

AZ 27676

Transparente und transluzente Leichtbauplatten aus nachwachsenden Rohstoffen als
Raumgliederungselemente mit Akustikfunktion

Projektlaufzeit: 01.01.2010 – 30.09.2011

Antragsteller:

Universität Stuttgart

Institut für Tragkonstruktionen und
Konstruktives Entwerfen (ITKE)
Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers



Projektpartner:

Nimbus
Research Company GmbH (NRC)
Stuttgart
Dipl.-Ing. Dietrich Brennenstuhl



gefördert durch



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Herausgeber: Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE)
Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers
Universität Stuttgart, Fakultät 01 – Architektur und Stadtplanung

Autoren: Dipl.-Ing. Carmen Köhler
Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE)

Dipl.-Ing. Katharina Schmidt, Dipl.-Des. Michael Jahnz, Dipl.- Ing. Veit Schütz
Nimbus Group Stuttgart

Stuttgart, Dezember 2011

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis	12
1 Zusammenfassung.....	13
2 Anlass und Ziele.....	14
2.1 Zielsetzung.....	14
2.2 Umweltrelevante Ziele	17
2.3 Projektaufbau und Beteiligte.....	18
2.3.1 Beteiligte: Nimbus Group.....	18
2.3.1 Beteiligte: Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE) – Projektleitung	20
2.3.2 Projektaufbau	23
2.3.3 Innovativer Charakter des Projektes.....	25
3 Projektbearbeitung – Ideen, deren Umsetzung zu Demonstratoren und Entscheidungskriterien.....	26
3.1 Raumgliederungssystem des Partners Nimbus Group	26
3.2 Ideen für die Entwicklung eines Raumgliederungssystems aus biobasierten Kunststoffen	27
3.2.1 Formale Ansätze und Produktstrukturen mit bionischem/ organischem Schwerpunkt	27
3.2.2 Gestaltungsideen	30
3.3 Technologiescreening zur Realisierung der Ideen.....	32
3.3.1 Umsetzung der Idee „Schaumstruktur“ – Retikulierte Schäume.....	33
3.3.2 Umsetzung der Idee „Naturfasergewirr“ – Polymere Wirrgelege.....	34
3.3.3 Umsetzung der Idee „tiefgezogene 3D-Struktur“ – kontinuierliches Stanzfaltverfahren	35
3.3.4 Experimentelle Umsetzung der Idee „Schaumstruktur“.....	36
3.4 Ausgewählte Herstellungsverfahren und Demonstratoren	37
3.4.1 Sandwichbauweise.....	38
3.4.2 Twin-sheet-Verfahren.....	39
3.4.3 Tiefziehen.....	46
3.4.4 Verstrecken.....	49
3.4.5 Falten	53
3.4.6 Extrusion	58

3.4.7	Schäumen	60
3.4.8	Spritzguss	62
3.4.9	Verbindungsmöglichkeiten Sandwichkern – Deckfolien	67
3.4.10	Fazit Herstellungsverfahren aus Sicht des Partners nimbus group	68
3.5	Akustische Beurteilung der Demonstratoren.....	70
3.5.1	Wirkungsprinzip der Mikroperforation	70
3.5.2	Akustische Anforderungen	71
3.5.3	Messungen im Kundt'schen Rohr	71
3.5.4	Fazit	77
3.6	Produkttypologien und Proportionsstudien	78
3.6.1	Produkttypologie.....	78
3.6.2	Proportionsstudien und Modularisierung	82
3.7	Materialscreening – Vorauswahl geeigneter Biokunststoffe und Halbzeuge	90
3.7.1	Anforderungen	90
3.7.2	Vorhandene Halbzeuge aus biobasierten Kunststoffen	93
3.7.3	Überprüfung der Umformbarkeit geeigneter Halbzeuge.....	94
3.7.4	Ökologische Beurteilung vorhandener Halbzeuge und Granulate.....	100
3.7.5	Fazit - Beurteilung vorhandener Halbzeuge und Granulate	101
3.7.6	Fazit: Akustikmodul als Spritzgussteil.....	102
4	Entwicklung des Akustikmoduls.....	103
4.1	Produkttypus	103
4.1.1	Produkttyp mit Modulcharakter.....	103
4.1.2	Anwendung	104
4.1.3	Proportionen.....	106
4.1.4	Fazit: Modul der Seitenlänge 25 cm	110
4.2	Technische und Formale Ausarbeitung	111
4.2.1	Herstellungsbedingte Anforderungen	111
4.2.2	Design Workshop.....	116
4.2.3	Verbindung der Kuben	121
4.2.4	Oberflächenstrukturen, ornamentale Strukturen	135
4.2.5	Fazit zu technische und formale Ausarbeitung	140
4.3	Akustik	142
4.3.1	Einfluss der Parameter auf die Akustik.....	142
4.3.2	Fazit	148
4.4	Kalkulation.....	148
4.4.1	Preise.....	148
4.4.2	Gewicht.....	149
4.4.3	Preisveränderungen mit längeren Taktzeiten	150
5	Modifikation biobasierter Kunststoffe zur Herstellung des Akustikmoduls.....	151
5.1	Zusammenfassung: Anforderungen an den Werkstoff.....	152
5.2	Vorauswahl biobasierter Kunststoffe für Spritzgussanwendungen.....	152

5.3	Versuche: Compoundierung.....	153
5.3.1	Zugabe von Flammhemmern unter Berücksichtigung der Lichtdurchlässigkeit.....	153
5.3.2	Brandverhalten nach Zugabe der Flammhemmer.....	154
5.3.3	Wärmeformbeständigkeit (HDT-B)	157
5.3.4	Wärmeformbeständigkeit (HDT-B) nach erhöhter Werkzeugtemperatur und längeren Kühlzeiten.....	158
5.3.5	Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit durch anschließendes Tempern?.....	161
5.3.6	Neutralisierung der Gelbstichigkeit	162
5.3.7	UV-Beständigkeit.....	162
5.4	Anteil nachwachsender Rohstoffe im modifizierten PLA-Compound.....	165
5.5	Biosiegel: Kennzeichnung der Biobasiertheit.....	165
5.5.1	Zertifizierung Biobasierter Produkte durch den TÜV Rheinland DIN CERTO..	165
5.5.2	Umweltkonformitätszeichen VINCOTTE „ok biobased“	166
6	Fazit.....	169
	Literaturverzeichnis	172



Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: rosso acoustic®: CP30 Space Divider von nimbus group.....	15
Abb. 2: Haus im Haus, Handelskammer Hamburg	19
Abb. 3: Solar Decathlon Haus der Uni Wuppertal - Solar Decathlon 2010.....	20
Abb. 4: GFK-Fassade: The Walbrook, London	21
Abb. 5 ICD/ITKE Forschungspavillon 2011	21
Abb. 6: Arbeiten mit biobasierten Kunststoffen am ITKE, teilweise Studentenarbeiten	22
Abb. 7: Aufbau/ Prinzip der Akustikplatte des Projektpartners Nimbus Group: Rosso CP	23
Abb. 8: Akustik-Baustein: Modulare Produktstruktur ©nimbus group.....	24
Abb. 9: Rossoacoustic CP30 im Architekturbüro Bottega + Ehrhardt Architekten, Stuttgart Abb. 10: Rossoacoustic CP 30 Desk Panel	26
Abb. 11: Schnitt durch einen Knochen und Detailaufnahme eines Blattes.....	28
Abb. 12: Bienenwabe und rosso acoustic® CP30 Space Divider von nimbus group ; PLA Hexagonalwabe von Econcore	29
Abb. 13: Studien von tragenden Kernstrukturen in Anlehnung an Blattadem, Demonstrator mit Kern und mikroperforierten Foliendeckschichten.	29
Abb. 14: Studie einer organischen (z.B. geschäumte) Kernstruktur mit transparenten, mikroperforierten Foliendeckschichten.	30
Abb. 15: Tiefziehstruktur ©ITKE; Prada Shop © OMA/ Rem Koolhaas; Seifenschaum	30
Abb. 16: Palmenblatt; Papierfaltungen; Raumteiler ©vitra	31
Abb. 17: Leim zieht Fäden; Clear PEP®, Design Composite/A ©stylepark.....	31
Abb. 18: 1.) + 2.) © Handte ILG Lasertechnik GmbH; 3.) © ITKE	31
Abb. 19: Schmetterlingsflügel; Voronoi;.....	32
Abb. 20: 1.) Colbond/ NL; 2.) Lumicor/ USA; Bilder: Stylepark; 3.) Naturfaser/PLA- Sandwichplatte, Köhler/©ITKE	32
Abb. 21: Filterschaum: 1.) ©RHB Industrieausrüstungen oHG; 2.) © Modulor.....	33
Abb. 22: Dreidimensionale Erosionsschutzmatten von Colbond.....	34
Abb. 23: Sandwichplatten aus PLA ©Econcore NV; ThermHex Waben Econcore.....	35
Abb. 24: Stanzfaltverfahren; ©Thermhex.....	35
Abb. 25: Experimentelle Herstellung des Demonstrators „Schaumstruktur“	36
Abb. 26: Wabenstruktur und mikroperforierte Deckschichten aus Cellulosetriacetat Folien.....	39
Abb. 27: Bremsflüssigkeitsbehälter (Twin-sheet); © Hombach Kunststofftechnik	40
Abb. 28: Herstellung mittels Twin-Sheet: 1. Palette; 2. Gehäuse MRT; © Hombach....	40
Abb. 29: Twin-Sheet-Verfahren © Hombach Kunststofftechnik.....	41
Abb. 30: Twin - Sheet Demonstrator aus PLA, Bilder: nimbus group.....	42
Abb. 31: Demonstratoren aus PETG und ABS mit mikroperforierten Foliendeckschichten. Bild links: ITKE, Bild rechts: nimbus group.....	42
Abb. 32: Querschnitt – Twin Sheet-Profil; Skizze: nimbus group	43
Abb. 33: Realisierbare Ideen im Twin-Sheet- Verfahren © nimbus group.....	44

Abb. 34: Realisierungsmöglichkeit Voronoistrukturen mittels Twin-Sheet – Nachteilig sind hier zu viele Kontaktflächen mit den Deckfolien (zu viele Klebeflächen); © ITKE	45
Abb. 35: Nach dem Tiefziehvorgang verformte, geweitete Mikroperforation (links), festklebende Kaschierfolie (rechts); Bilder: ©nimbus group	47
Abb. 36: tiefgezogene Wellenstruktur in finaler Modulgröße; Anwendungsbeispiel	48
Abb. 37: Doppelschaliges Demonstrator-Modul mit wellenförmiger Oberfläche (ohne Mikroperforation).....	49
Abb. 38: Leim zieht Fäden; Clear PEP®, Design Composite/A ©stylepark.....	49
Abb. 39: Herstellen eines TRlcore-Kerns durch Verstrecken, ©Design Composite	50
Abb. 40: Clear PEP® aus Polycarbonat, Ausschnitt Lochbild der Werkzeugplatten,© Design Composite	50
Abb. 41: Demonstrator – TRlcore-Kern aus einen PLA-PHB-Blend.....	52
Abb. 42: Demonstrator – TRlcore-Kern aus einen PLA-PHB-Blend, Bild2: hinterleuchtet.....	52
Abb. 43: Faltstrukturen ©Foldcore GmbH.....	54
Abb. 44: Faltstrukturen ©Foldcore GmbH.....	54
Abb. 45: Demonstrator: Faltstruktur aus Polylactid ©Foldcore GmbH	55
Abb. 46: Demonstrator: Faltkern aus einer mikroperforierten PLA-Folie; Herstellung: Foldcore GmbH; Bild: ITKE Fotograf: Michael Damböck.....	56
Abb. 47: Vorstudien zu Kern-Faltungen, ineinander gesteckte Faltkerne gefaltete Kernstrukturen, Details Demonstrator; ©nimbus group	57
Abb. 48: Demonstratoren mit stehender Wabe in Voronoimustern	59
Abb. 49: Studien zu Perforationen, Hohlkammerprofilen und additiven Profilen	59
Abb. 50: Raumteiler und Trennwandstruktur aus Extrusionsprofilen ©nimbus group...	60
Abb. 51: 1.) Colbond/ NL; 2.) Lumicor/ USA; Bilder: Stylepark; 3.) Naturfaser/PLA- Sandwichplatte, Köhler/©ITKE; Bild: Michael Damböck	62
Abb. 52: Kunststofffliesen als Raumteiler ©Koziol	63
Abb. 53: Demonstratoren: Spritzguss-Formteile (verklebt) aus einem Polylactid- Blend	66
Abb. 54: Demonstrator: Spritzguss-Formteil aus einem Polylactid-Blend; Design: ©Koziol; Herstellung: Koziol.....	66
Abb. 55: Experimentelle Suche nach alternativen Verbindungsmöglichkeiten: 1. Nähen, 2. Nähen, 3. Prinzip Stift + Ring, 4. Druckknopf © ITKE Universität Stuttgart.....	67
Abb. 56: Spritzguss- Konzeptmodell, Modell + Bild: nimbus group	68
Abb. 57: Wirkungsweise Mikroperforation	70
Abb. 58: Messung CP30 im Kundt'schen Rohr, Wandabstand 50 mm	72
Abb. 59: Messung CTA-30, CTA-40, CTA-50 im Kundt'schen Rohr, Wandabstand 50mm.....	73
Abb. 60: Messung H-W, H-CL im Kundt'schen Rohr, Wandabstand 50mm.....	74
Abb. 61: Messung FA-30, FA-30-P, FA-40, FA-40-P, FA-50, FA-50-P im Kundt'schen Rohr, Wandabstand 50 mm.....	75
Abb. 62: Messung V-21 im Kundt'schen Rohr, Wandabstand 50 mm.....	76
Abb. 63: Vergleich der Messwerte CTA-50. CTA-30, FA-30, FA-30-P, H-W	77
Abb. 64:Produktportfolio Rosso und Rossoacoustic	78
Abb. 65: Skizze Paravent.....	79
Abb. 66: Skizze nichttragende Trennwand	79

Abb. 67: Skizze verstellbares Trennelement.....	80
Abb. 68: Skizze Modulwand	81
Abb. 69: Skizze Platte, Baustoff, Halbzeug	81
Abb. 70: 1.) Edra; 2.) Studio Arihiro Miyake; 3.) Koziol	82
Abb. 71: Module 20/20	83
Abb. 72: Module 30/30	83
Abb. 73: Module 40/40	84
Abb. 74: Module 40/40 in Kombination mit Modulen 20/20.....	84
Abb. 75: 1.) Paravent von e15; 2.) Henrik Tengler: Swing; 3.) Preform.....	85
Abb. 76: Horizontale Längsmodule, Höhe 10 cm.....	85
Abb. 77: Horizontale Längsmodule, Höhe 20cm.....	86
Abb. 78: Horizontale Längsmodule, Höhe 30cm.....	86
Abb. 79: Horizontale Module, Höhe 40cm	87
Abb. 80: 1.) Eames Trennwand; 2.) Ligne Roset; 3.) Fritz Hansen	87
Abb. 81: Vertikale Längsmodule, Breite 10 cm.....	88
Abb. 82: Vertikale Längsmodule, Breite 20 cm.....	88
Abb. 83: Vertikale Längsmodule, Breite 40 cm.....	89
Abb. 84: Tiefziehversuche Cellulose-triacetatfolie (Folienunterseite, Folienoberseite).....	95
Abb. 85: Tiefziehversuch mit einer Folie aus Polylactid; Folie und Formwerkzeug	95
Abb. 86: Tiefzieh-Formwerkzeug (links) und Formkörper aus Polylactid (rechts).....	96
Abb. 87: Tiefziehwerkzeug (links) und Formkörper aus Cellulosediacetat (rechts)	97
Abbildung 88: Tiefziehen einer flamm-schutz-ausgerüsteten Cellulosediacetatfolie.....	97
Abb. 89: Unterseite des Formkörpers aus Cellulosediacetat: keine exakte Abformung	98
Abb. 90: Probleme beim Tiefziehen einer Biokunststofffolie: milchige Stellen.....	98
Abbildung 91: Probleme beim Tiefziehen einer Biokunststofffolie: Bläschenbildung....	99
Abb. 92: Ergebnis des Tiefziehversuches einer mikroperforierten und kaschierten Biokunststofffolie.....	100
Abb. 93: Rossoacoustic CP30 und Biocomposites Modul Rossoacoustic CP30 und Biocomposites Modul.....	104
Abb. 94: Darstellung Anwendung am Arbeitsplatz.....	104
Abb. 95: Anwendungsskizze Trennwand/Empfang.....	105
Abb. 96: Anwendungsskizze Tresen, Arbeitsplatzabtrennung, Regal	105
Abb. 97: Anwendungsskizze Raum (Raum-im Raum) /abgehängte Decke	106
Abb. 98: Darstellung Anwendung als Raum/Empfang/Tresen	106
Abb. 99: Raster Euro-Modul	107
Abb. 100: Achsmaß O. M. Ungers.....	108
Abb. 101: Achsmaß 1,35 m	108
Abb. 102: Achsmaß 1,50 m.....	109
Abb. 103: Oktometer 1,25 m	109
Abb. 104: Anwendungsbeispiel mit unterschiedlichen Modulabmessungen	110
Abb. 105: nimbus Leuchte Q-V6.....	112
Abb. 106: Schematische Darstellung des Materialflusses beim Spritzgussvorgang...	112
Abb. 107: 0,6 mm Lochbohrung bei 8 mm Lochraster (ohne kegelförmige Senkung).....	113

Abb. 108: Schnitt durch die Definition des Lochdurchmessers für ein Probewerkzeug.....	114
Abb. 109: Konstruktives Prinzip Halbschale	115
Abb. 110: Konzeptstudien: Halbschalenmodule mit Verstärkungsstegen	116
Abb. 111: Designworkshop im „MockUp“ der nimbus group	117
Abb. 112: erste Ideenskizzen zum Thema Modulverbindung.....	118
Abb. 113: Halbschalenmodul mit Rasthaken und Nut-/Federkante	119
Abb. 114: Die Suche nach dem geeigneten Verbinder zieht sich wie ein roter Faden durch den gesamten Designprozess.....	121
Abb. 115: Skizzen zu möglichen Verbindungslösungen	122
Abb. 116: Studien zu sichtflächenseitig montierbaren Verbindern	123
Abb. 117: Weitere Varianten von Schraub- und Steckverbindungen	124
Abb. 118: Wie lässt sich der 4. Baustein integrieren? Als „Puzzleteil“ funktioniert die Addition zwar, jedoch kann der einzelne Baustein aus dem Verbund geschoben werden. Als Rastverbindung (im Legoprinzip) lässt sich das 4. Modul nicht integrieren.....	125
Abb. 119: Konzeptstudie: zweiteiliger Modulaufbau.....	126
Abb. 120: mögliches Montageszenario.....	127
Abb. 121: Module mit integrierten Magneten	127
Abb. 122: Funktionsprinzip der N- und H-Verbinder	128
Abb. 123: H- und N-Verbinder bilden modulübergreifende Verbindungen	129
Abb. 124: Verbindervarianten; durch fehlenden Eckradius verdecktes Demontageloch.....	129
Abb. 125: Modellstudien: Beispiel für einrastende Verbinder (lasergeschnitten).....	130
Abb. 126: Darstellung eines Funktionsprinzips einer Moduladdition mittels einrastenden Verbinderelementen	131
Abb. 127: Separates Eckmodul	131
Abb. 128: CAD Studie Excenter-Verriegelung	132
Abb. 129: Verbindung mittels Einleger und Stiften.....	133
Abb. 130: Drehverbinder ähnlich dem Bajonettprinzip	134
Abb. 131: CAD Darstellung des Drehverbinders und Skizze einer Eckverbindung	134
Abb. 132: Modulübergreifendes Motiv. Die Betonung liegt auf den Punkten. Die vertikale und horizontale Trennung rückt visuell etwas in den Hintergrund. ...	135
Abb. 133: Dimensionale Oberflächenverformung als Relief.....	136
Abb. 134: Beispiele zu einfachen modulübergreifenden Linienstrukturen	136
Abb. 135: Variation der Flächenwirkung über ein Halbschalenmodul, das bei der Montage durch Verdrehen um 90° vier verschiedene Motive in einem Modul erzeugen kann.....	138
Abb. 136: Perforationsmuster Bild: ITKE © M. Damböck.....	139
Abb. 137: Rendering Akustikmodul	140
Abb. 138: Modellstudie (im 3D Sinterverfahren hergestellt) Bild: ITKE © M. Damböck	141
Abb. 139: Modellstudie: konsequente, formale Reduktion und hochwertige Materialästhetik als Gestaltungsziel Bild: ITKE © M. Damböck	141
Abb. 140: CP 30 frost (links); simulierter Transluzenzgrad des Akustikmoduls (rechts); Bilder © nimbus group	142
Abb. 141: Digitales Modell Biocomposites Modul	143
Abb. 142: Berechnung Absorptionsgrade bei veränderten Lochabständen	144

