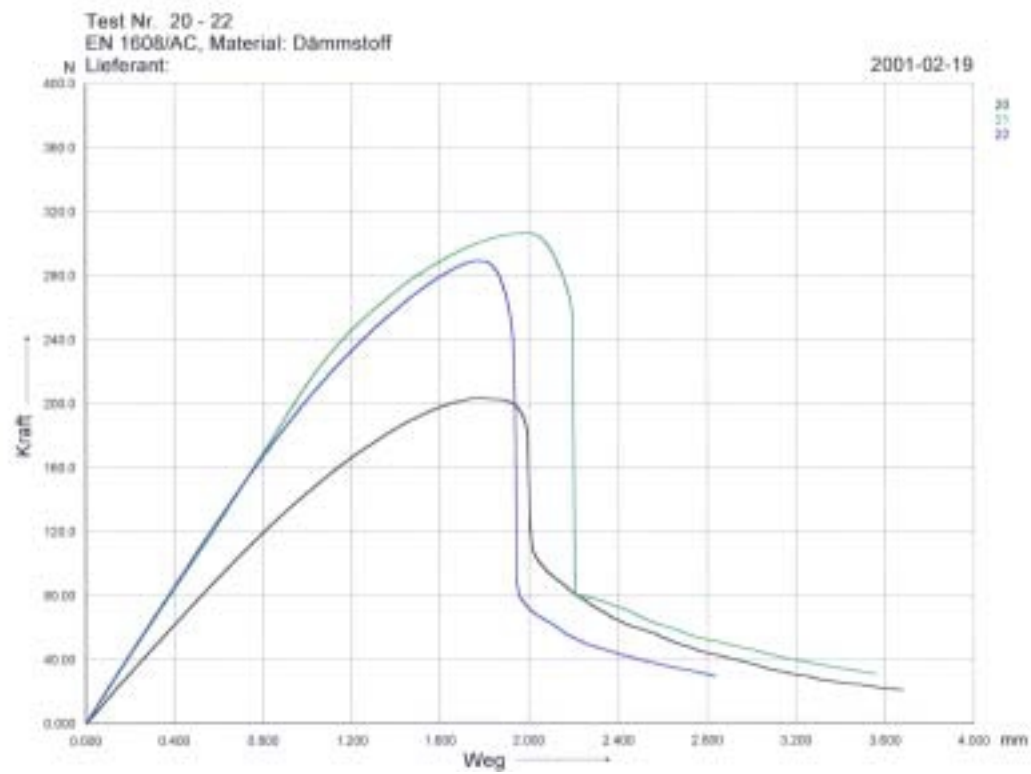
S0 Querschnittsfläche
Fm Höchstkraft
σdB Druckfestigkeit
Rt10 Spannung/Kraft bei 10%
d0 Ausgangsdicke

Test Nr.	S0 mm ²	Fm N	σdB MPa	Rt10 MPa	d0 mm	Kommentar
1	6400	3016	0.471	0.058	32.99	Probe 5
2	6400	3013	0.471	0.051	32.51	Probe 1
3	6400	3008	0.470	0.055	32.81	Probe 2
4	6400	3010	0.470	0.044	32.78	Probe 3
5	6400	3019	0.472	0.046	32.68	Probe 4
Mittelwert	6400	3013	0.471	0.051	32.75	