Abb. 143: Berechnete Absorptionsgrade bei veränderten Lochdurchmessern.....	145
Abb. 144: Berechnete Absorptionsgrade bei veränderten Schichtdicken.....	146
Abb. 145: Berechnete Absorptionsgrade bei veränderten Gesamtdicken.....	147
Abb.146: Skizze zu den Abhängigkeiten Schichtdicke, Lochabstand und Lochdurchmesser	148
Abb. 147: Produkte aus SUPLA®.....	151
Abb. 148: Darstellung unterschiedlicher Transparenzgrade: mit Flammenschutzmitteln modifiziertes Polylactid	154
Abb. 149: Prüfstäbe nach dem Brandtest, mark. Stab: Cellulosediacetat + 10wt% TPP	156
Abb. 150: (Modifiziertes) Polylactid: Darstellung unterschiedlicher Transparenzgrade.....	160
Abb. 151: Modifiziertes Polylactid: Darstellung unterschiedlicher Transparenzgrade.	160
Abb. 152: Verzug der Formteile während des Temperns (ohne Lagerung in einem Werkzeug)	161
Abb. 153: Ergebnisse nach Zugabe unterschiedlicher Mengen eines optischen Aufhellers (blaues Granulat)	162
Abb. 154: Proben nach Überprüfung der UV-Beständigkeit hinter Fensterglas (DIN EN ISO 4892-3)	164
Abb. 155: Proben nach Überprüfung der UV-Beständigkeit hinter Fensterglas (DIN EN ISO 4892-3)	165
Abb. 156: Zertifizierung der Biobasiertheit durch den TÜV Rheinland DIN CERTO...	166
Abb. 157 Zertifizierung OK biobased durch VINCOTTE/ Belgien.....	167
Abb. 158: Durchschnittliche Wärmeformbeständigkeit (HDT-B) der markierten Platten (Stärke 2 mm): 45,6°C (grün) und 79,9°C (orange).....	169

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gebäudeklassen nach der Musterbauordnung.....	91
Tabelle 2: Wärmeformbeständigkeit und Gebrauchstemperatur (transparenter) von Kunststoffen, die in der Architektur angewendet werden.....	92
Tabelle 3: Vergleich des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bio- und erdölbasierter Kunststoffe	100
Tabelle 4: Gegenüberstellung vorhandener Biokunststoff-Halbzeuge	101
Tabelle 5: Brennbarkeitsklassen UL 94-Vertical Burning (VB).....	155
Tabelle 6: Durchschnittliche Wärmeformbeständigkeit Ergebnisse der Messstationen; © ITKE nach Vorlage der Prüfberichte vom Fraunhofer ICT und IKT/ Uni Stuttgart	157
Tabelle 7: HDT-B und Varianz der Herstellungsbedingungen gleicher Compounds, © ITKE nach Vorlage der Prüfberichte vom Fraunhofer ICT.....	159

Abkürzungsverzeichnis

APP	Ammoniumpolyphosphat
CDA	Cellulosediacetat
CTA	Cellulosetriacetat
PC	Polycarbonat
PET	Polyethylenterephthalat
PHB	Polyhydroxybutyrat
PLA	Polylactid
PMMA	Polymethylmethacrylat
TPP	Triphenylphosphat
UL-94-VB	Underwriter laboratories 94 vertical burning

1 Zusammenfassung

Ziele:

Gegenstand des Forschungsvorhabens war die prototypische Entwicklung einer möglichst transparenten Akustikplatte aus biobasierten Kunststoffen, die zur Raumtrennung, sei es als mobile Trennwand oder als Bestandteil von Raum-im-Raum-Systemen, eingesetzt werden kann.

Anforderungen:

Es galt eine Produktstruktur zu entwickeln, die sich mit wenigen Fertigungsschritten ökonomisch produzieren lässt. Das Akustikmodul / die Akustikplatte sollte transparent bis transluzent sein und auf einem hohen Anteil nachwachsender Rohstoffe basieren. Der eingesetzte Biokunststoff darf nach seiner Modifikation nicht mehr brennend abtropfen. Die Formbeständigkeitstemperatur sollte bei 70°C (HDT-B) liegen. Der Endpreis des Produktes muss marktfähig sein.

Fragestellungen:

Können verfügbare Biokunststoffe gemäß den Anforderungen bei Innenraumanwendungen sinnvoll und ökonomisch modifiziert werden?

Können transparente und transluzente Biokunststoffe mit in der Architektur verwendeten transparenten Kunststoffen wie z.B. Plexiglas (PMMA), Polycarbonat (PC), PET konkurrieren?

Ergebnisse:

Es wurde ein Spritzguss-Akustik-Modul entwickelt, das auf 2 Halbschalen basiert. Die Mikroperforation sowie die Kanten des Moduls und Stecksysteme werden gespritzt, sodass im Vergleich zum erdölbasierten Akustik-Trennwandelement der Firma Nimbus, Fertigungsschritte eingespart werden können.

Hinsichtlich des Materials wurde niedrigviskoses Polylactid mit einem Flammschutzmittel modifiziert, der die Transparenz des Werkstoffes nicht beeinträchtigt. Die Wärmeformbeständigkeit konnte durch Zugabe von Nucleierungsmitteln verbessert werden. Die für die Verarbeitung von Polylactid übliche Werkzeugtemperatur von 25°C sowie die Kühlzeit wurde erhöht, um den Kristallisationsgrad und somit die Wärmeformbeständigkeit des Polymers zu verbessern. Durch längere Kühlzeiten wird die Produktionskapazität pro Tag minimiert, was zu einem zu hohen Teilepreis führt. Des Weiteren gelang es nicht, eine für den Projektpartner Nimbus Group zufriedenstellende Transluzenz zu erzielen.

2 Anlass und Ziele

Die Anforderungen an unser Lebens- und Arbeitsumfeld verändern sich heute schneller als die Lebensdauer von Bauwerken. Architekten reagieren auf diesen Wandel, indem sie öffentliche Gebäude oder Bürobauten mit offenen Grundrissen planen, die sich flexibel zu Räumen gliedern lassen.

Da in der modernen Architektur in zunehmendem Maße schallharte Materialien wie Betonwände, glatte Bodenbeläge und große Fensterflächen zum Einsatz kommen, kann Schall nicht ausreichend absorbiert werden und die Nachhallzeit erhöht sich gravierend.

Aus der Praxis resultiert der Wunsch nach einer leicht beweglichen oder umsetzbaren Raumtrennung unter Beibehaltung der optischen Durchlässigkeit und Offenheit, die zudem in der Lage ist, akustisch angenehme Raumsituationen zu ermöglichen.

Glas eignet sich aufgrund seines Gewichtes nur bedingt für diese Ansprüche. Acrylglas (PMMA), Polycarbonat (PC) oder Polyethylenterephthalat (PET) bieten eine leichte und splitterfreie Alternative.

Angesichts einer immer intensiver geführten Debatte über Klimawandel und Ressourcenverknappung wächst im Sinne eines 'Sustainable Designs' die Nachfrage an Werkstoffen, die rohstoff-effizient ästhetische Ansprüche erfüllen und vielseitig variierbar sind.

Auf Unternehmenseite manifestiert sich unter dem Schlagwort *Corporate Social Responsibility* die Notwendigkeit Umweltbelange in die Unternehmenstätigkeit zu integrieren. Dem Unternehmen steht zudem eine mündige Konsumentengeneration gegenüber, deren Ansprüche sich neu formiert haben und für die eine im Produktprogramm verankerte Nachhaltigkeit ein ebenso klares Kaufargument darstellt, wie einst der Niedrigpreis.

Im Forschungsprojekt soll geprüft werden, ob transparente biobasierte Kunststoffe den Anforderungen bei Innenraumanwendungen gerecht werden und mit transparenten, erdölbasierten Kunststoffen wie Acrylglas, Polycarbonat oder PET konkurrieren können.

2.1 Zielsetzung

Seit 1995 bedient der Projektpartner Nimbus Group mit der Marke Rosso den Markt für innen liegende Verschattung und Raumgliederungssysteme für Wohn- und Bürogebäude. Dabei liegt der Schwerpunkt seit einigen Jahren in der Ausstattung oben genannter Produkte mit raumakustischen Eigenschaften.

Dazu wurde u.a. in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Bauphysik in Stuttgart das patentierte Prinzip des Mikroabsorbers auf hochwertig gestaltete Produkte angepasst, wie z.B. die Schallschirmende und gleichzeitig durchsichtige Leichtbau-Stellwand *CP30 Space Divider*.



Abb. 1: rosso acoustic®: CP30 Space Divider von nimbus group

Zusätzlich zur Stellwand *Rosso CP30* soll dem Kunden eine Bioversion aus nachwachsenden Rohstoffen angeboten werden.

Gegenstand des Forschungsprojektes war demzufolge die Entwicklung einer möglichst transparenten Akustik-Leichtbauplatte aus biobasierten Kunststoffen, die zur flexiblen Rauntrennung eingesetzt werden kann. Das Prinzip mikroperforierter Oberflächen sollte daher auch in der im Projekt entwickelten Bioversion aus nachwachsenden Rohstoffen Anwendung finden. Gemäß der biobasierten Herkunft des Materials war man jedoch bestrebt, eine andere Formensprache der Plattenstruktur zu finden.

Der Anspruch einer hochwertigen Gestaltung des Produktes entspricht zum einen der Firmenphilosophie des Industriepartners Nimbus Group, andererseits soll dadurch der Zugang biobasierter Werkstoffe zu anspruchsvollen Projekten in der gegenwärtigen Architektur ermöglicht werden.

Folgende Anforderungen wurden aus Unternehmerseite an die zu entwickelnde Akustikplatte gestellt:

- Ein möglichst hoher Anteil an nachwachsenden Rohstoffen soll erreicht werden. Ein Bioanteil von mehr als 80% wird angestrebt.
- Zur Herstellung des biobasierten Kunststoffes sollte weniger Energie aufgebracht werden
- Im Vergleich zur CP30 von Rossoacoustic sollen Fertigungsschritte eingespart und Produktionskosten pro m² minimiert werden. Auch hohe Werkzeugkosten (im mehrere 100.000-Bereich) sollten in Betracht gezogen werden, um einen geringen Herstellungspreis zu erzielen. Der Zielpreis für das neue Produkt liegt 30% unter dem Verkaufspreis der CP30.
- Fertigungsschritte sollen eingespart und Produktionskosten pro m² minimiert werden. (Im Vergleich zu rossoacoustic© CP30 space divider)
- Aus dem Prototyp sollte sich nach Projektende in Kürze ein marktfähiges Produkt weiterentwickeln lassen. Daher sollte ein kosteneffizientes Produktionsverfahren gewählt und ein möglichst konkurrenzfähiger Endpreis des (modifizierten) Biokunststoffes erreicht werden. Die Verfügbarkeit verwendeter biobasierter Kunststoffe und entsprechender Additive muss gewährleistet sein.
- Der Prototyp, sowie das spätere Produkt sollten lichtdurchlässig – transparent bis transluzent sein.
- Die akustische Wirksamkeit müsste vergleichbar oder besser sein, als die Akustikplatte Rossoacoustic CP30. Es wurde eine Absorption breiterer Frequenzbereiche angestrebt. Vor allem tiefere Frequenzen sollten besser absorbiert werden. Dabei soll auch auf das Prinzip mikroperforierter Deckschichten zurückgegriffen werden.

- Die zur Anwendung in Innenräumen notwendigen Anforderungen müssen erfüllt werden und eine hohe optische und haptische Qualität bieten.
- Des Weiteren wären unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten der Akustikplatte vorteilhaft: Sowohl eine Solitäranwendung (mobile Stellwand), als auch die additive Anwendung als leicht umsetzbare Platten für Raum-im-Raum-Systeme wären vorteilhaft.

2.2 Umweltrelevante Ziele

Ein Viertel aller Kunststoffe werden für die Bauindustrie produziert.¹

Die Substitution petrochemisch basierter Kunststoffe durch Biokunststoffe würde Umweltentlastungseffekte der Baubranche ermöglichen.

Umweltrelevante Ziele sind daher:

- **Verwendung von Kunststoffen auf der Basis schnell nachwachsender Rohstoffe**
Ressourcen schonen durch Verwendung von Biopolymeren, die auf vorwiegend nachwachsenden Rohstoffen (NaWaRos) und auf Reststoffen der Agrar-, Zigaretten-, Lebensmittelindustrie etc. basieren.
- **CO₂-neutrale Entsorgung**
Die Entwicklung einer Leichtbauplatte aus vorwiegend nachwachsenden Rohstoffen, die weitestgehend CO₂-neutral entsorgt werden kann, da nur die CO₂-Menge emittiert wird, die die Pflanze beim Wachstum der Atmosphäre entzogen hat.
- **Materialeffizienz**
Die Entwicklung einer durch Materialeffizienz Ressourcen schonende Leichtbaustruktur, die mechanische Stabilität bei minimalem Gewicht realisiert.
- **Energieeffizienz**
Verwendung von Materialien, die energiesparend produziert werden können. Bei der Produktion von PLA werden z.B. bis zu 65% weniger fossile Rohstoffe benötigt, als zur Herstellung petrochemischer Polymere.²

Die hier entwickelten Materialien können einen Anstoß für die weiterführende Materialforschung geben. Acrylglas, Polycarbonat ETFE etc. sind transparente Materialien, die im Bauwesen auch für Außenanwendungen häufig eingesetzt werden.

2.3 Projektaufbau und Beteiligte

2.3.1 Beteiligte: Nimbus Group

Als Premiumanbieter für Beleuchtungs- und Akustiklösungen im Privat- und Objektbereich ist die Nimbus Group mit 150 Mitarbeitern weltweit aktiv. Das in Stuttgart ansässige Unternehmen führt sowohl in Europa als auch in Übersee Licht- und Akustiklabors, sogenannte „Mock-Ups“. Vor etwa 10 Jahren begann Firmengründer Dietrich Brennenstuhl damit, die Zukunftsthemen Energieeffizienz und LED-Beleuchtung sowie neuartige Akustiklösungen voranzutreiben – und baute ein qualifiziertes Team aus Ingenieuren, Lichttechnikern und Produktentwicklern auf; heute arbeiten allein 25 Personen in der leistungsstarken Entwicklungsabteilung. Übergreifendes, interdisziplinäres Denken ist Bestandteil des Firmenkonzpts. Zu den Kooperations- und Innovationspartnern aus Wissenschaft und Forschung gehören neben unterschiedlichen Fakultäten renommierter Universitäten das Fraunhofer-Institut für Bauphysik sowie namhafte Architekturbüros und die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen. Im September 2010 wurde die Nimbus Group in den Stiftungskreis des Rats für Formgebung berufen.

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IBP hat die Nimbus Group schallabsorbierende Flächenvorhänge und Paneele entwickelt, die unter der Marke Rossoacoustic vertrieben werden. Die Absorption geht dabei auf die vom Fraunhofer-Institut entwickelte und patentierte Mikroperforation zurück. Neben der akustischen Wirksamkeit steht Rossoacoustic für Leichtigkeit und Transparenz.

Auswahl Referenzen:

Haus in Haus: Nach Plänen des Stuttgarter Architekten Stefan Behnisch (Behnisch Architekten) entstanden in der klassizistischen Börsenhalle fünf transparente Büroetagen. Als eines der ersten Bürogebäude weltweit wird der Neubau ausschließlich mit energiesparenden smdLEDs beleuchtet. Durch die Einzigartigkeit dieser Beleuchtung erlangt das Gebäude im Zusammenspiel mit den transluzenten, transparenten und reflektierenden Materialien eine nahezu „immaterielle“ Erscheinung. Unterstützt wird die Immaterialität durch Rossoacoustic Paneele, die hier zur akustischen Konditionierung eingesetzt wurden.

Bauherr: Handelskammer, Hamburg

Architekt/Planer: Behnisch Architekten

Stuttgart, Realisierung: 2007



Abb. 2: Haus im Haus, Handelskammer Hamburg

Solar Decathlon: 17 Hochschulteams aus der ganzen Welt beteiligten sich 2010 am Solar Decathlon, der erstmals in Europa stattfand. Diesen Wettbewerb der Hochschulen schreibt das US-Energieministerium aus, um das Bewusstsein der Öffentlichkeit für energieeffizientes Bauen zu stärken. Aufgabe war es, ein 75 qm großes und nur mit solarer Energie versorgtes Wohnhaus zu entwerfen, zu bauen und in Madrid der Öffentlichkeit zu präsentieren. Die Nimbus Group unterstützte dabei gleich zwei Hochschulen – die Universität Rosenheim und die Universität Wuppertal.

Das Team der Universität Wuppertal hat in seinem Solarhaus gemeinsam mit Nimbus das traditionelle Konzept „Licht und Lichtschalter“ durch eine völlig neue und radikale Lichtdecken-Lösung ersetzt. Dabei steht die Interaktion zwischen Bewohnern, häuslicher Aktivität und Lichtsituation im Mittelpunkt. Die aus einer Kombination von Rossoacoustic CP30 Membrankörpern und LED.next Platinen hinterleuchtete Lichtdecke ist zudem mit einer Steuerung hinterlegt: Sie reagiert auf den Nutzer. Dank des innovativen Beleuchtungskonzepts wurde das Haus der Wuppertaler mit dem zweiten Preis des Sonderpreises der ADPI Lighting Association ausgezeichnet.



Abb. 3: Solar Decathlon Haus der Uni Wuppertal - Solar Decathlon 2010

2.3.1 Beteiligte: Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE) – Projektleitung

Das ITKE führt seit 2002 grundlegende Forschungsarbeiten zum Einsatz (Faserverstärkter) Kunststoffe im Bauwesen durch. Dies umfasst unter anderem die Fügung von Faserverbundbauteilen, das Brandverhalten oder bauphysikalische Eigenschaften. Es gilt, materialspezifische Vorteile für die Baubranche nutzbar zu machen und zu optimieren. Das ITKE ist die größte universitäre Forschungseinrichtung in Deutschland mit einem Schwerpunkt auf Bauen mit faserverstärkten Kunststoffen.

Im Rahmen von Industrieprojekten wurden Fenster und Fassaden aus faserverstärkten Kunststoffen entwickelt. Gleichzeitig konnten Brückenprojekte erfolgreich verwirklicht werden, unter anderem die erste Straßenbrücke in Deutschland mit einer tragenden Fahrbahnplatte aus glasfaserverstärktem Kunststoff in Friedberg (Hessen).

Das ITKE unterstützt KMUs bei der Entwicklung von Anwendungen faserverstärkter Kunststoffe im Bauwesen. Darüber hinaus berät das Institut Bauherren oder Firmen bei der Planung und Umsetzung neuer Produkte oder Bauwerke. Unter anderem werden dafür Dienstleistungen angeboten, die von KMUs nicht selbständig erbracht werden können. Dies sind FEM-Berechnungen, Konstruktion und Materialprüfungen. Das fakultätsinterne Prüflabor ist speziell für statische und dynamische Untersuchungen von (faserverstärkten) Kunststoffen ausgelegt.

Auswahl Referenzen:

GFK-Fassade: The Walbrook in London: Das ITKE berät die Josef Gartner GmbH, Gundelfingen, bei dem Bau der GFK-Fassade für das Projekt 'The Walbrook' in London. Zusammen mit dem Auftraggeber werden technische Anforderungen für die handlaminieren Bauteile entwickelt und überwacht. Dabei spielen vor allem Faktoren wie Dauerhaftigkeit, Ästhetik und Brandschutz eine wesentliche Rolle. Das ITKE prüft die Bauteile hinsichtlich Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit, außerdem wird eine Qualitätskontrolle der Produktion entwickelt und durchgeführt.