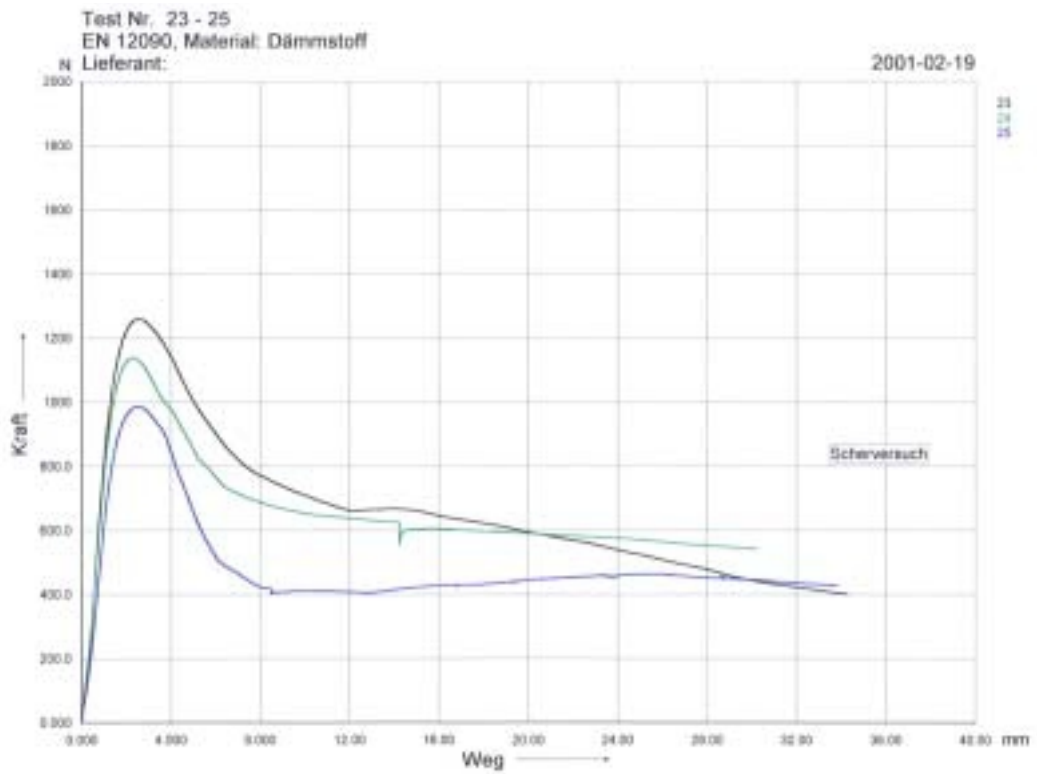
Zugfestigkeit normal und parallel zur Probenebene, Charge 0