Auftraggeber: Josef Gartner GmbH, Architekt: Foster + Partners

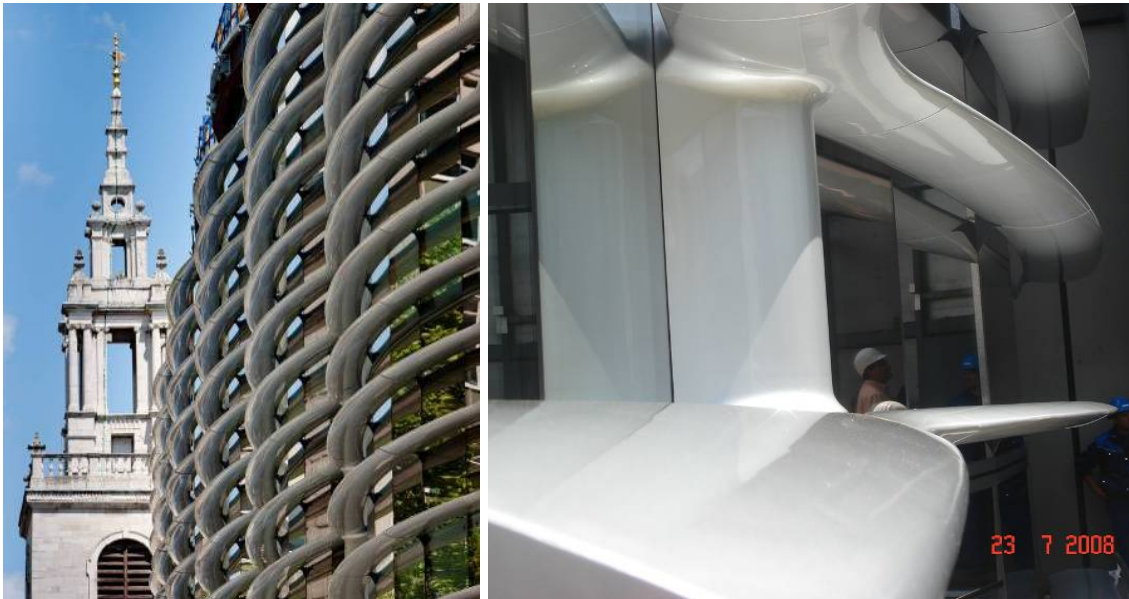


Abb. 4: GFK-Fassade: The Walbrook, London

ICD/ITKE Forschungspavillon 2011: Im Sommersemester 2011 realisierten das Institut für Computerbasiertes Entwerfen (ICD) und das Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE) der Universität Stuttgart, einen temporären bionischen Versuchsbau aus Holz, der an der Schnittstelle von Lehre und Forschung, zusammen mit Studierenden entworfen, geplant und ausgeführt wurde. Das Projekt erforscht die Übertragung biologischer Strukturbildungsprinzipien der Plattenskelette von Seeigeln in die Architektur, mittels neuartiger computerbasierter Entwurfs- und Simulationsverfahren sowie computergesteuerter Fertigungsmethoden für deren bauliche Umsetzung.

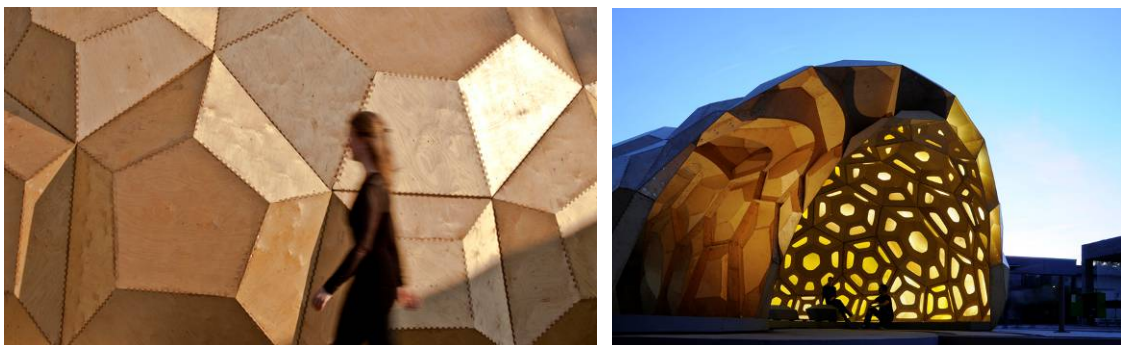


Abb. 5 ICD/ITKE Forschungspavillon 2011

Die auf Anwendungen fokussierte Forschung zu (Naturfaserverstärkten) Biokunststoffen, stellt eine umweltrelevante und zeitgemäße Weiterentwicklung der bisherigen Arbeiten dar.

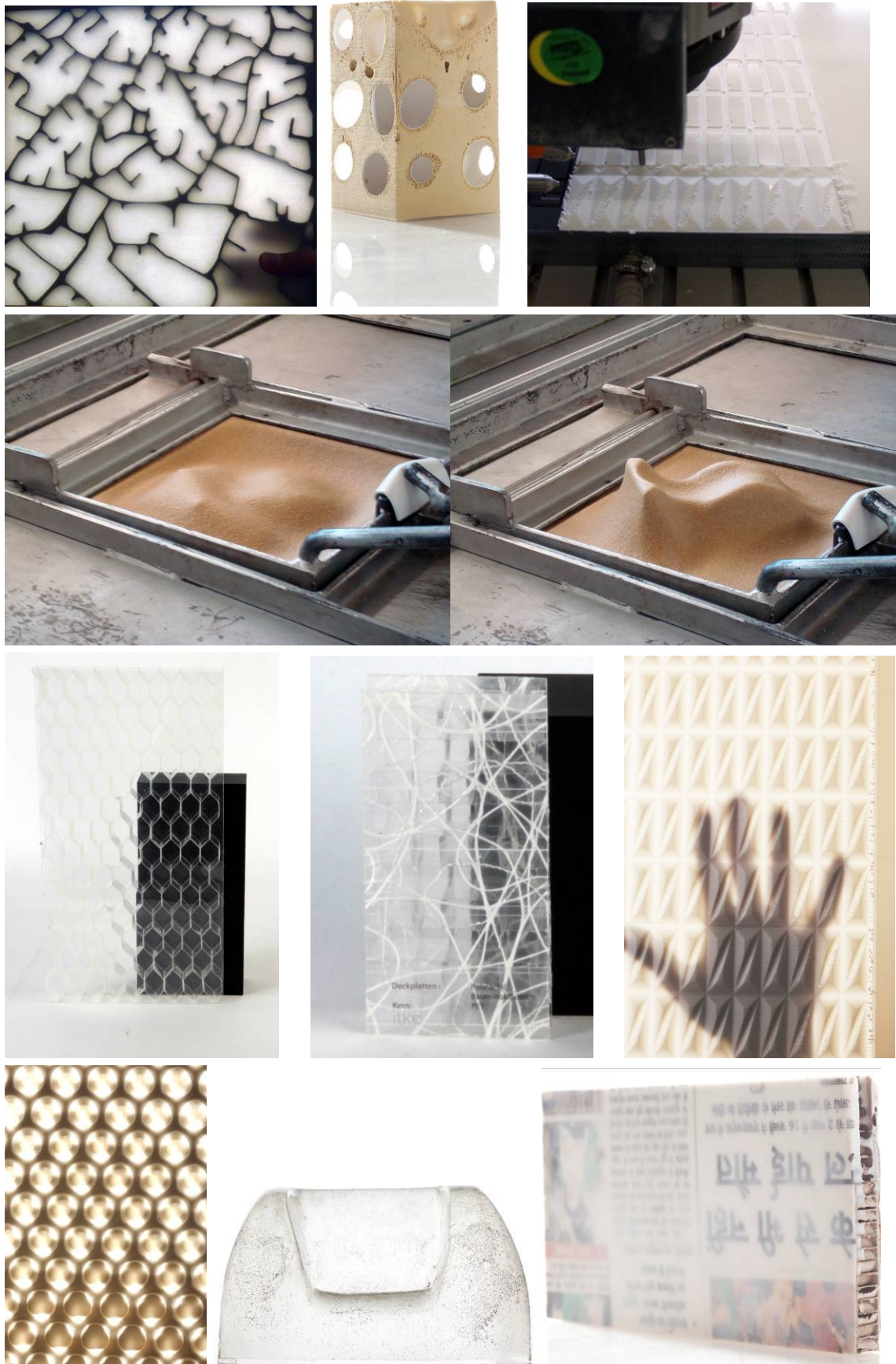
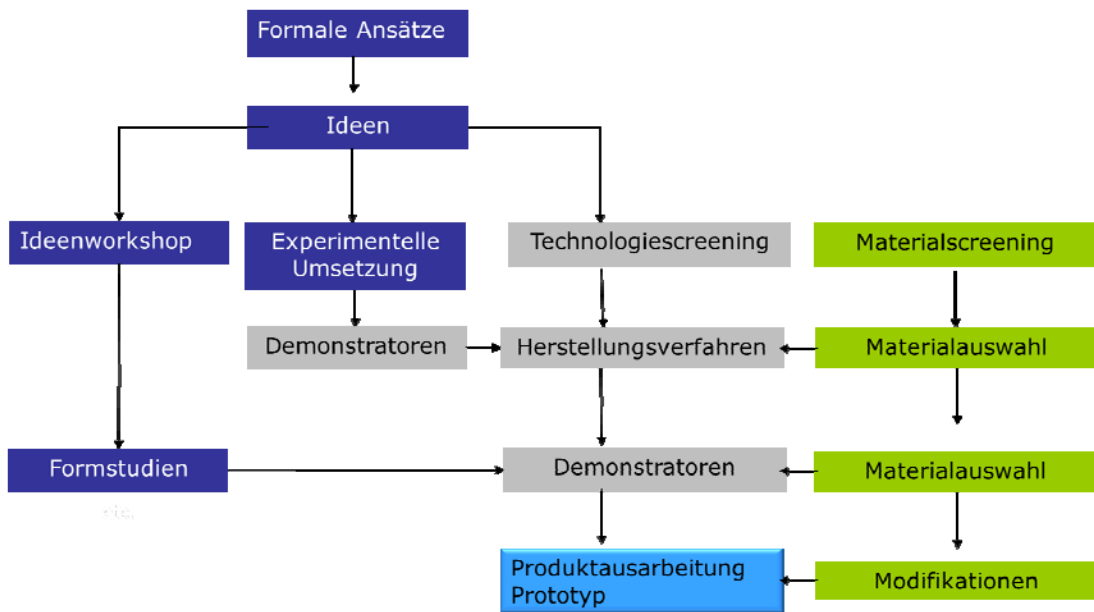


Abb. 6: Arbeiten mit biobasierten Kunststoffen am ITKE, teilweise Studentenarbeiten

2.3.2 Projektaufbau



Die Akustikplatte sollte als Sandwichbauteil konzipiert werden. Sandwichplatten bestehen aus einer dreidimensionalen Struktur, die auf ihrer Ober- und Unterseite mit je einer Folienlage oder Platte verbunden ist. Die Deckschichten sollen aus akustischen Gründen mikroperforiert sein.

Zunächst wurden Ideen gesammelt, wie die biobasierte Akustikleichtbauplatte zur flexiblen Raumtrennung aussehen könnte. Hierbei wurden unterschiedliche Möglichkeiten für den Sandwichkern eruiert.

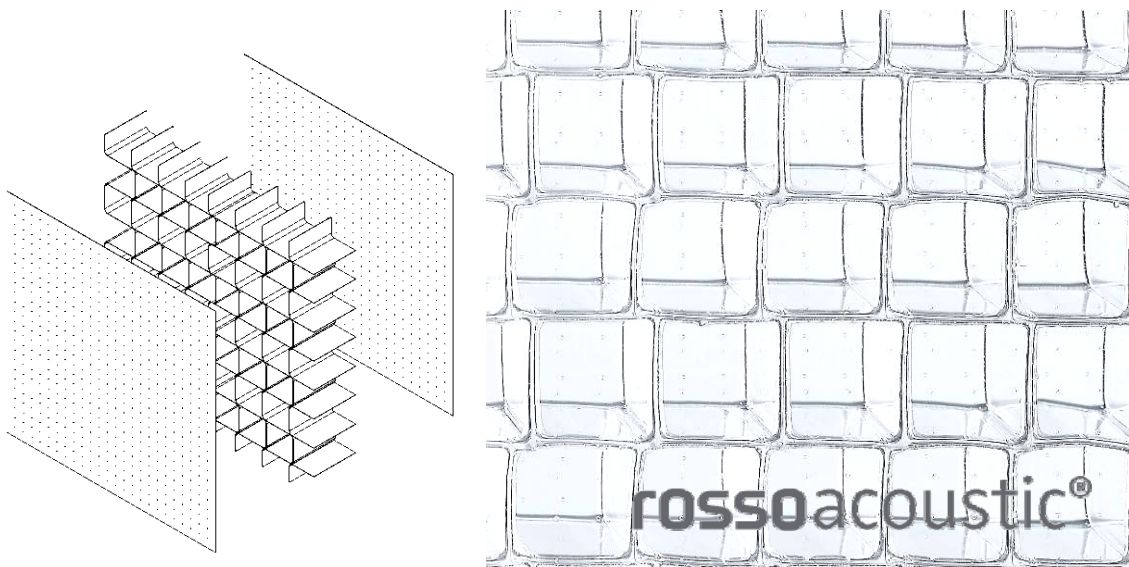


Abb. 7: Aufbau/ Prinzip der Akustikplatte des Projektpartners Nimbus Group: Rosso CP

- Transparenter bis transluzenter Werkstoff
- Kein brennendes Abtropfen
- Eine Wärmeformbeständigkeit von ca. 70°C (HDT-B)

Zum Abschluss des Projektes wurde das modifizierte, niedrigviskose Polylactid im Spritzgusswerkzeug (Prototyp) zu mikroperforierten Platten der Größe 250x250x2,5mm verarbeitet.

Die Entwicklung von Verbindern und Standfüßen/leisten zum Fügen der Module waren auch Bestandteil des Projektes.

Des Weiteren wurden biobasierte Kunststoffe hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit verglichen und Möglichkeiten zur Kennzeichnung (Ökosiegel) eruiert.

Die Kompetenzen und Arbeitsfelder waren dabei wie folgt verteilt:



2.3.3 Innovativer Charakter des Projektes

Akustisch wirksame Bauplatten, die zur flexiblen Raumtrennung in Innenräumen eingesetzt werden können und dabei auf einem hohen Anteil nachwachsender Rohstoffe basieren sowie eine hohe Lichtdurchlässigkeit (Transparenz oder Transluzenz) gewährleisten, werden auf dem Markt noch nicht angeboten.

Die im Bauwesen bisher verwendeten Bauplatten aus nachwachsenden Rohstoffen sind opak (Holzwerkstoffe, Strohplatten, Lignin-Baustoffplatte etc.).

3 Projektbearbeitung – Ideen, deren Umsetzung zu Demonstratoren und Entscheidungskriterien

3.1 Raumgliederungssystem des Partners Nimbus Group

Verfügbares Raumgliederungssystem des Partners Nimbus Group.



Abb. 9: Rossoacoustic CP30 im Architekturbüro Bottega + Ehrhardt Architekten, Stuttgart

Abb. 10: Rossoacoustik CP 30 Desk Panel

Rossoacoustik CP 30 basiert auf einer Leichtbauweise, die dem Prinzip einer natürlichen Wabenplatte folgt. Diese lebendig wirkende Zellstruktur wurde gemeinsam mit dem Fraunhofer Institut für Bauphysik entwickelt und ist nachweislich in der Lage, den Schall wirksam zu absorbieren. Besonderes gestalterisches Merkmal ist die transparente Kante von Rossoacoustik CP 30. Sie schützt die filigrane Wabenstruktur. Die transparente Kante bildet den passenden Abschluss, der durch seine Immaterialität die volle Wirkung der Zellstruktur erhält³

Das Rossoacoustic CP30 System des Projektpartners nimbus group ist ein neu konzipiertes Raumgliederungssystem und die optimale Ergänzung zur Schaffung perfekter Raumarchitektur und hoher Arbeitseffizienz. Es schafft Privatsphäre zwischen Arbeitsplätzen und verbessert die Raumakustik. Einfach aufgebaut, einfach umgebaut. Lichtdurchlässig, schallabsorbierend und schallschirmend.

Rossoacoustic CP30 wurde als modulares System für drei unterschiedliche Anwendungsbereiche konzipiert: - Zur Zonierung und Schirmung von Arbeitsgruppen und

Besprechungsinseln. Eine herausragende und zeitgemäße Neuinterpretation der klassischen Stellwand. - Zur Ergänzung von Arbeitstischen und zur akustischen Gestaltung des persönlichen Arbeitsumfeldes, ergänzend zum eingesetzten Möbelsystem. - Zur deckengebundenen Anwendung über Arbeitsplätzen, als horizontales oder vertikales Element einsetzbar, als dämpfendes Deckenelement in Großraumbüros.⁴

3.2 Ideen für die Entwicklung eines Raumgliederungssystems aus biobasierten Kunststoffen

3.2.1 Formale Ansätze und Produktstrukturen mit bionischem/organischem Schwerpunkt

Fragestellungen:

Eine Frage, die sich während des Entwicklungsprozesses stellte, war: wie biologisch bzw. bionisch soll, darf oder muss die produktsprachliche Aussage des Entwurfes sein? Bieten bionische oder naturorientierte Formuntersuchungen mögliche Ansatzpunkte?

In der Automobilindustrie fließen bereits gestalterische Anleihen aus der Natur in den Gestaltungsprozess und in das Engineering mit ein, z.B. mit dem Ziel den Luftwiderstand von Fahrzeugen und somit auch den Energieverbrauch der Fahrzeuge zu senken. Automobilstudien zitieren bzw. imitieren z. B. die Form von Fischen, deren Körperformen (besonders) strömungsgünstig ausfallen.

Forschem ist es z. B. auch gelungen eine Oberflächenbeschichtung zu entwickeln, die konstruktive Merkmale von Haifischhaut aufweist. Diese gilt aufgrund ihrer Beschaffenheit der Oberflächenstruktur ebenso als besonders strömungsgünstig.

Die Besonderheit bei den angeführten, naturorientierten Gestaltungsbeispielen ist, dass sich die formale Aussage aus den jeweiligen konstruktiven Bedingungen ableitet. Beide erfüllen letztendlich den Zweck der schnelleren Fortbewegung im Wasser, um entweder besser zu flüchten oder effektiver jagen zu können. Das sind nur zwei Beispiele für das bemerkenswerte Erfindungsreichtum der Natur.

Anforderungen:

Im Engineering befasst man sich zum Teil schon seit einigen Jahren mit der Bionik. Jedoch beschränkt sich, aufgrund der immer stärker interdisziplinär vernetzten Entwicklungsprozesse, der Einfluss der Bionik nicht nur auf die Technik.

Das Wort Bionik ist ein Kunstwort und kombiniert die Begriffe **Biologie** und **Technik**. Als Wissenschaft beschäftigt sich die Bionik mit der Entschlüsselung von Erfindungen der Natur und ihre Umsetzung in die Technik. Im Design war die Gestaltung nach biologischen Vorbildern in der Vergangenheit weitestgehend einzelnen Designern vorbehalten.

Naturformen wirken auf den ersten Blick teilweise beliebig oder gar chaotisch, scheinbar keinem Ordnungsprinzip folgend gestaltet. Bei genauerer Betrachtung folgen sie in der Regel aber konstruktiven Gesetzen, z.B. der Statik und/oder Dynamik. Ferner gehen diese Formen oft auch mit einer beeindruckenden Materialökonomie einher, die auf maximale Effizienz ausgelegt ist.

So genügt beispielsweise ein menschlicher Knochen nicht nur statischen Anforderungen, sondern ermöglicht zudem durch die „Konstruktion“ seiner Gelenke die Fortbewegung des Menschen. Die bei näherer Betrachtung wie geschäumt anmutende, innere Struktur des Knochens, sorgt hierbei gleichzeitig für weniger Gewicht.



Abb. 11: Schnitt durch einen Knochen und Detailaufnahme eines Blattes

Auch die Blattstrukturen von Laubblättern folgen ähnlichen Gestaltungsprinzipien. Die linear freie Anordnung der Blattadern versorgt zum einen den Baum mit für den Stoffwechsel und das Wachstum notwendigen Wasser und stabilisiert gleichzeitig die im Verhältnis zur Blattdicke relativ große Oberfläche, die es dem Baum ermöglicht, genügend für den Stoffwechsel notwendiges Sonnenlicht aufzunehmen.

Allen gemein ist, dass kein Blatt mit dem anderen 100% identisch ist, eine „serielle“ Reproduktion in technischem Sinne nicht stattfindet. Jede Form ist zu 100% individuell. Diese der Natur vorbehaltenen Besonderheit, lässt sich auf ein industriell gefertigtes Serienprodukt daher auch nur schwer übertragen.

Die bekannteste und bereits auch mehrfach erfolgreich kopierte, in der Natur vorkommende Form ist die Bienenwabe. Ähnlich einer geschäumten Struktur weist eine Bienenwabe sehr hohe mechanische Festigkeiten bei sehr geringen Wandstärken und

minimalem Materialeinsatz auf. Allerdings stellt eine hexagonale Wabenstruktur kein gestalterisches Alleinstellungsmerkmal mehr dar.



Abb. 12: Bienenwabe und rosso acoustic® CP30 Space Divider von nimbus group ; PLA Hexagonalwabe von Econcore

Schaumstrukturen bieten hier einen weiteren möglichen Ansatzpunkt. Beim Schäumen entstehen feine Gasbläschen, die durch feste oder flüssige Wände (je nach geschäumtem Material) getrennt sind. Auch wenn das äußere Volumen gleich ist, hat jedes Gasbläschen doch ein anders Aussehen und/oder Volumen.