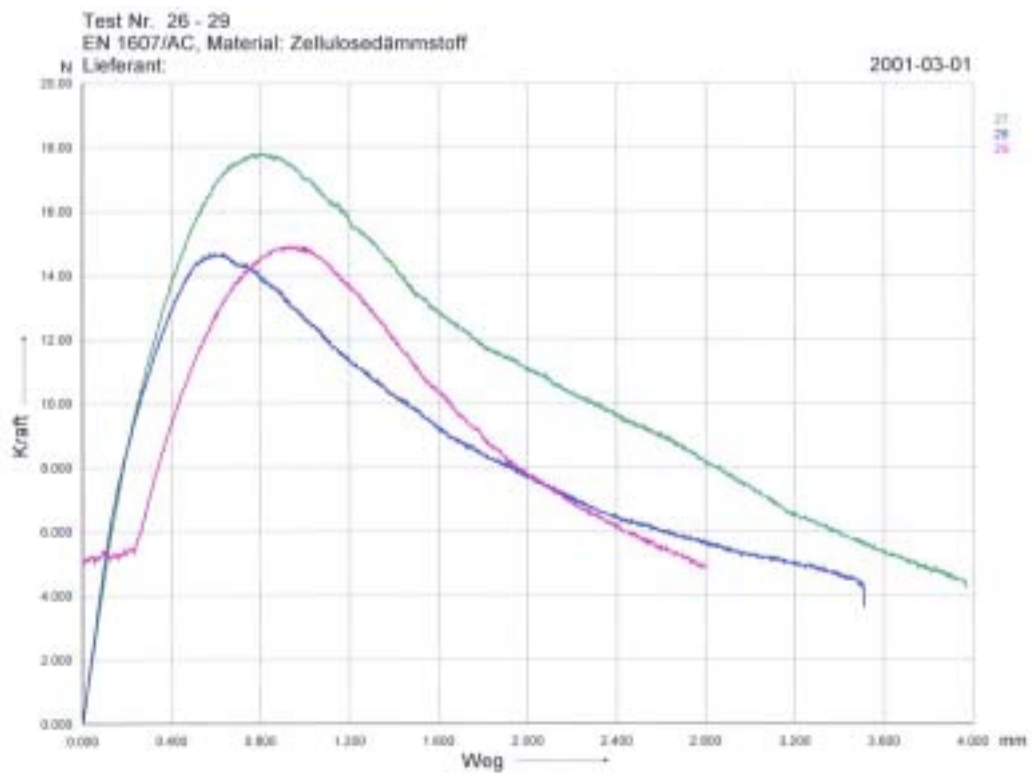
A 27



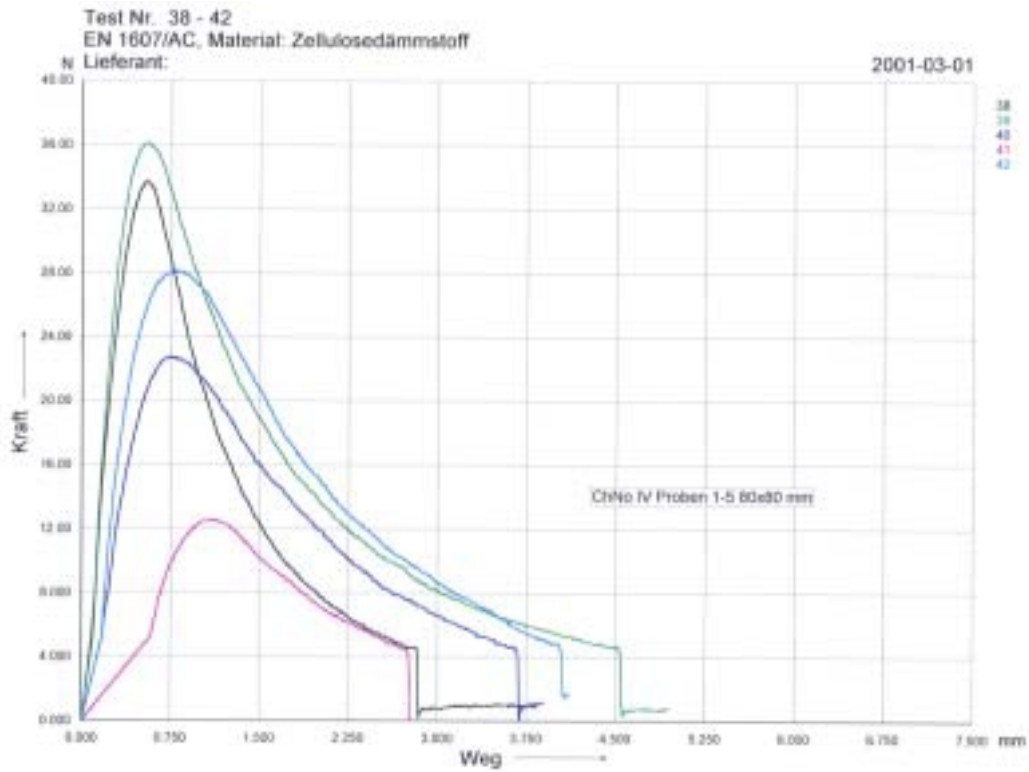
Scherfestigkeit, Charge 0 und Zugfestigkeit normal zur Probenebene, Charge I



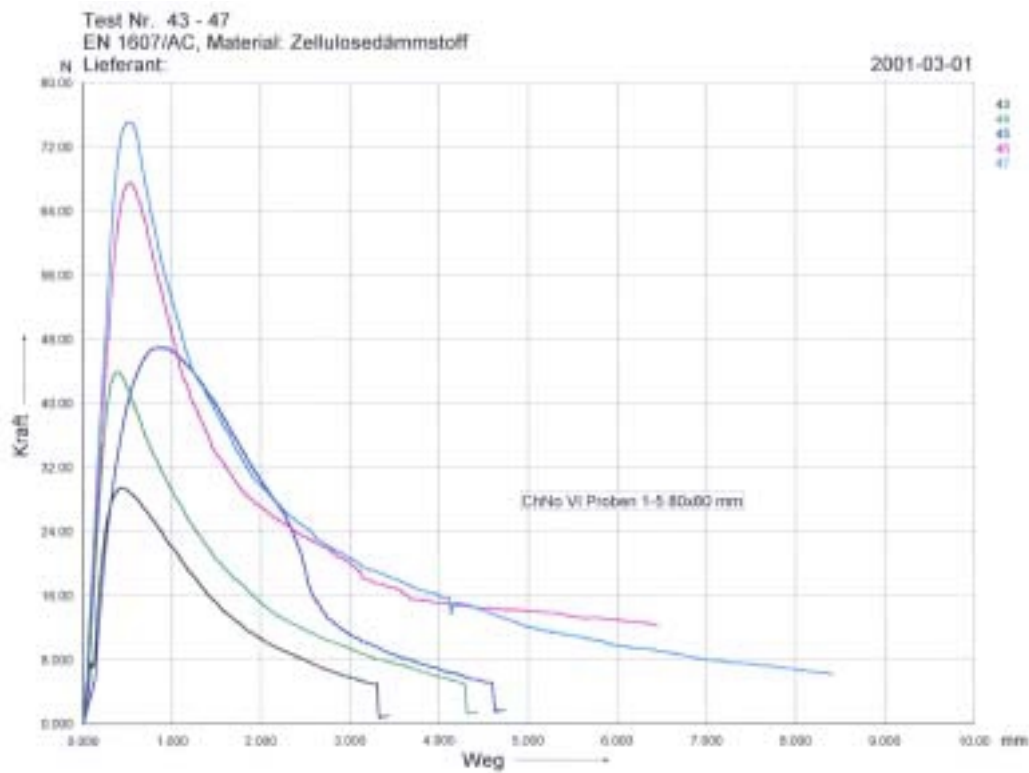
A 28



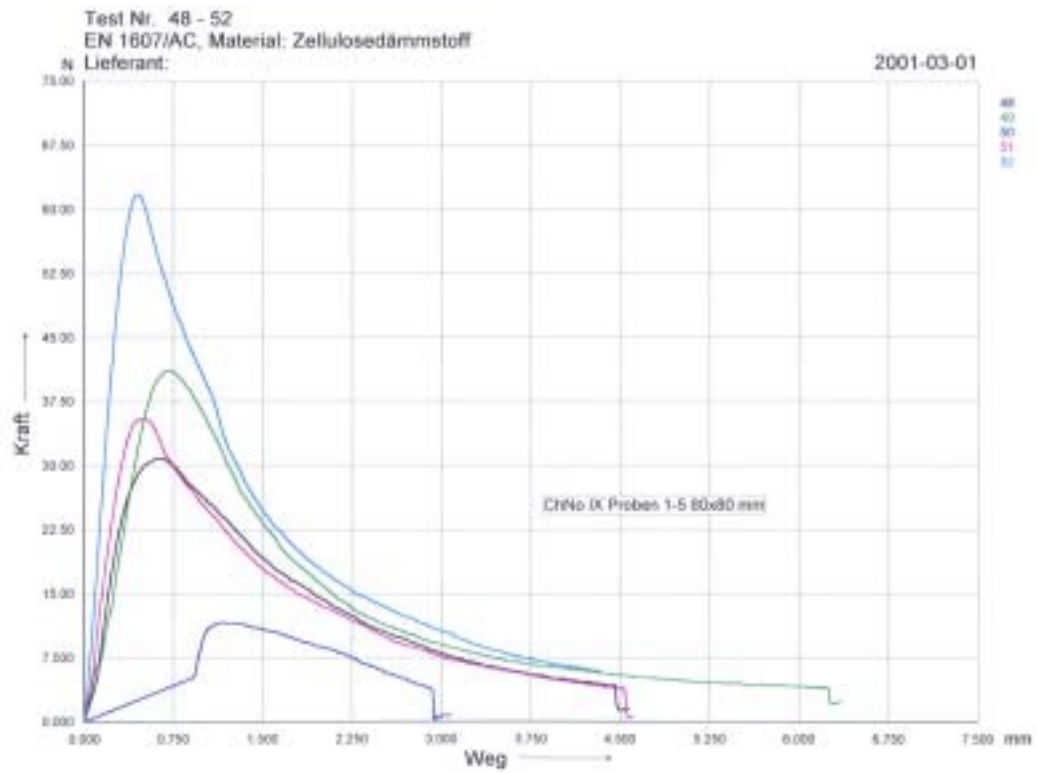
Zugfestigkeit normal zur Probenebene, Charge IV und VI