Offenporige Schaumstrukturen, mit oder ohne absorbierenden Deckschichten oder geschlossen porige Schaumstrukturen mit absorbierenden Deckschichten bieten grundsätzlich mögliche, technische und gestalterische Ansatzpunkte.

Der Vorteil von offenporigen Schäumen liegt darin, dass diese schallabsorbierend wirken und dass, je nach akustischen Anforderungen, evtl. auf weitere akustische Maßnahmen, wie z. B. akustisch wirksame Deckschichten, verzichtet werden kann.

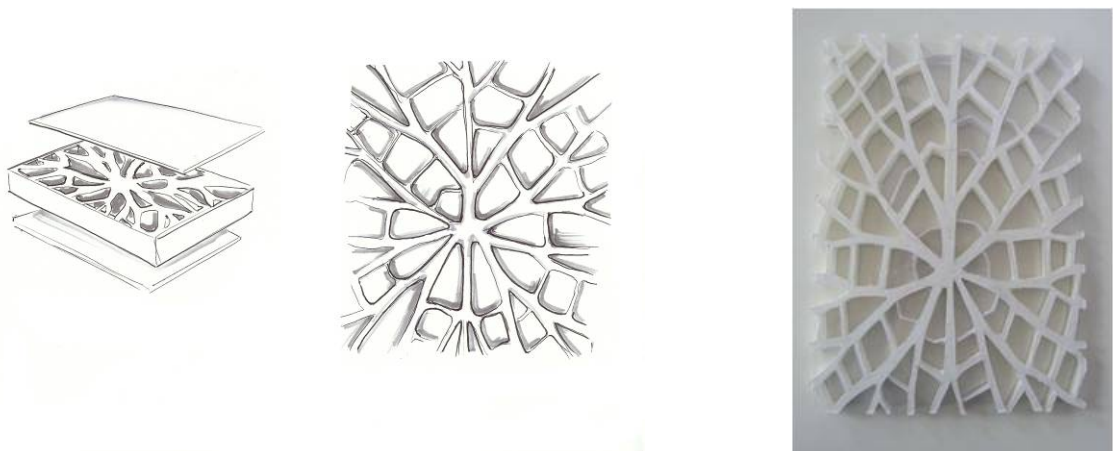


Abb. 13: Studien von tragenden Kernstrukturen in Anlehnung an Blattadern, Demonstrator mit Kern und mikroperforierten Foliendeckschichten.

Prinzipiell bieten organisch anmutende (Kern-)Strukturen produktsprachliche Ansätze, visuell inhaltlich auf das Thema „Bio“ hinzuweisen. Weiche, organische Formen, bzw. Formübergänge, Vermeidung von geraden, rechteckigen Gestaltungselementen und/oder assoziative Gestaltungsmerkmale (Äste, Blätter, Knochen, o.ä.) können einen entsprechenden Bezug herstellen und die visuelle Botschaft „Bio Design“ vermitteln. Das „Bio Design“ war häufig geprägt von meist rein vordergründig visuellen Botschaften. Die Produkte waren stark von ihrer Materialität geprägt, „Jute statt Plastik“ wurde in gewisser Weise zu einem gestalterischen Credo. Die ästhetischen Gesichtspunkte unter denen die Produkte gestaltet waren, brachen zum Teil bewusst mit bekannten „Regeln“. Die Akzeptanz der Produkte war daher auch zunächst nur stark in einer bestimmten Gesellschaftsschicht vorhanden. Produktsprachlich besaßen diese Produkte damit auch eine gewisse Symbolkraft, die für eine bestimmte (politische) Haltung stand und vielleicht auch oder gerade deshalb eine breitere Akzeptanz und marktwirtschaftliche Verbreitung verhindert hat. Wie viel „visuelles Bio“ das Design des Raumteilers bekommen sollte, war daher immer wieder Diskussionsthema.

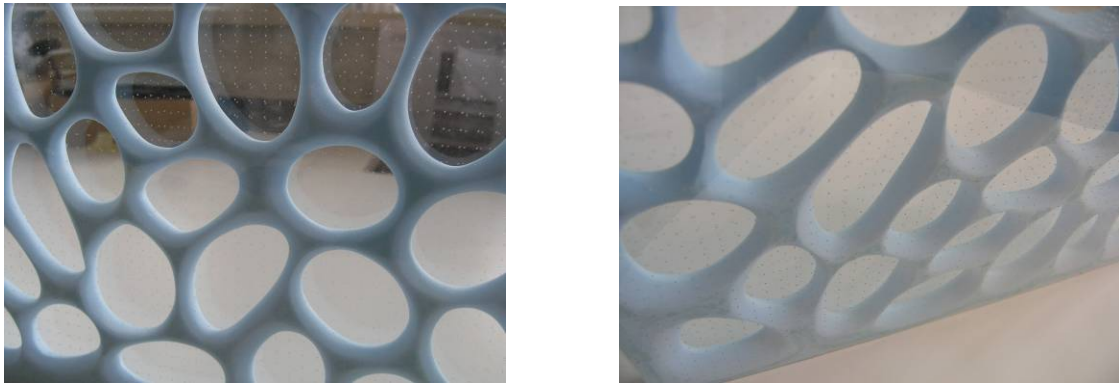


Abb. 14: Studie einer organischen (z.B. geschäumte) Kernstruktur mit transparenten, mikroperforierten Foliendeckschichten.

3.2.2 Gestaltungsideen

1.) Idee: Schaumstruktur im Sandwichkern

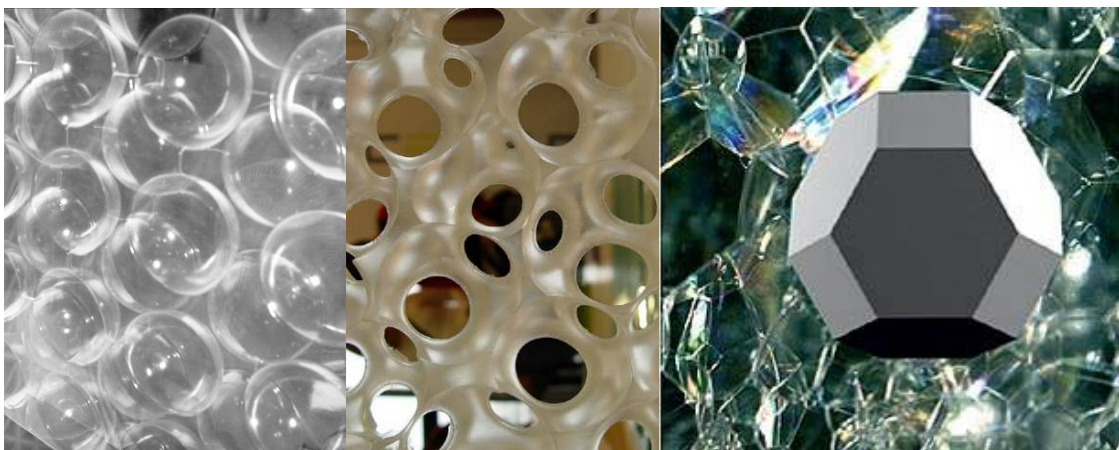


Abb. 15: Tiefziehstruktur ©ITKE; Prada Shop © OMA/ Rem Koolhaas; Seifenschaum

2.) Idee: Faltung im Sandwichkern

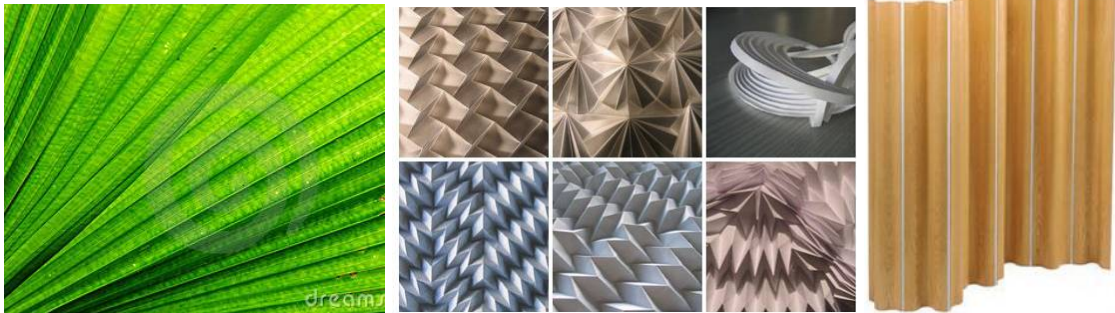


Abb. 16: Palmenblatt; Papierfaltungen; Raumteiler ©vitra

3.) Idee: Klebeverbundstruktur/ Verstrecken



Abb. 17: Leim zieht Fäden; Clear PEP®, Design Composite/A ©stylepark

4. Idee: Tiefgezogene 3D-Struktur



Abb. 18: 1.) + 2.) © Handte ILG Lasertechnik GmbH; 3.) © ITKE

5. Idee: Voronoi-Strukturen

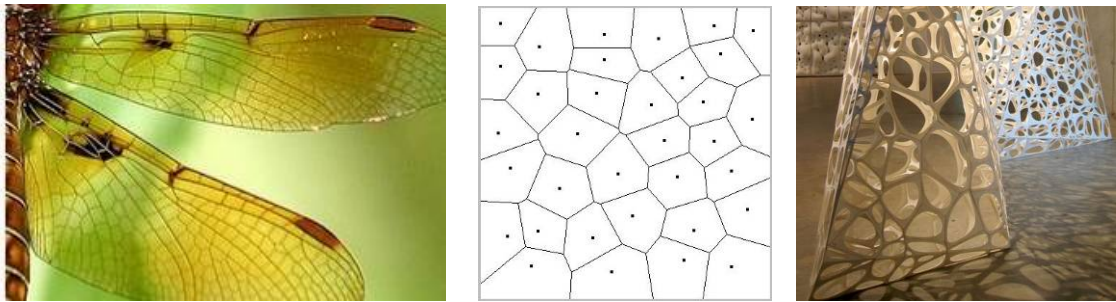


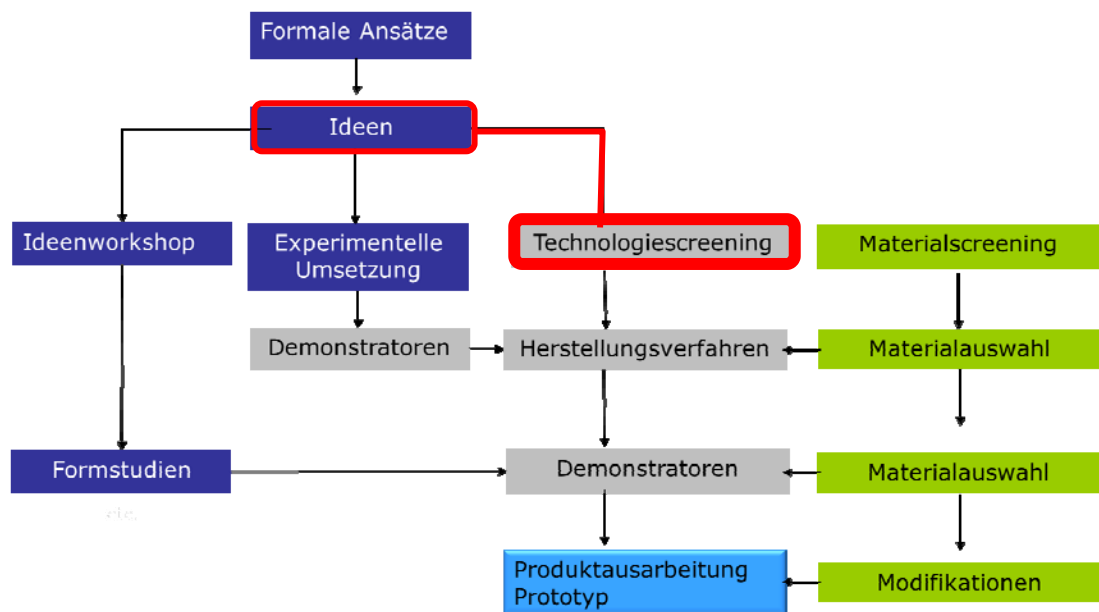
Abb. 19: Schmetterlingsflügel; Voronoi;

6. Idee: Naturfaser-Gewirr



Abb. 20: 1.) Colbond/ NL; 2.) Lumicor/ USA; Bilder: Stylepark; 3.) Naturfaser/PLA-Sandwichplatte, Köhler/©ITKE

3.3 Technologiescreening zur Realisierung der Ideen



Im Technologiescreening wurde nach Herstellungsverfahren und Technologien zur Umsetzung der in 3.2 dargestellten Ideen recherchiert.

3.3.1 Umsetzung der Idee „Schaumstruktur“ – Retikulierte Schäume

Das Retikulieren stellt eine Nachbehandlung von Schaumstoffen dar, mit dem Ziel, eine Flüssigkeits-, Luft- bzw. Gasdurchlässigkeit zu erreichen. Beim Retikulieren werden die bei der Produktion entstehenden dünnen „Häutchen“ zwischen den einzelnen Schaumstoffzellen, welche das Produkt luftundurchlässig machen, zerstört⁵.

Retikulieren bedeutet, dass man die Schaumqualität mit Wasserstoff anreichert, danach Sauerstoff zuführt und im Reaktor eine Explosion herbeiführt, die die Schaumstoffzellwände nahezu vollständig öffnet und nur ein Gerüst übrig lässt.⁶

Die retikulierten Schäume können dann mittels einer Pulverbeschichtung im Ofen gehärtet werden (z.B. m-Pore).

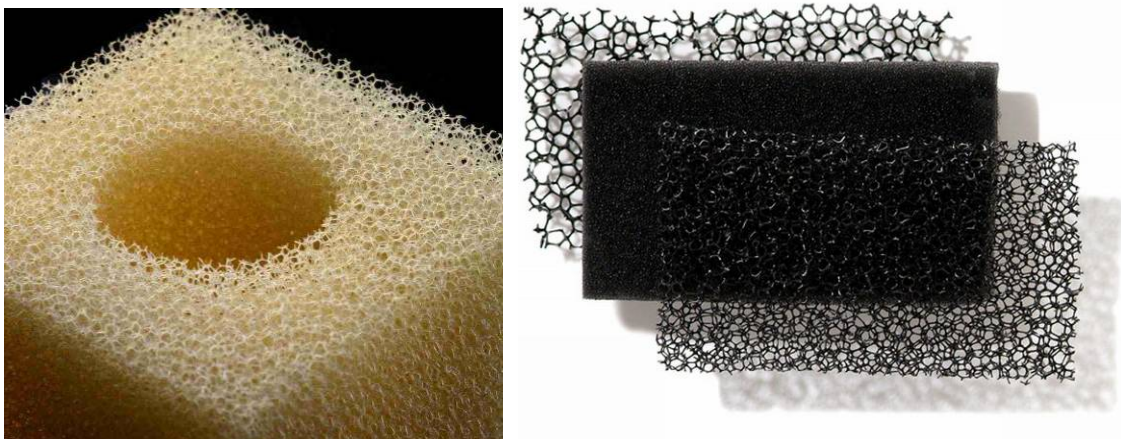


Abb. 21: Filterschaum: 1.) ©RHB Industrieausrüstungen oHG; 2.) © Modulor

Vorteile:

- Realisierung der Idee „Schaumstruktur“

Nachteile und Herausforderungen:

- Ausgangsprodukt vor dem Retikulieren wäre ein biobasierter PU-Schaum. Die Polyol-Komponente eines PU-Systems lässt sich mittlerweile aus bis zu 100% nachwachsenden Rohstoffen (meist Rizinusöl) herstellen. Die Isocyanat-Komponente dahingegen ist weiterhin erdölbasiert. Der Bioanteil des Schaumes beträgt zwischen 20 und ca. 50%.
- In den Monaten Januar bis März 2010 konnte kein entsprechendes Halbzeug – eine Bio-PU-Schaumplatte – ausfindig gemacht werden.

- Biobasierte Polyole sind auf dem Markt verfügbar (z.B. Lupranol Balance/ BASF; Merginol / Hobum Oleochemicals). Die Verarbeitung zu geschäumten Platten erfolgt nur in großtechnischem Maßstab ab. (Diese Mindestmenge kann im Rahmen des Projektes nicht erreicht werden.)

3.3.2 Umsetzung der Idee „Naturfasergewirr“ – Polymere Wirrgelege



Abb. 22: Dreidimensionale Erosionsschutzmatten von Colbond

Hintergrund der Kontaktaufnahme mit der Firma Colbond/NL war die Idee, im Kern der Sandwichplatte ein dreidimensionales Polymergewirr zu platzieren. Die dreidimensionalen Strukturgewebe werden im Erosionsschutz eingesetzt.

Herstellung: aus dem Extruder wird ein Filament aus Polyamid (Thermoplast) auf eine Form (Pyramide, V-Struktur, U-Struktur) gespritzt. Eine Deckschicht kann angesponnen werden.

Verwendung von Biokunststoffen

Die Verwendung eines thermoplastischen, auch transparenten Biokunststoffes sowie die Herstellung eines anderen Formwerkzeuges wären möglich.⁷ Die Herstellung ist ein kontinuierlicher Prozess. Es müssten mindestens 10.000 m² abgenommen werden, da die Maschinen aufgrund ihrer Größe mehrere 100 Kilogramm Granulat benötigen. Der finanzielle Ausgleich der Produktionsausfälle für einen Test mit Biokunststoff müssten entrichtet werden.

3.3.3 Umsetzung der Idee „tiefgezogene 3D-Struktur“ – kontinuierliches Stanzfaltverfahren

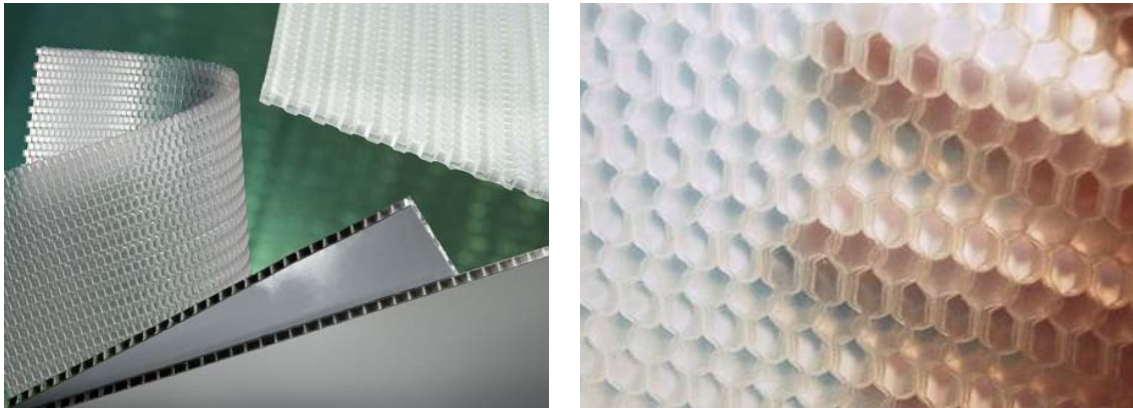


Abb. 23: Sandwichplatten aus PLA ©Econcore NV; ThermHex Waben Econcore

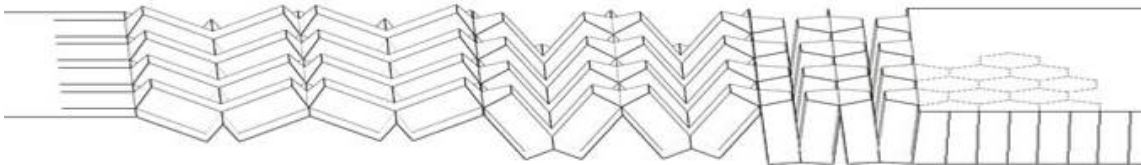


Abb. 24: Stanzfaltverfahren; ©Thermhex

Das Verfahren der Firma Econcore NV aus Belgien, ermöglicht die kontinuierliche Wabenkernproduktion. Deutscher Lizenznehmer ist die Firma Thermhex.