A 29



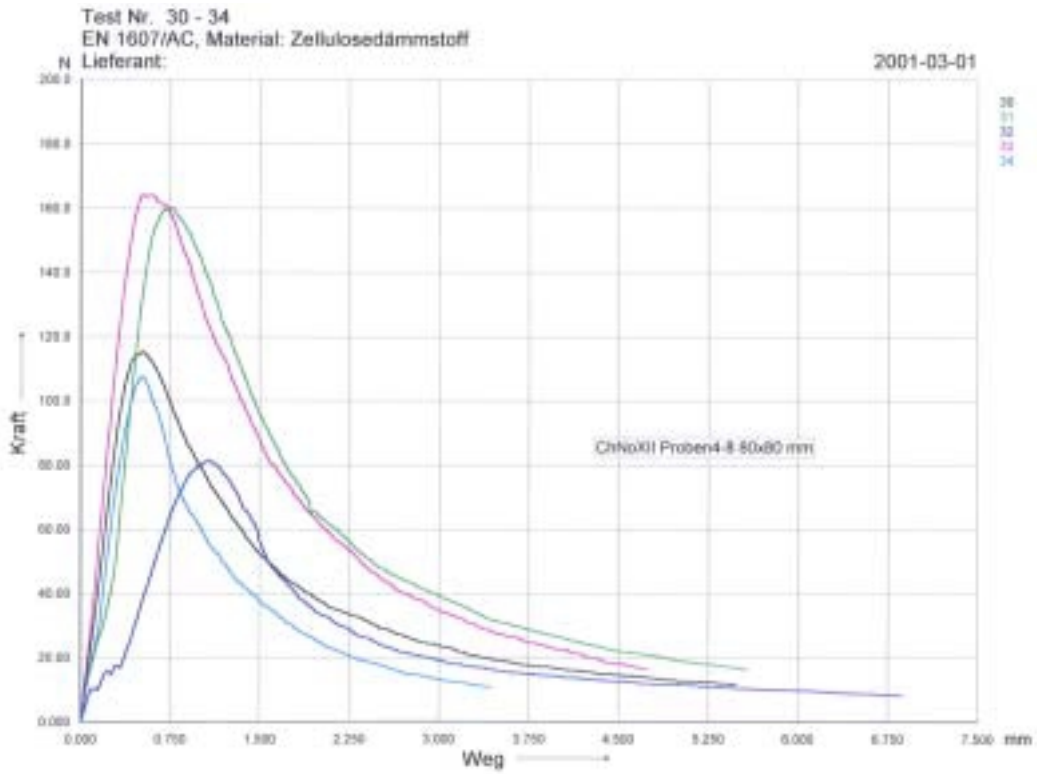
Zugfestigkeit normal zur Probenebene, Charge IX und XI



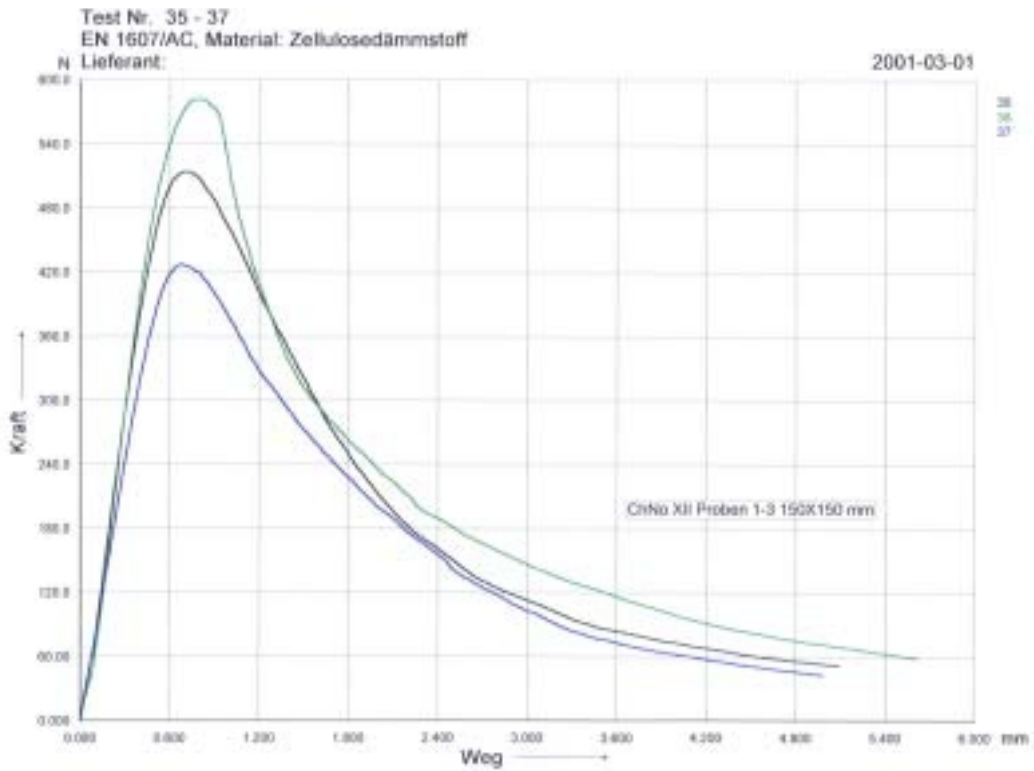
A 30



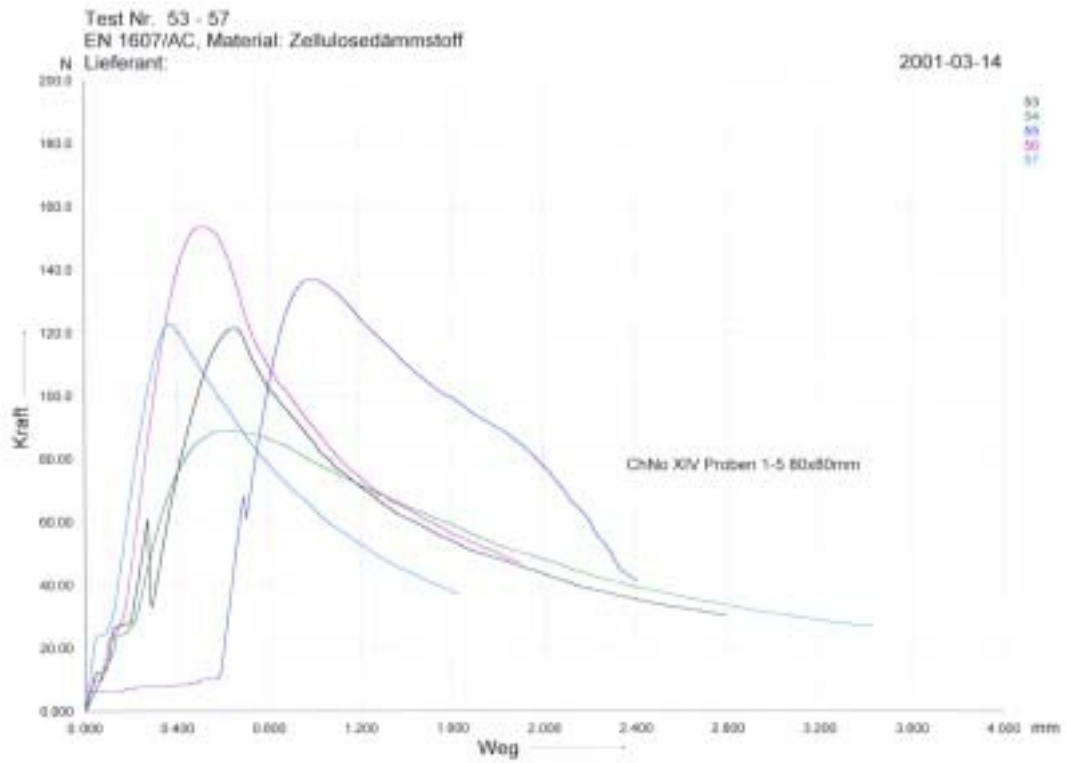
Zugfestigkeit normal zur Probenebene, Charge XII, 8 x 8 und 15 x 15 cm