Vorteile:

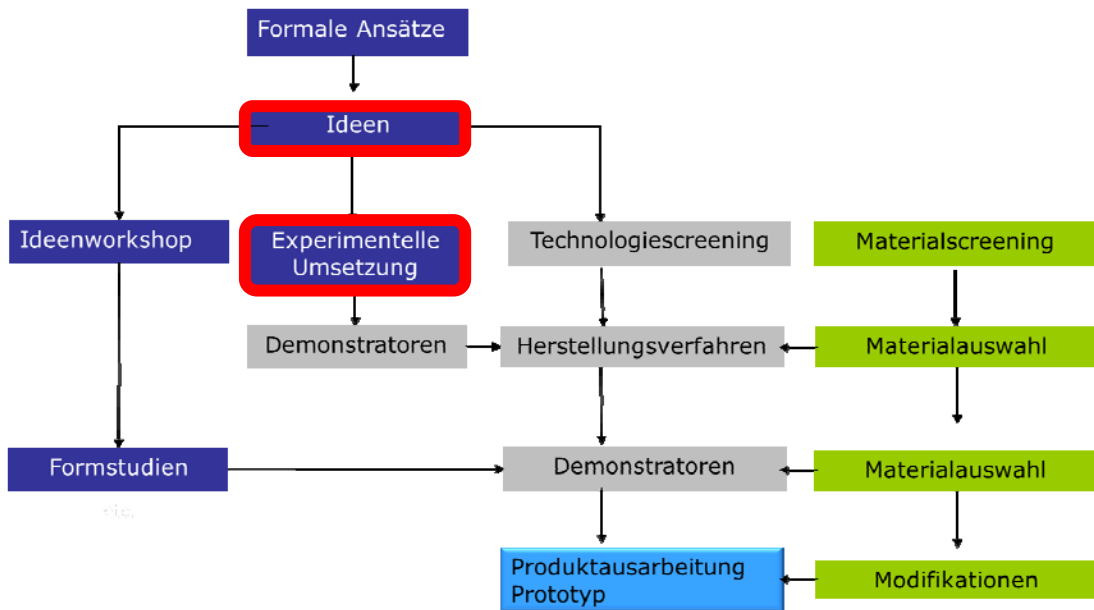
- Die Wabenplatten sind bereits aus dem Biokunststoff Polylactid verfügbar. Die Dauergebrauchstemperatur liegt jedoch bei ca. 50°C
- Die Herstellungskosten betragen ca. 45,- €/ m²

Nachteile:

- Die Geometrie und Dicke sind werkzeuggebunden. Es konnte keine eigene Geometrie entwickelt werden, da eine andere Struktur auch neue Stanzwalzen etc. erfordern würden.
- Die Wabenplatten mit Deckschichten erfüllen nicht die hohen ästhetischen Anforderungen des Projektpartners nimbus.
- Unklar ist des Weiteren, ob das Stanzfalten auch mit mikroperforierten Folien durchgeführt werden kann. Bei der Durchführung eines Testes müssten mindestens 3000 m² abgenommen werden.

3.3.4 Experimentelle Umsetzung der Idee „Schaumstruktur“

Hintergrund der experimentellen Umsetzung war der Versuch, kontinuierliche Fertigungsverfahren ableiten zu können.



Experimentelle Umsetzung der Idee Schaumstruktur

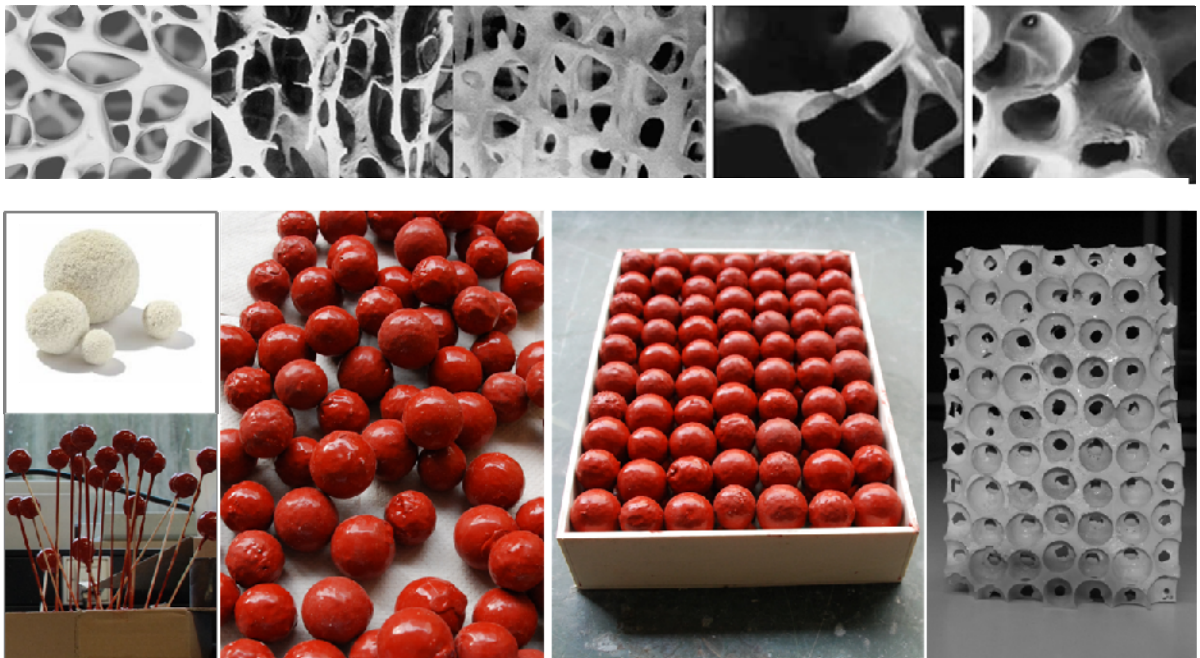


Abb. 25: Experimentelle Herstellung des Demonstrators „Schaumstruktur“

Weichgummibälle wurden mit Silikon beschichtet und in Gießformen verteilt.

Gussformen wurden mit duroplastischem Bio-Harz gefüllt.

Vorteile:

- Realisierung der Idee „Schaum-/ Knochenstruktur“

Nachteile und Probleme:

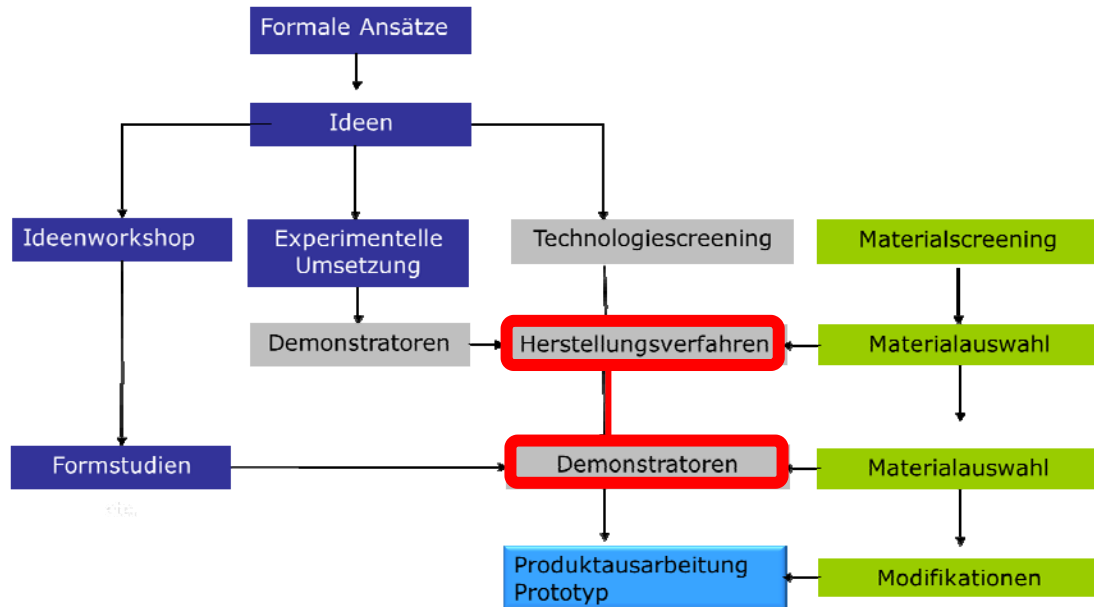
- Die verwendeten heiß härtenden Bioharze sind aufgrund ihrer Pflanzenölbasis gelblich transparent. Auch die Einfärbung mit weißen Pigmenten und optischen Aufhellern führten nicht zu gewünschtem Ergebnis.
Nachteil war zudem, dass die Aushärtung ca. 40 Minuten benötigt. Die Oberflächen sind dennoch leicht klebrig.
- Kalt härtende biobasierte Harze (z.B. Biothan/Biodur von Bioresin) kosten als Gebinde ca. 80-110,- €/kg. Diese Harze sind farblos und transparent.
- Die gefertigten Musterstücke waren sehr schwer:
→ Es konnte kein kontinuierliches, wirtschaftliches Verfahren abgeleitet werden.

3.4 Ausgewählte Herstellungsverfahren und Demonstratoren

Folgende Herstellungs- und Verarbeitungsverfahren wurden näher untersucht:

- Sandwichbauweise
- Twin-Sheet-Verfahren
- Tiefziehen
- Verstrecken
- Falten
- Extrusion
- Schäumen
- Spritzguss

Diesbezüglich wurden entsprechende Firmen kontaktiert und die Realisierung der formalen Gestaltungsansätze als Demonstrator eruiert und diskutiert.



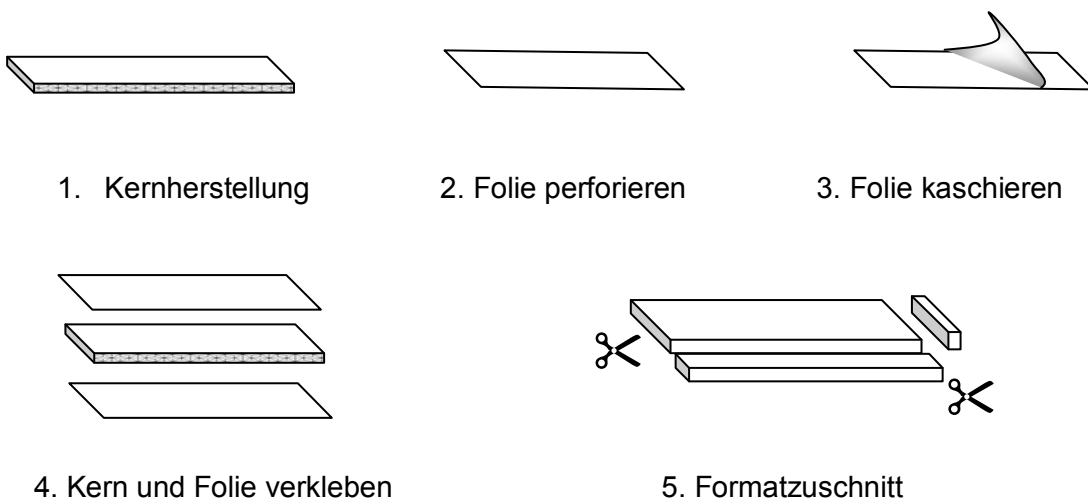
3.4.1 Sandwichbauweise

Als Sandwichbauweise bezeichnet man einen Werkstoff, der aus mehreren Schichten aufgebaut ist. Diese Schichten haben i. d. R. unterschiedliche Eigenschaften. Die Sandwichbauweise findet vor allem im Leichtbau Anwendung. Als Kernmaterial dient hier häufig ein leichter Wabenkern (z. B. Papier, Schaum, Balsaholz o.ä.), der mit Kraft aufnehmenden Decklagen (Zug- und / oder Druckkräfte) fest verbunden wird.

Der rossoacoustic® CP30 Space Divider besteht beispielsweise aus einer ultraleichten, speziell gewobenen PETG-Wabe und Foliendeckschichten aus mikroperforierter Folie, die in einem speziell entwickelten Klebeverfahren aufgebracht werden.

Fertigungsabläufe:

Der rossoacoustic® CP30 Space Divider wird in folgenden Arbeitsschritten hergestellt (vereinfachte Darstellung)



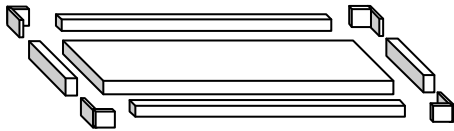
1. Kernherstellung

2. Folie perforieren

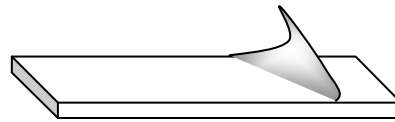
3. Folie kaschieren

4. Kern und Folie verkleben

5. Formatzuschnitt



6. Ecken und Kanten einbringen



7. Endformat dekaschieren

Gestaltungsansätze:

Für einen Demonstrator wurden die bisherigen, erdölbasierten Folien durch Biofolien ersetzt. Der Produktionsprozess blieb dabei unverändert. Die viereckige Wabenstruktur von CP30 zitiert nur den konstruktiven Aufbau (Dünnwandigkeit der Membranen) einer Bienenwabe und ist formal eigenständig. Eine Umsetzung in biobasierten Kunststoffen wurde mit Folien aus Cellulosetriacetat (CTA) umgesetzt.

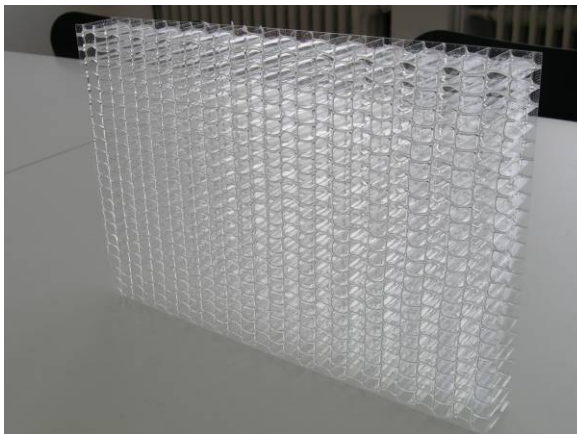


Abb. 26: Wabenstruktur und mikroperforierte Deckschichten aus Cellulosetriacetat Folien

3.4.2 Twin-sheet-Verfahren

Firma: Die Firma Hombach Kunststofftechnik⁸ aus Uehlfeld ermöglichte uns die nähere Betrachtung des Twin-Sheet-Verfahrens (Herstellerbesuch) sowie die Herstellung eines Demonstrators aus Polylactid.

Verfahren: Während beim Thermoformen ein Platte erhitzt und anschließend unter Vakuum umgeformt wird, geschieht das im Twin-Sheet Prozess mit zwei Platten.

Dabei entstehen zumeist Hohlkörper, die entweder tankähnlich ausgebildet werden (mittels zweier Negativ-Werkzeuge) oder auch als Gehäuse ähnliche Produkte, bei denen eine Formhälfte negativ, die zweite Platte positiv, also in Richtung der ersten Platte geformt wird.



Abb. 27: Bremsflüssigkeitsbehälter (Twin-sheet); © Hombach Kunststofftechnik



Abb. 28: Herstellung mittels Twin-Sheet: 1. Palette; 2. Gehäuse MRT; © Hombach

Das Verfahren läuft folgendermaßen ab (Europäische Version):

1. Schritt: Im ersten Produktionsschritt erfolgt das Einbringen von zwei Platten in die Maschine. Dort werden diese fest eingespannt und mittels Heizelementen erhitzt.

2. Schritt: Erreicht das Material die nötige Umformtemperatur, fahren die Heizungen zur Seite und zwei Formhälften fahren in das weiche Kunststoffmaterial hinein. Dabei wird gleichzeitig ein Vakuum zwischen Kunststoff und Form erzeugt. Dies führt zur

Ausformung des Bauteils. Da im gleichen Prozessschritt auch die beiden Werkzeughälften zusammen gepresst werden, entsteht aus den beiden Halbschalen, nur mittels Druck und vorher eingebrachter Hitze, ein Hohlkörper (Twin-Sheet Teil).

3. Schritt: Nun kühlt das Bauteil innerhalb des Werkzeuges ab. Dies kann, sofern gewünscht, mittels "Luftspülung" durch den Hohlraum beschleunigt werden.

4. Schritt: Ist der Kunststoff soweit erstarrt, um entformt werden zu können, fahren die beiden Werkzeughälften auseinander und das Rohteil kann entnommen werden. Im Anschluss an diesen Fertigungsschritt erfolgt zumeist eine weitere Bearbeitung (z.B. durch CNC-Konturfräsen).

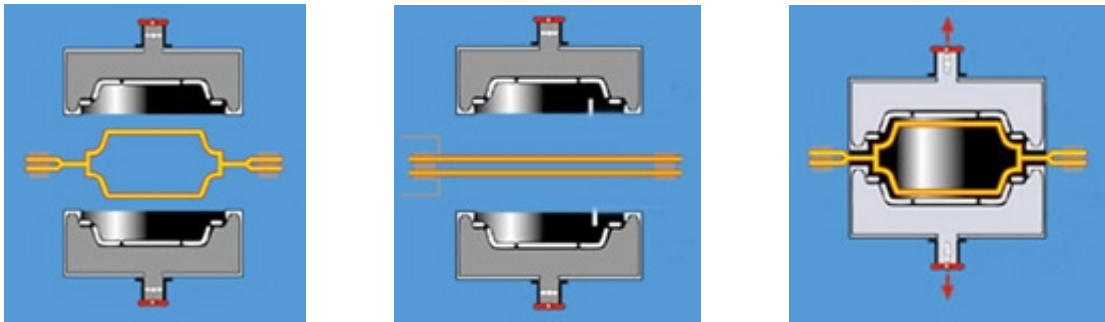


Abb. 29: Twin-Sheet-Verfahren © Hombach Kunststofftechnik

Demonstratoren:

Da es sich beim Twin-Sheet Verfahren um eine Variante des Tiefziehverfahrens handelt, bei dem das Verformen mikroperforierter Folien oder Platten nicht möglich ist (die Perforation verhindert, dass die Folien/Platten in die Form angesaugt werden können), muss das Produkt aus einem unperforierten (und somit schallharten) Kern und zwei mikroperforierten Deckschichten bestehen, die nachträglich aufgebracht werden. Dies geschieht in der Regel über ein Hot-melt-Verfahren.

Die maximal mögliche Modul-Größe, die mit diesem Verfahren zu erreichen ist, beträgt aufgrund der Beschränkung der Werkzeuggröße 1000 mm x 1500 mm.

Für die Beurteilung des Twin-Sheet Verfahrens wurde ein Versuch mit der Fa. Hombach Kunststofftechnik realisiert, der auf einer bestehenden pyramidalen Kernstruktur basiert, um die technischen Grundvoraussetzungen zu prüfen. Die getestete Variante aus PLA hatte lediglich eine Höhe von ca. 8 mm.

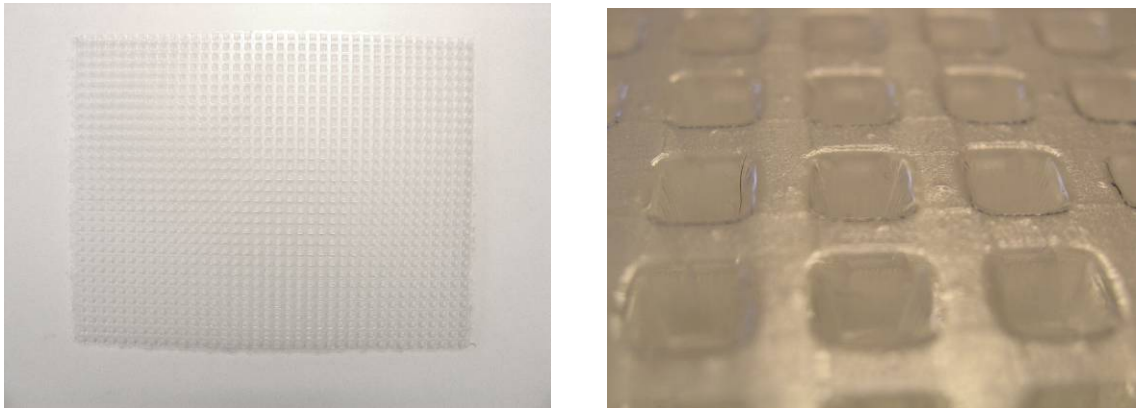


Abb. 30: Twin - Sheet Demonstrator aus PLA, Bilder: nimbus group

Es wurden weitere Versuche mit höheren Kernstrukturen, aus Ermangelung an ausreichend dickem Grundmaterial aus PETG bzw. ABS, gefertigt. Die Foliendeckschichten sind aus mikroperforiertem CTA und wurden mittels eines Hotmelts auf die Kerne aufgetragen. Kern und Deckschichten können nicht, auf die Materialdicke bezogen, mit demselben Ausgangsmaterial bezogen werden. Die angestrebte Modulhöhe von 30 bis 40 mm bedingt ein mindestens 1 mm dickes Ausgangsmaterial, die Foliendeckschichten sollten idealerweise ca. 0,4 bis 0,5 mm dick sein, um eine möglichst effiziente Wirkung der Mikroperforation zu erreichen.

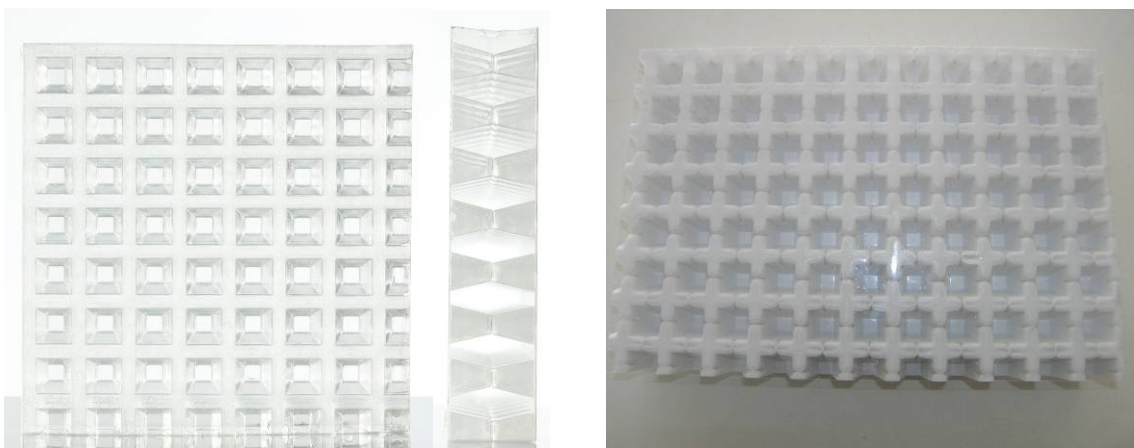
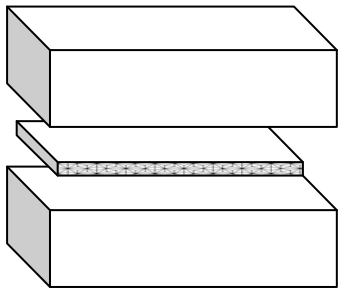


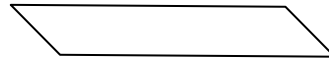
Abb. 31: Demonstratoren aus PETG und ABS mit mikroperforierten Foliendeckschichten. Bild links: ITKE, Bild rechts: nimbus group

Die Variantenvielfalt bei den Kernstrukturen reicht von organisch anmutenden bis zu geometrisch, symmetrischen Gestaltungsansätzen. Bei der Formgebung des Kerns ist lediglich darauf zu achten, dass die Zellengrößen- und Höhen in einem ausgewogenen Verhältnis stehen, die Zellen möglichst gleich tief sind und dass die Verbindungsflächen der beiden Halbschalen nicht zu groß ausfallen.

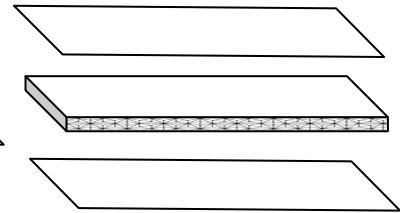
Fertigungsabläufe:



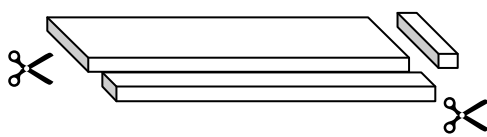
1. Kern ziehen



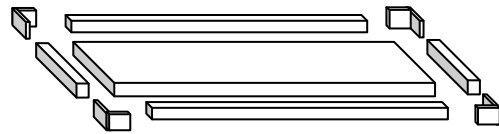
2. Folie perforieren



3. Kern und Folie verkleben



4. Formatzuschnitt



5. Ecken und Kanten einkleben

Beim Twin-Sheet Verfahren der Fa. Hombach wurden die Foliendeckschichten mittels eines Hotmelt-Verfahrens mit dem Kern verklebt, was ohne vorherige Kaschierung der Folien erfolgte.

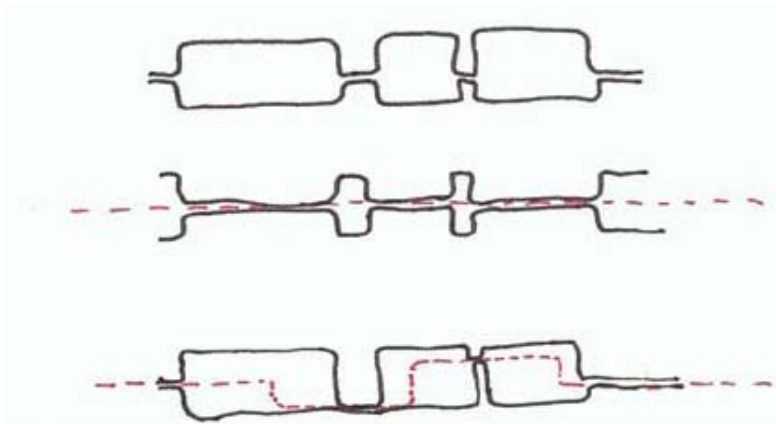


Abb. 32: Querschnitt – Twin Sheet-Profil; Skizze: nimbus group

Die obere Skizze zeigt ein sehr gut realisierbares Profil beide Formhalbschalen zu verbinden, die Abbildung darunter ein Profil, das wegen seiner zu großen Verbindungsflächen und der zum Teil ungünstigen Höhen- und Breitenverhältnisse (zu schmal und zu hoch), zu optischen und technischen Problemen führen kann. Auch unterschiedliche Höhenniveaus der Verbindungsstege sind realisierbar.

Gestaltungsansätze:

Die Nachfolgenden Abbildungen zeigen einige Studien zu technisch umsetzbaren Kernstrukturen.

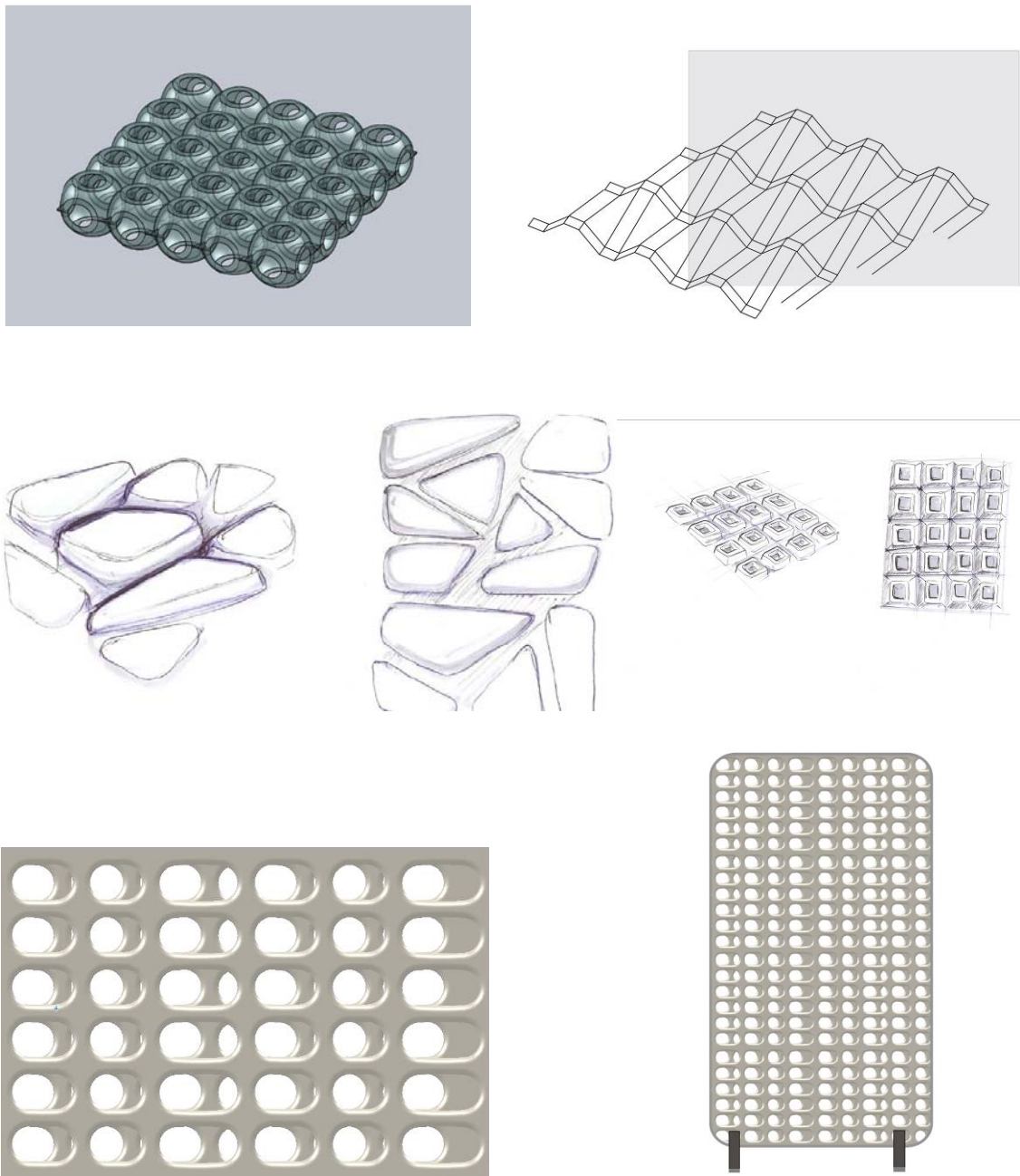


Abb. 33: Realisierbare Ideen im Twin-Sheet- Verfahren © nimbus group

Designkriterien:

Beim Entwerfen einer Sandwichstruktur, die mittels Twin-Sheet produziert werden soll, müssen folgenden Gestaltungskriterien beachtet werden.

- Das Verhältnis Kammerbreite zu Kammerhöhe sollte 1:1 sein. Besser wäre breit als hoch. In der Geometrie ist man dann weitgehend flexibel.

- Flache Winkel und Radien sind vorteilhafter in Bezug auf das Fließverhalten der Folie.
- Innerhalb einer Seite kann es auch einen Wechsel der Geometrie geben, (z.B. von quadratisch zu rund).
- Form und Höhe der Ober- und Unterschale kann verschieden sein. Auch die Schweißebene kann springen.
- Ober- und Unterteil können unterschiedlich konzipiert werden (z.B. Fahrradhelm).

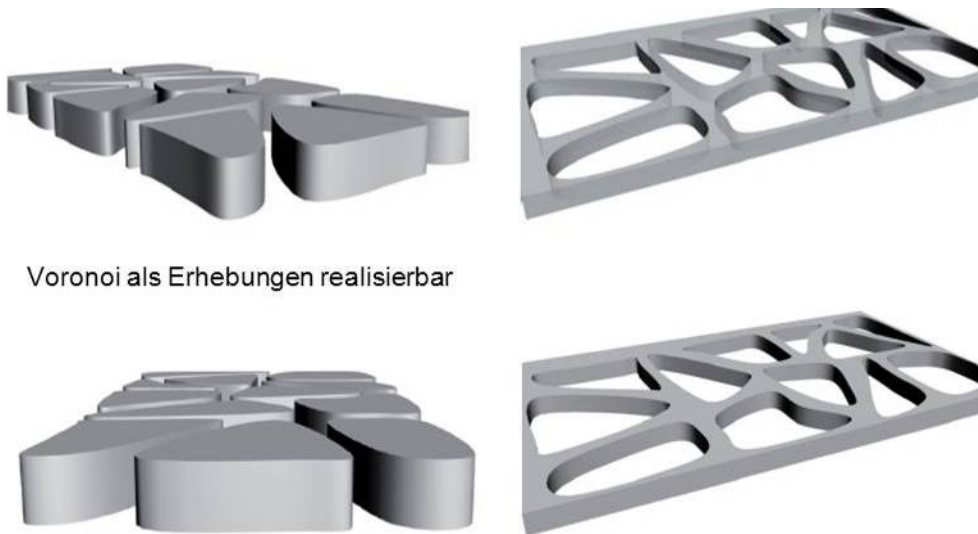


Abb. 34: Realisierungsmöglichkeit Voronoistrukturen mittels Twin-Sheet – Nachteilig sind hier zu viele Kontaktflächen mit den Deckfolien (zu viele Klebeflächen); © ITKE

Die Werkzeugkosten sind mit der Herstellung von Spritzgusswerkzeugen vergleichbar.

Vorteile:

- Bei der Entwicklung von neuen Formwerkzeugen ist man hinsichtlich anderer Geometrien weitestgehend flexibel. Es könnten viele Gestaltungsansätze realisiert werden.
- Das Einlegen von Inserts (Rahmenstrukturen, Verbindungselemente, etc.) in die Werkzeugform ist möglich. So könnten auch andere Funktionen z.B. LEDs integriert werden.
- Das Verfahren ermöglicht die Herstellung großer Bauteile (z.B. Gehäuse Computertomograph). Ein Plattenformat von 100x150 cm wäre möglich.
- Die Taktzeit pro Platte würde bei 40-50 Sekunden liegen.
- Die Permeabilität von PLA und Cellulosederivaten kann ein Aufblähen, bzw. Zusammenfallen des Hohlkörpers verhindern. Die Permeabilität für Sauerstoff

und CO₂ liegt bei Biofolien höher als bei PET und PMMA.

Nachteile:

- Bei großflächigem Auftragen des PU-Hotmelts zur Aufbringung der perforierten Deckschichten kann es zur Bläschenbildung kommen.
- Folienstärke in Deckschicht und Kern sind nicht gleich: Materialstärken der Deckfolien sollten max. 250µm betragen. Da die Materialstärke beim thermischen Umformen unter Vakuum nicht gleich bleibt, muss hier je nach Sandwichkerngeometrie eine Folienstärke von 500-1000 µm gewählt werden.

Die akustische Wirksamkeit des von der Firma Hombach Kunststofftechnik realisierten Demonstrators (vorhandenes Werkzeug) aus Polylactid, wurden im Kundt'schen Rohr am Fraunhofer Institut Bauphysik getestet (**siehe 3.6.3. Messungen im Kundt'schen Rohr**).

Aufgrund seiner geringen akustischen Wirksamkeit wurde das Verfahren nicht weiter betrachtet. Mit Hilfe des Twin-sheet-Verfahrens werden geschlossene Hohlkörper erzielt. Der Schall geht dann direkt zurück. Daher müssten die Sandwichplatten dicker ausgeführt werden, als bei einem offenen Kern, um mehr Raum zwischen Deckschicht und Sandwichkern zu schaffen.

3.4.3 Tiefziehen

Auch beim Tiefziehen ist ein Kern aus mikroperforierten Folien oder Platten nicht möglich. Eine Mikroperforation müsste nachträglich angebracht werden. Versuche mit vor dem Tiefziehvorgang perforierten Folien, verliefen nicht zufriedenstellend. Bei ersten Versuchen verklebte die Kaschierfolie mit der Folie, welche sich nicht mehr/sehr schlecht entfernen ließ. Zwar lassen sich die Löcher der Perforation mittels einer tiefziehfähigen Kaschierfolie abdecken, damit das zur Formgebung notwendige Vakuum zwischen Folie und Form entstehen kann. Die Perforation verzieht sich jedoch beim Ziehvorgang, was zu ungewollten Beeinträchtigungen der Absorptionsfähigkeit führen kann, da die Löcher zu groß werden.

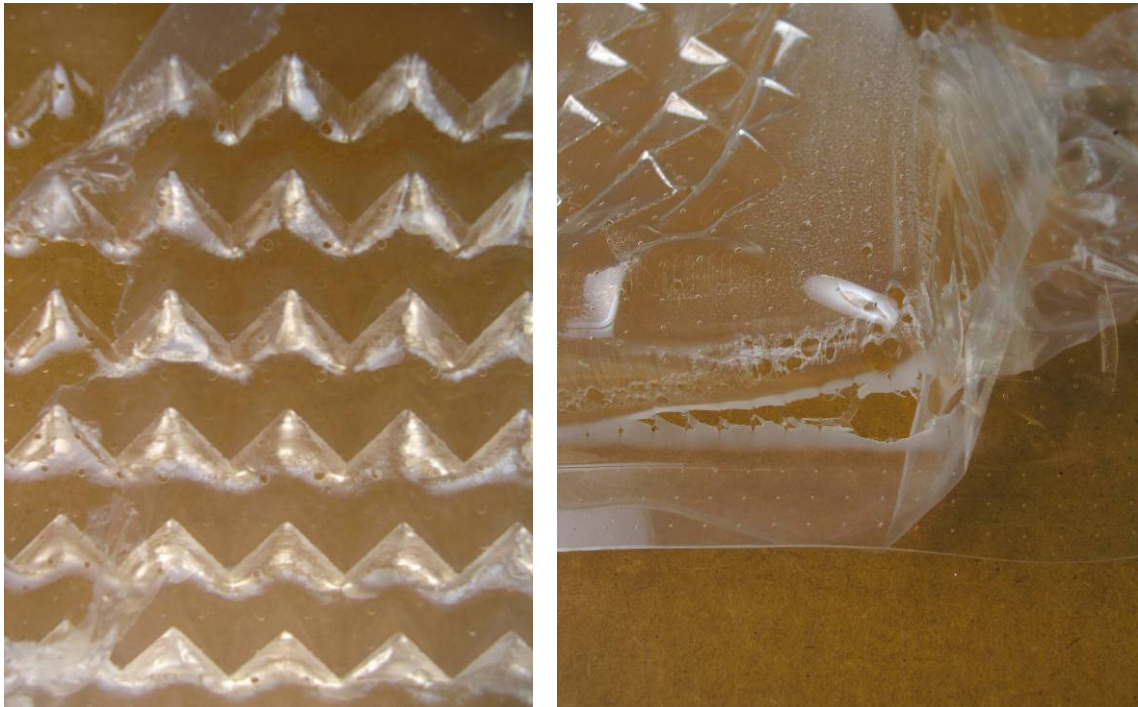
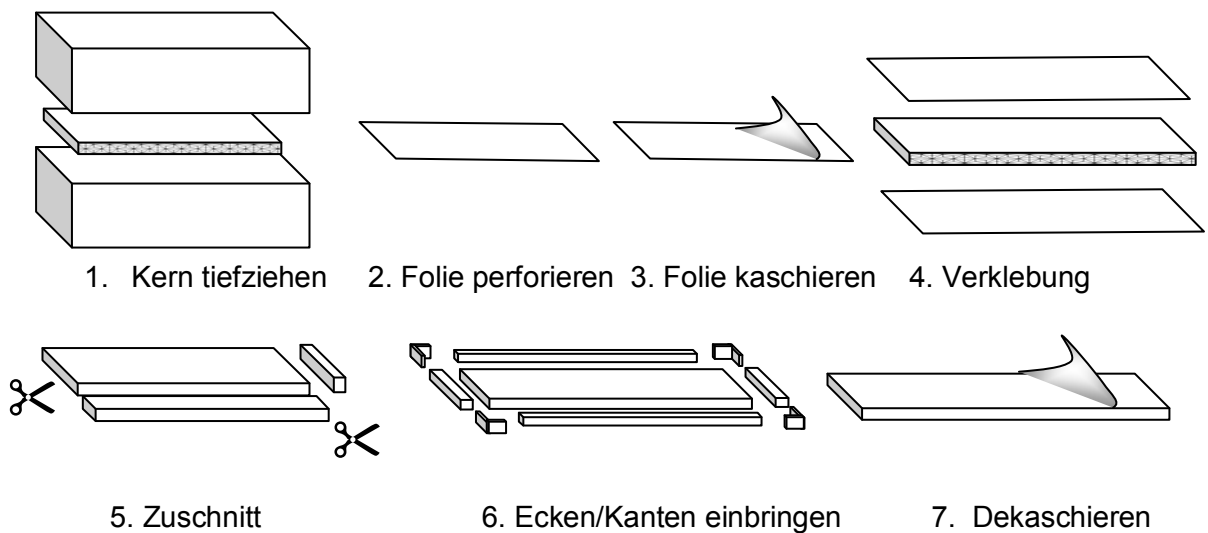


Abb. 35: Nach dem Tiefziehvorgang verformte, geweitete Mikroperforation (links), festklebende Kaschierfolie (rechts); Bilder: ©nimbus group

Fertigungsabläufe:

Ein mögliches Fertigungsszenario ist, einen tiefgezogenen Kern mit mikroperforierten Deckschichten zu kombinieren.



Gestaltungsansätze:

Erste Studien in Richtung Modulwand in finaler Größe, erschienen optisch vielversprechend. Auch hier ließen sich naturorientierte Motive umsetzen. Das Thema „Welle“ stand hier formal im Vordergrund. Untersucht wurde, ob die Wellenstruktur der Oberfläche evtl. zusätzlich wie ein Diffusor wirken könnte. Zudem greift das Thema Welle visuell sowohl das Thema Akustik auf, als es auch assoziative Interpretationen zum Thema Natur zulässt.