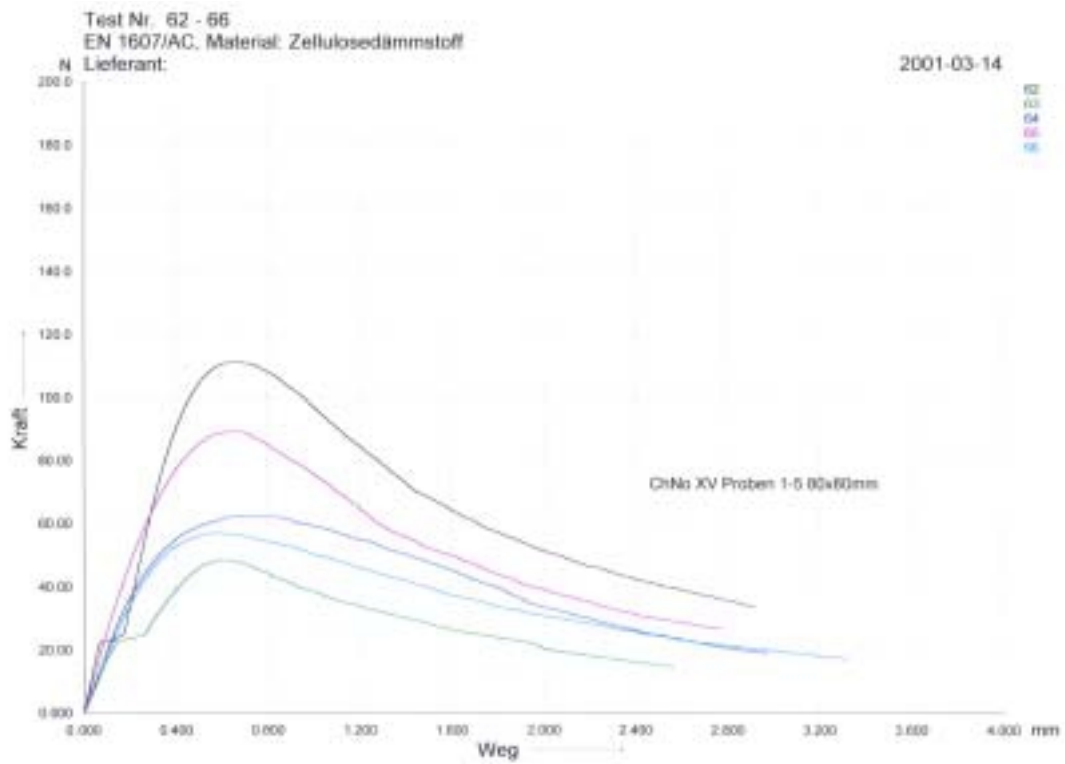
A 31



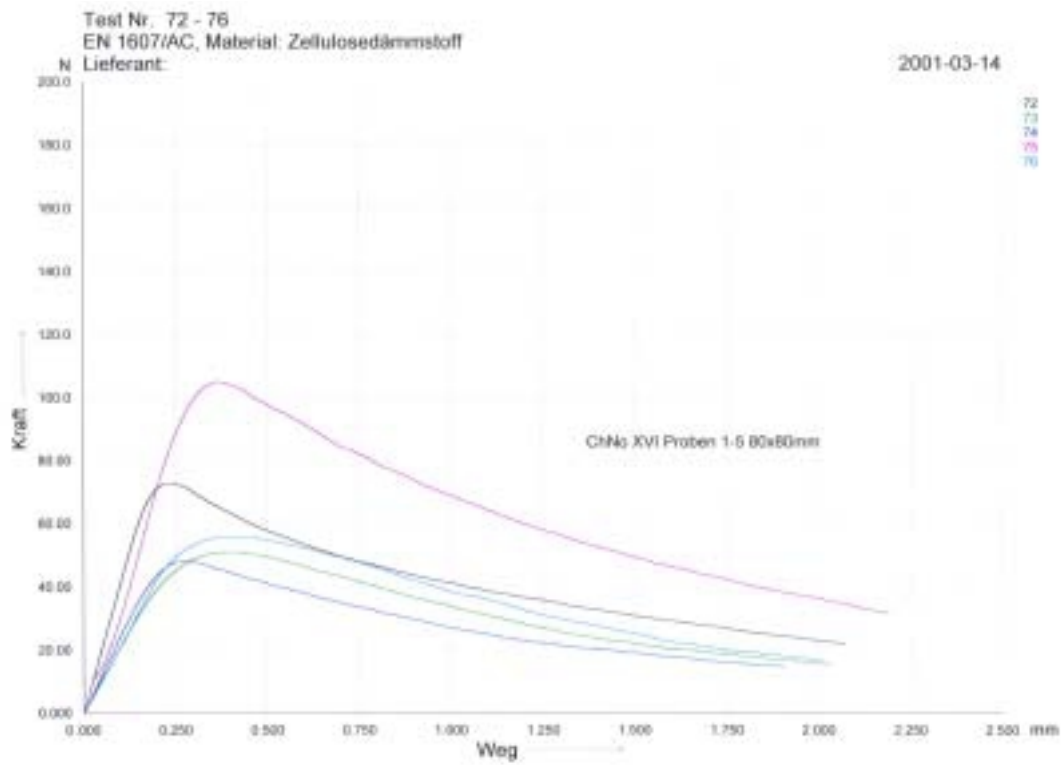
Zugfestigkeit normal zur Probenebene, Charge XIV und XV