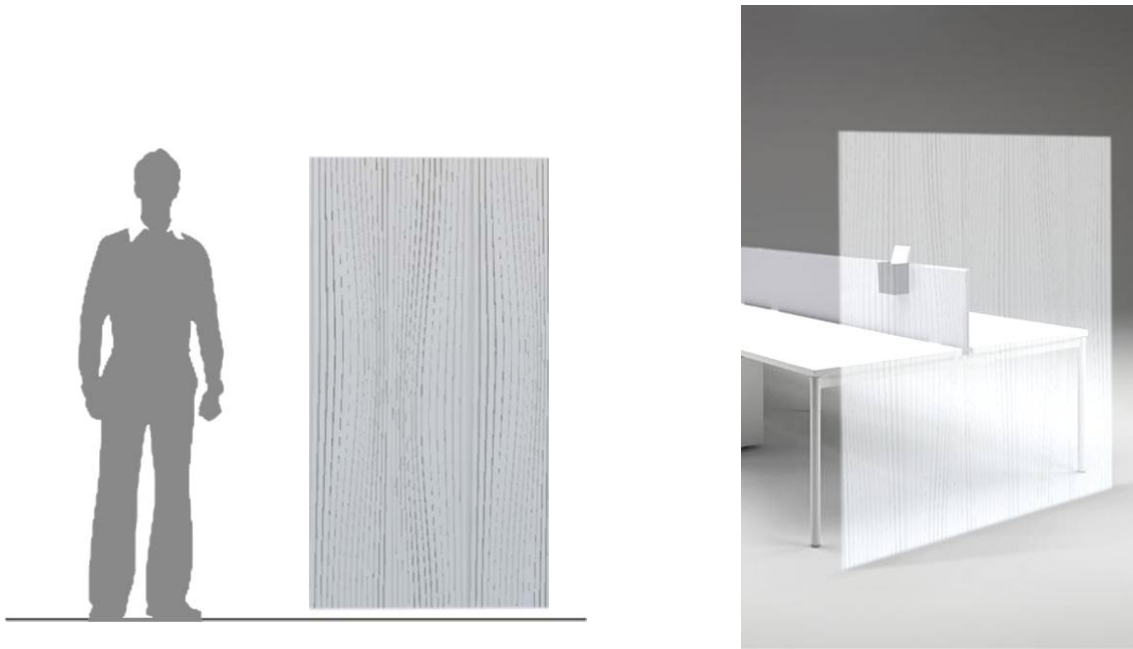


Abb. 36: tiefgezogene Wellenstruktur in finaler Modulgröße; Anwendungsbeispiel

Modulgrößen in finalen Maßen von ca. 1600 mm x 900 mm sind nachträglich sehr aufwendig zu perforieren, was zu hohen Produktionskosten führen würde.

Kleinere Modulgrößen könnten evtl. aus zwei kleineren, tiefgezogenen Halbschalen bestehen, die nach dem Tiefziehen miteinander verklebt/verschweißt werden. Bei dieser Methode könnte auf die separate Fertigung eines tragenden/stützenden Kerns evtl. komplett verzichtet werden. Auch hier müsste die Perforation nachträglich angebracht werden. Die hierfür in Frage kommenden Methoden der spanenden Nachbearbeitung (Perforation bohren oder fräsen) oder Lasern, sind jedoch sehr (zeit)-aufwendig im Fertigungsprozess.

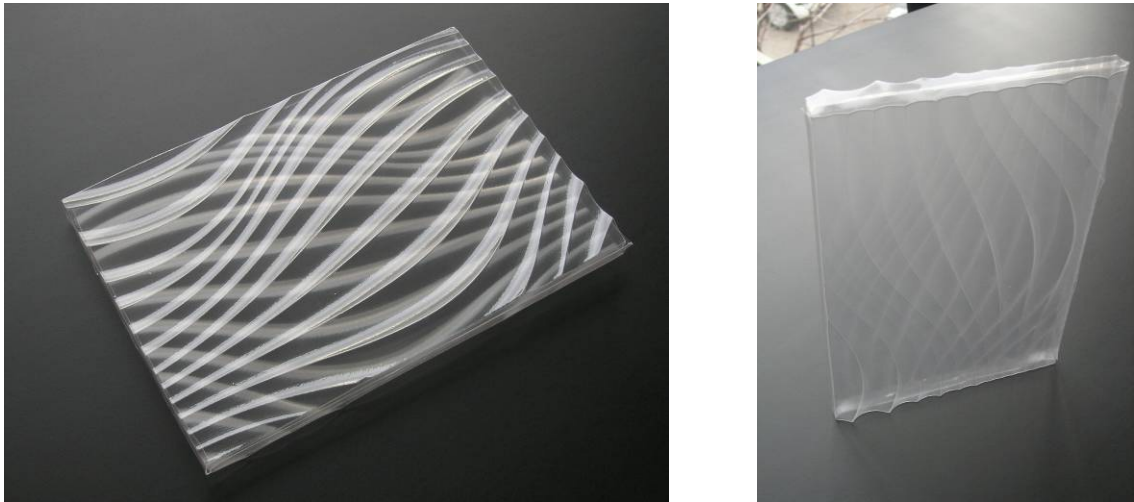


Abb. 37: Doppelschaliges Demonstrator-Modul mit wellenförmiger Oberfläche (ohne Mikroperforation)

3.4.4 Verstrecken

Realisierung der Idee: Klebeverbundstruktur/ Verstrecken (Idee 3)



Abb. 38: Leim zieht Fäden; Clear PEP®, Design Composite/A ©stylepark

Firma:

Patentinhaber dieser Verfahrenstechnologie ist die Firma Design Composite in Österreich. Dortige Mitarbeiter der Entwicklungsabteilung haben sich freundlicherweise bereit erklärt, eine 4 mm starke Platte aus einem biobasierten Kunststoffblend zu verstrecken. Aufgrund schlechter Verfügbarkeit von Halbzeugen aus biobasierten Kunststoffen wurde an opaken Biokunststoffplatten getestet. Bei einer Entscheidung für dieses Verfahren, müssten dann transparente bis transluzente Platten aus modifizierten, biobasierten Kunststoffen extrudiert werden.

Verfahren:

Eine mindestens 4 mm starke Platte wird vertikal in zwei Richtungen linear verstreckt. Die oberen und unteren Werkzeugplatten enthalten Löcher, die ein überlappendes Lochbild ergeben.

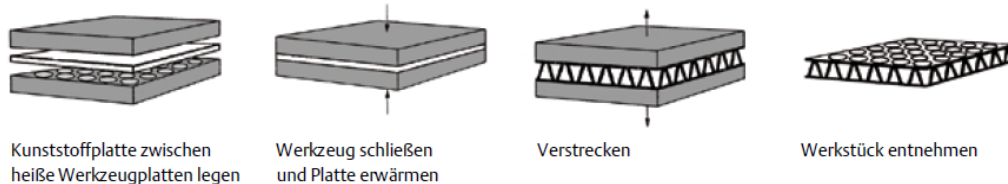


Abb. 39: Herstellen eines TRICore-Kerns durch Verstrecken, ©Design Composite

Auf einer von der Firma Design Composite entwickelten und patentierten Kernziehmaschine werden am Standort in Österreich seit 2000 TRICore® Wabenkerne aus transparentem Polycarbonat hergestellt. Die Charakteristik der Lochstruktur verleiht dem Leichtbaupaneel nicht nur eine einzigartige Tiefenwirkung, sondern auch eine extrem hohe Steifigkeit.

Die Weiterverarbeitung der Kerne erfolgt auf einer Flachbettlaminieranlage unter Verwendung unterschiedlichster Deckschichten aus PC und PMMA in allen Farben und Strukturen.⁹

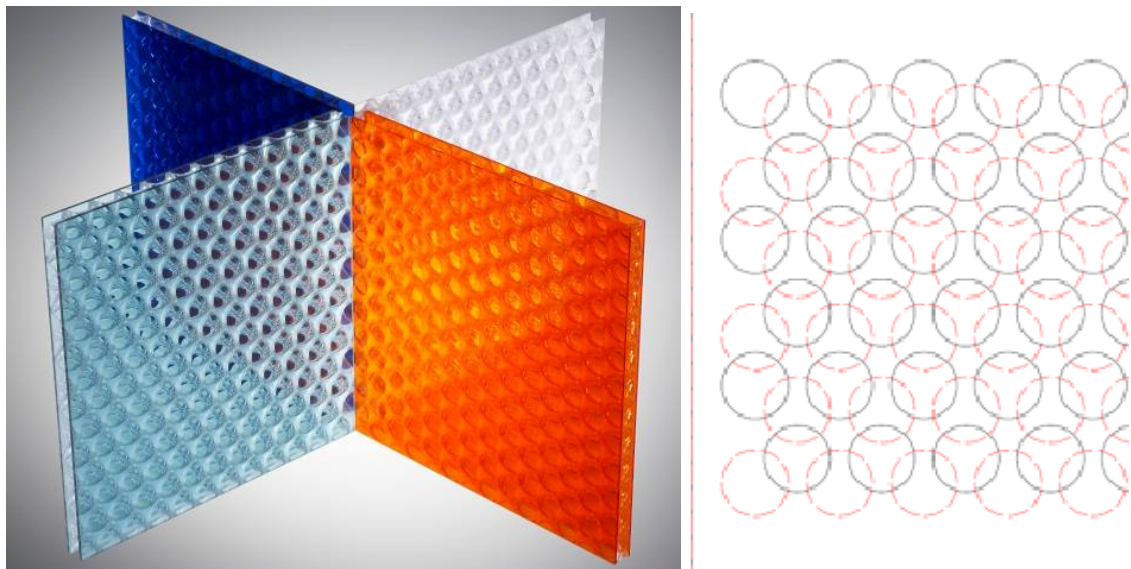
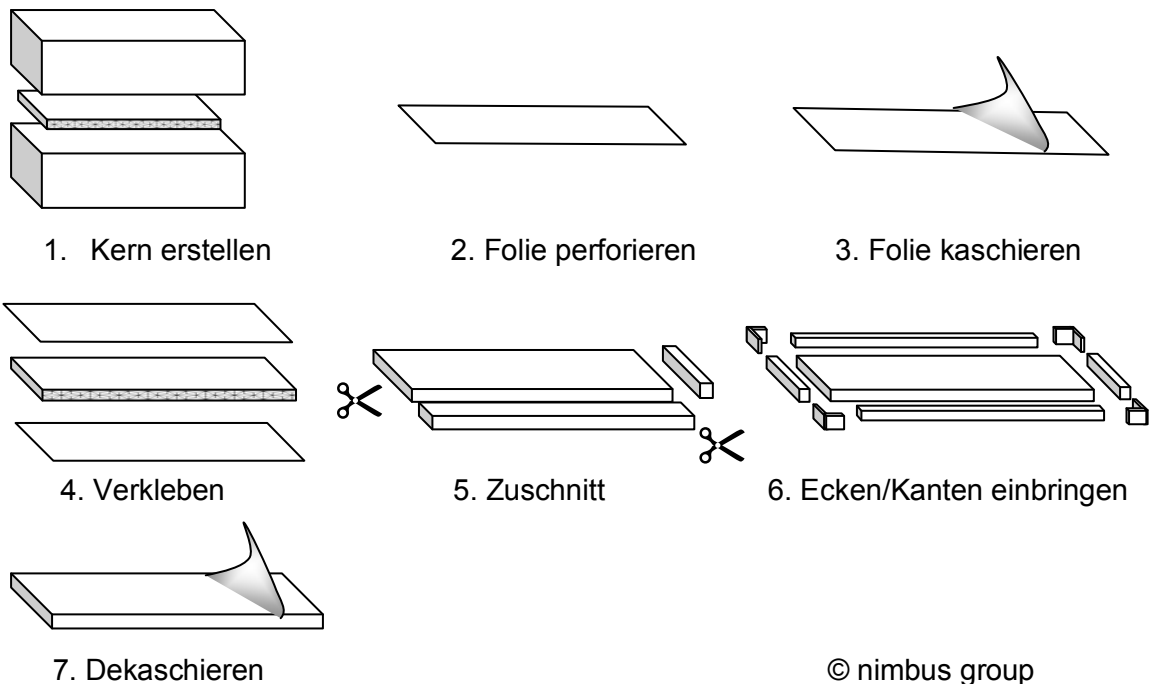


Abb. 40: Clear PEP® aus Polycarbonat, Ausschnitt Lochbild der Werkzeugplatten, © Design Composite

Fertigungsabläufe:



© nimbus group

Beim Verstrecken wird zunächst der Kern gesondert hergestellt. Dies erfolgt in einem speziellen Verfahren durch Aufschmelzen und Auseinanderziehen ca. 4 mm dicken Plattenmaterials. Nach Erkalten ergibt sich ein tragender Wabenkern mit relativ hoher Grundfestigkeit. Formal relativ große Freiheiten und maximale Modulgrößen von bis zu 3100 mm x 1600 mm bei überschaubaren Investitionskosten, erschienen zunächst interessant.¹⁰

Demonstrator:

Der Demonstrator aus einer Biokunststoffplatte wurde kostenlos von der Firma Design Composite hergestellt. Hierbei wurde eine 4mm starke Platte aus einem PLA-PHB-Blend verstreckt. Parameter wie Verstreckgeschwindigkeit oder die Prozess Temperatur, sind für das Ergebnis entscheidend. Die Biokunststoffplatte verhält sich hinsichtlich des Erweichungspunktes oder des Fließverhaltens anders als das Polycarbonat. Da der Firma Design Composite nur ca. 1m² Platte zur Verfügung gestellt werden konnte, war nicht ausreichend Material vorhanden, die zur optimalen Einstellung der Prozessparameter notwendig gewesen wären. Die Biokunststoffplatte mit einer Materialstärke von 4 mm konnte nur auf eine Gesamthöhe von 1,2 cm verstreckt werden. Grundsätzlich ermöglicht das Herstellungsverfahren eine Plattendicke von 3-12 cm. Eine Verarbeitung des biobasierten thermoplastischen Kunststoffes, wäre jedoch möglich.

Die Verfügbarkeit von Halbzeugen (z.B. Platten) aus Biokunststoffen ist aktuell sehr schlecht, da die Nachfrage aufgrund nicht eruiert Einsatzmöglichkeiten gering ist und daher sehr wenig Lagerbestand verfügbar ist. Die Plattenextrusion erfolgt nur bei einer höheren Abnahmemenge. Beim Entwerfen einer neuen Struktur müssten folgende

Designkriterien beachtet werden: Die Formen sollten möglichst geometrisch sein. Die obere und untere Werkzeugplatte müsste immer ein überlappendes Lochbild ergeben.

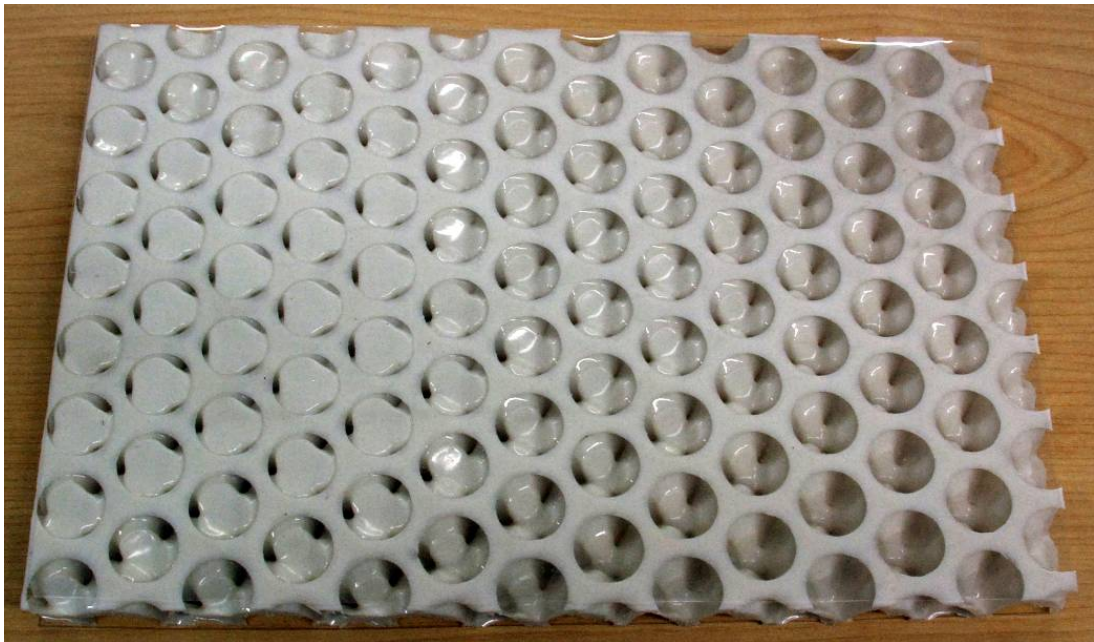


Abb. 41: Demonstrator – TRlcore-Kern aus einen PLA-PHB-Blend



Abb. 42: Demonstrator – TRlcore-Kern aus einen PLA-PHB-Blend, Bild2: hinterleuchtet

Vorteile des Verfahrens:

- Die Werkzeugkosten sind um den Faktor 3-4 geringer als Spritzgusswerkzeuge.
- Auf diese Weise können große Platten hergestellt werden: ca. 3 x 1,5 m.

Nachteile des Verfahrens:

- Lange Zykluszeit: 12-20 Minuten.
- Für das Verstrecken ist eine Plattenstärke von 4 mm notwendig. Für die Herstellung einer Sandwichplatte müsste daher die Extrusion von Platten beauftragt werden sowie eine Folienextrusion und deren Perforation für die Deckschichten.
- Das Entwerfen neuer zweidimensionaler Werkzeugplatten und die Simulation des dreidimensionalen Endergebnisses (verstreckte Platten) fiel schwer.

3.4.5 Falten

Ein formal und technologisch anspruchsvolles Verfahren, stellt das von der Fa. Foldcore entwickelte und patentierte Ritz-Faltverfahren dar. Vorteil dieses Verfahrens ist, dass dieselbe Materialbasis sowohl für die Erstellung des Kerns, als auch für die Deckschichten verwendet werden kann. Somit ist es auch denkbar, mikroperforierte Folien als Kern einzusetzen, was die akustischen Eigenschaften positiv beeinflussen kann. Bei den Faltungen ist man je nach Anforderung und Breite des Ausgangsmaterials eingeschränkt. Das Ausgangsmaterial der Folien lag bei ca. 1200 mm. Der fertige Kern hat damit eine Breite von ca. 600 mm, da sich durch den Faltungsprozess die Ausgangsbreite stark verkürzt.¹¹

Faltungen von Halbzeugen (wie z.B. Papier oder Folien) sind immer eine Kombination unterschiedlicher Längs- und Querkontraktionen.¹²

Die Materialstärke bleibt an allen Stellen der Faltung gleich, so dass auch sehr dünne Folien (ca. 80 µm) eingesetzt werden können. Beim Tiefziehen hingegen wird die Folie dünner, so dass je nach Geometrie (Plattenhöhe, Struktur, etc.) eine dickere Folie (ab 500 µm) eingesetzt werden muss. Der Projektpartner Nimbus Group verwendet im Kern des Rosso acoustic CP 30 eine Folienstärke von 150 µm. Bei Verwendung dieser Folienstärke wären keine Prägewalzen für die Faltstruktur notwendig, so dass die Fertigungskosten überschaubar sind.