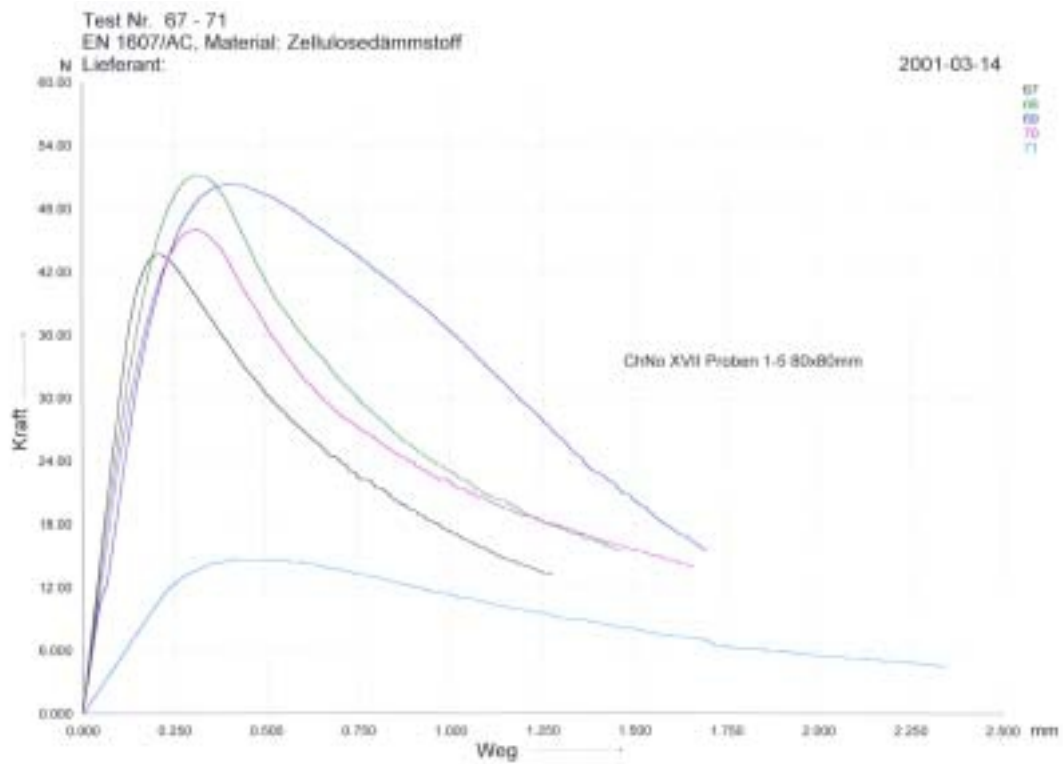
A 32



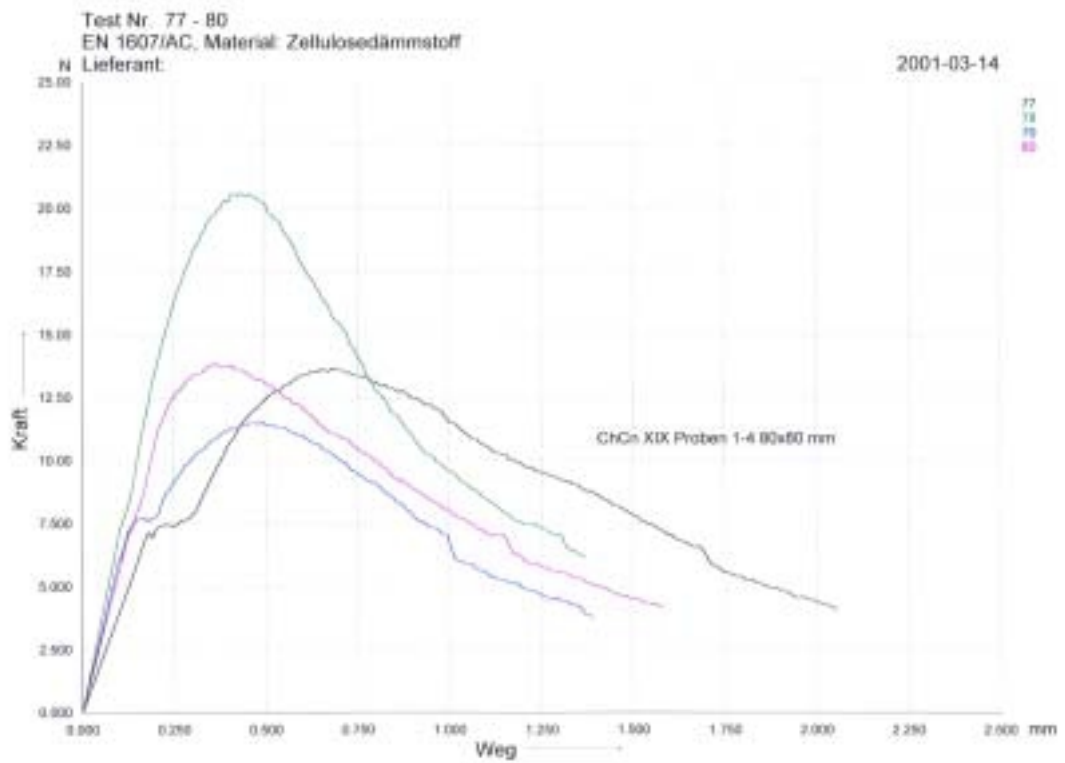
Zugfestigkeit normal zur Probenebene, Charge XVI und XVII



A 33



Zugfestigkeit normal zur Probenebene, Charge XIX und XX



A 34