Firma: Beraten wurden wir hinsichtlich der Faltkerne von der Firma Foldcore GmbH. Foldcore entwickelt faltbare Strukturen und stellt diese her. Der Überbegriff Faltkerne umfasst eine überwältigende Vielzahl unterschiedlichster Geometrien und Strukturen, die jedoch alle nach dem gleichen Prinzip konstruiert sind: Sie sind aus ebenem Halbzeug (z.B. Papier) gefaltet, ohne Zuhilfenahme von Schnitten, Klebestellen oder bleibenden Verformungen.¹³

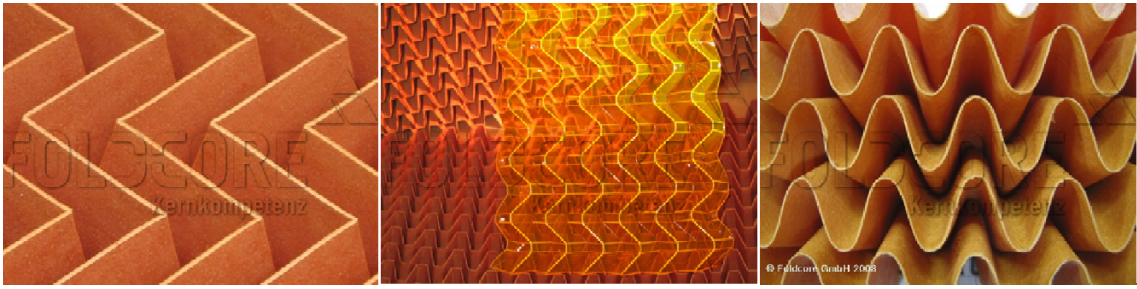
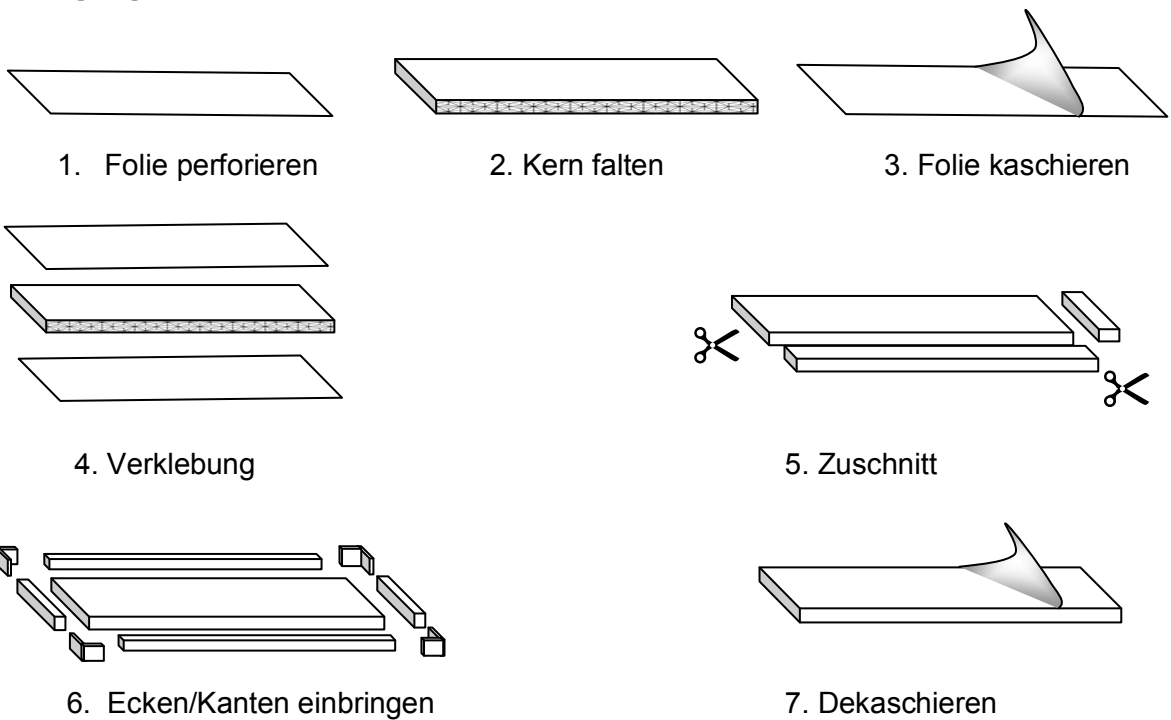


Abb. 43: Faltstrukturen ©Foldcore GmbH



Abb. 44: Faltstrukturen ©Foldcore GmbH

Fertigungsabläufe:



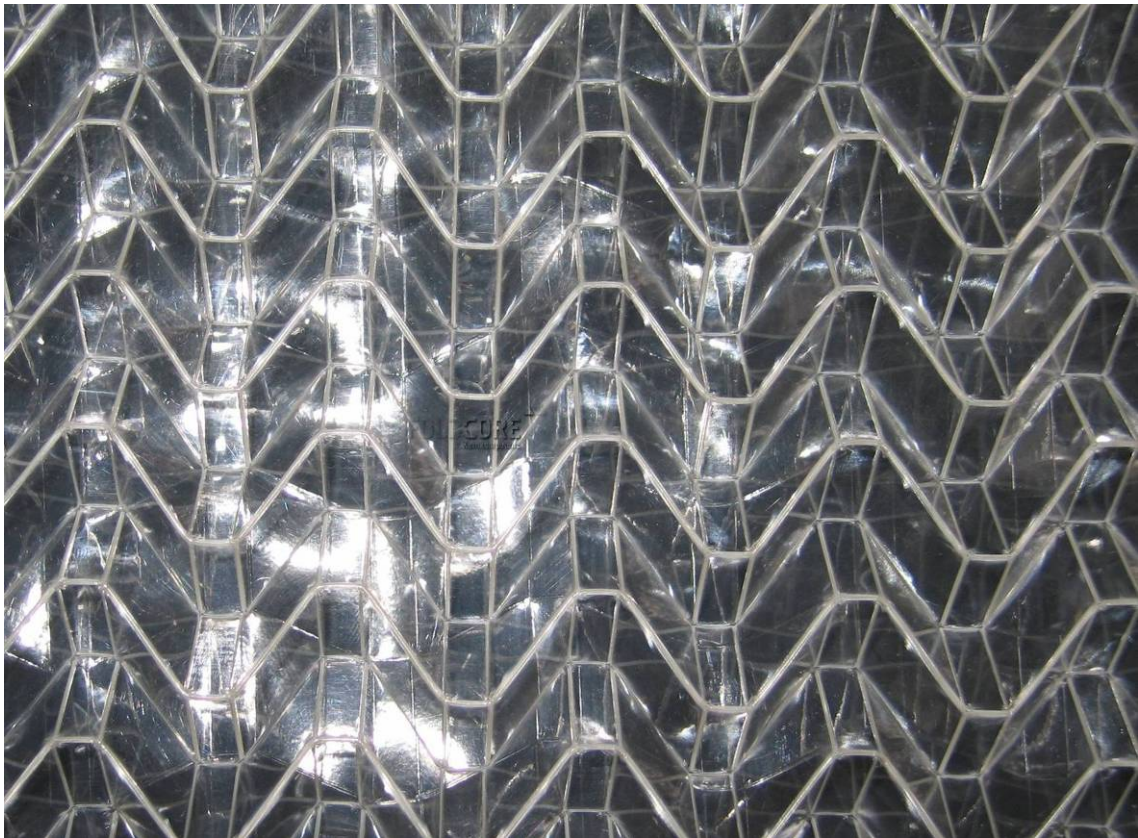


Abb. 45: Demonstrator: Faltstruktur aus Polylactid ©Foldcore GmbH

Die vom Projektpartner Nimbus zunächst anvisierte Produktionsmenge von 2000-3000 m² könnte halbautomatisch gefertigt werden.

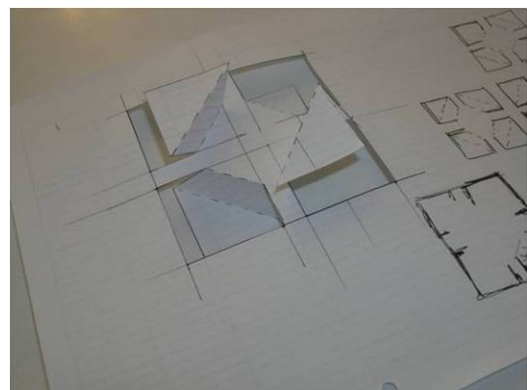
Bei der Entwicklung einer neuen Wabenstruktur würde man die Folien zur Formannäherung zunächst CNC-Fräsen. Weitere Versuche erfolgen dann mit dem Ritzplotter. Es wird zunächst eine Prägestruktur eingeritzt. Diese wird manuell gefaltet und thermisch fixiert.



Abb. 46: Demonstrator: Faltern aus einer mikroperforierten PLA-Folie; Herstellung: Foldcore GmbH; Bild: ITKE Fotograf: Michael Damböck

Gestaltungsansätze:

Das Faltenverfahren bietet je nach geforderten Anforderungen eine Reihe an möglichen Lösungen. So lassen sich auch gebogene oder runde Wabenkerne realisieren.



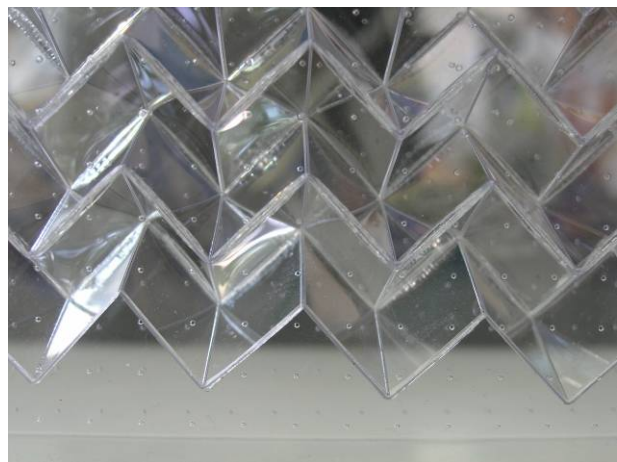
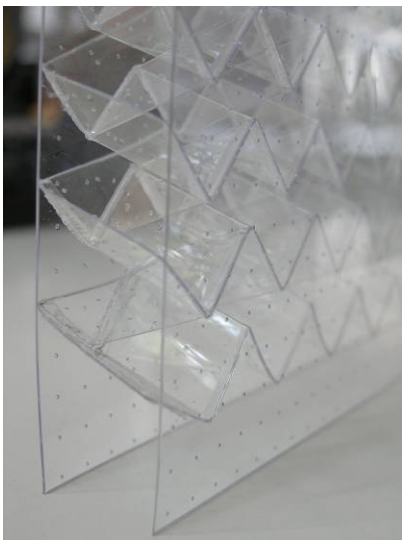
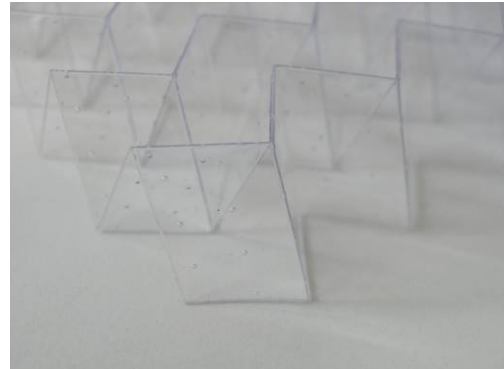
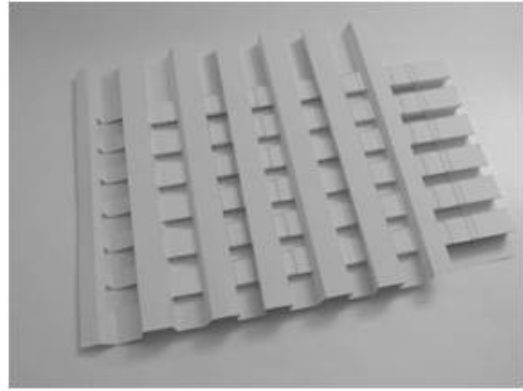
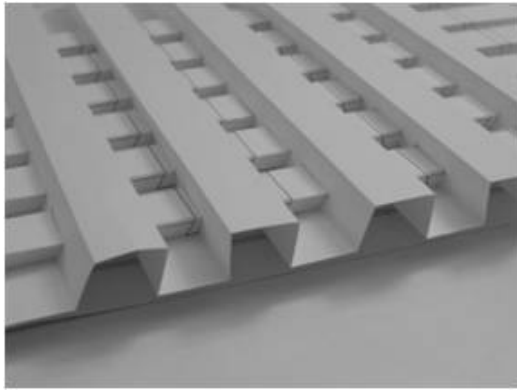


Abb. 47: Vorstudien zu Kern-Faltungen, ineinander gesteckte Falterne gefaltete Kernstrukturen, Details Demonstrator; ©nimbus group

Vorteile:

- Eine Vielzahl unterschiedlicher Strukturen und Geometrien wären möglich.
- Sowohl für den Kern, als auch für die Deckschicht könnten mikroperforierte Folien gleicher Materialstärke verwendet werden

Nachteile/ Herausforderungen:

- Eine optisch saubere Verbindung des Faltkern mit den Deckschichten kann nicht gewährleistet werden und müsste über einen weiteren Auftraggeber abgewickelt werden.
- Die Formulierung des gewünschten Wabendesigns ist eher abstrakt. Die gewünschte Faltkerndichte muss definiert werden sowie die Formensprache (eher organisch, grafisch, etc.). Da man keinen Einblick in die Software zu Wabendesign-Simulation erhalten durfte, war es schwierig, sich neue Geometrien vorzustellen.

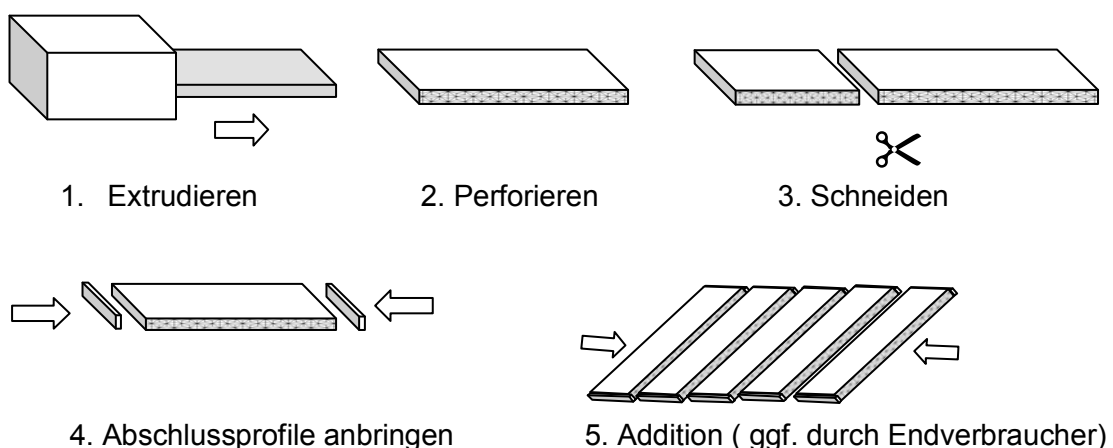
Folienbreiten betragen ca. 100-120 cm. Die Endbreite einer Wabenkernplatte beträgt je nach Geometrie der Struktur ca. 50-60 cm. Die Endlänge ist variabel, da die Folien in Endloslängen angeboten werden. Daraus würde eine eher streifenartige Produktstruktur erfolgen.

Sandwichplatten aus Polylactid und Cellulosederivaten mit Faltkernen (teilweise mikroperforiert) und mikroperforierten Deckschichten wurden im Kundt'schen Rohr hinsichtlich ihrer akustischen Wirksamkeit getestet (**siehe Kapitel 3.6.3**)

3.4.6 Extrusion

Diverse Anfragen bei Extrudeuren ergaben ein maximal mögliches Breitenmaß von 250 mm. Der Vorteil des Verfahrens ist also eher in der Endlosfertigung zu suchen.

Fertigungsabläufe:



Gestaltungsansätze:

Eine stehende Wabe zu extrudieren ist technisch aufwendig, weswegen die zuerst betrachteten Entwurfsansätze mit diesem Fertigungsverfahren bereits in einem frühen Stadium verworfen wurden. Einschränkungen in der Werkzeuggröße und ein auf-

wendiges Addieren der einzelnen, vorab auf Höhenmaß geschnittenen Module erfordern einen hohen fertigungstechnischen Aufwand.



Abb. 48: Demonstratoren mit stehender Wabe in Voronoi Mustern

Alternativ wurde daher über ein Hohlkammerprofil nachgedacht. Dieses muss nachträglich perforiert werden. Eine im Anschluss an ein extrudiertes Halbprofil angeschlossene Perforation ist möglich, aber mit hohen Werkzeugkosten verbunden.

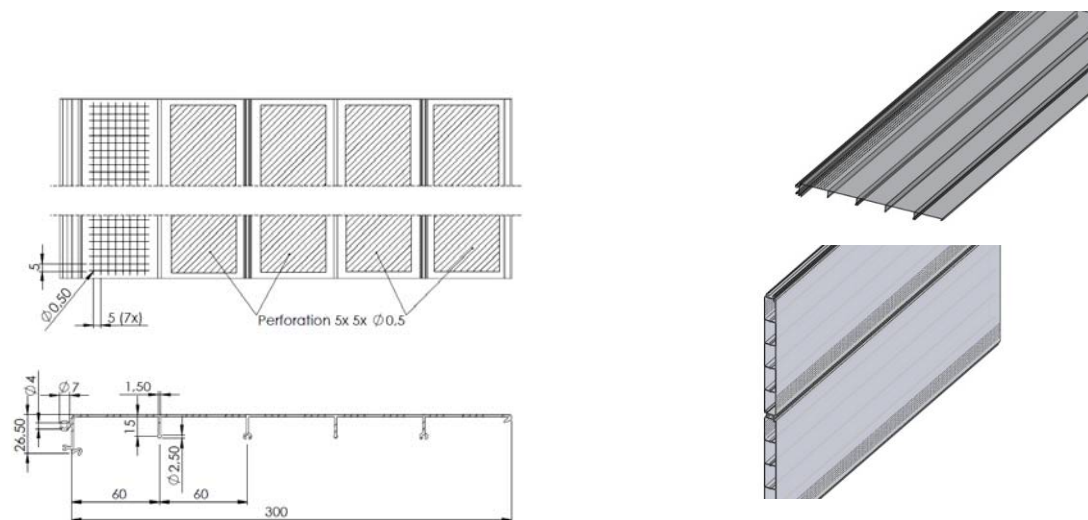


Abb. 49: Studien zu Perforationen, Hohlkammerprofilen und additiven Profilen

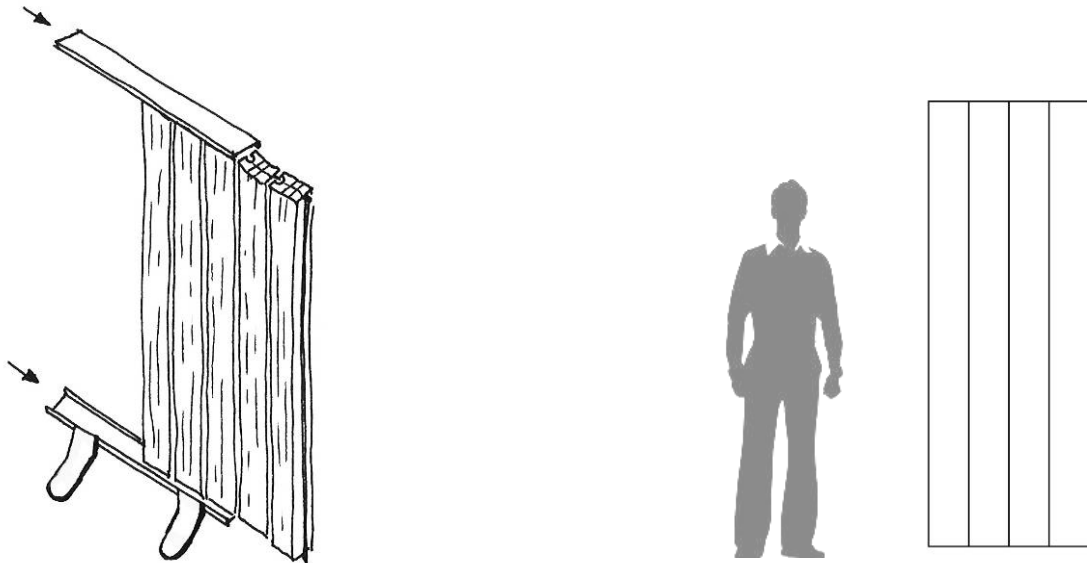
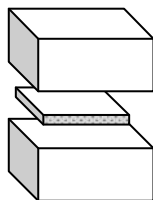


Abb. 50: Raumteiler und Trennwandstruktur aus Extrusionsprofilen ©nimbus group

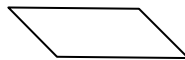
3.4.7 Schäumen

Ansatzpunkt für nachfolgende Studien war ein polystyrolartig geschäumter Biokunststoff (PLA) der Fa. Synbra Technologie BV in den Niederlanden. Ein niedriges Gewicht und relativ niedrige Werkzeugkosten sprechen für diese Technologie. Die maximal mögliche Werkzeuggröße beträgt 1200 mm x 1000 mm. Dies macht einen modularen Aufbau des Wabenkerns notwendig. Der Schaum ist geschlossen porig, d.h. er ist nicht absorbierend, weshalb der Kern nur tragende Funktionen übernehmen kann. Der Kern sollte daher so gestaltet sein, dass er entweder ausreichend Fläche für eine Verklebung mit den Deckschichten ermöglicht oder er besteht aus mehreren Teilen, damit die Foliendeckschichten eingeklemmt werden können.¹⁴

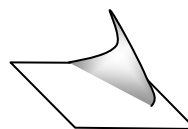
Fertigungsabläufe:



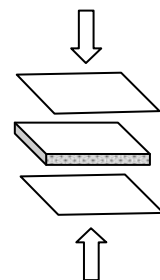
1. Kern schäumen



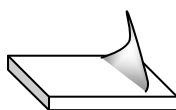
2. Folie perforieren



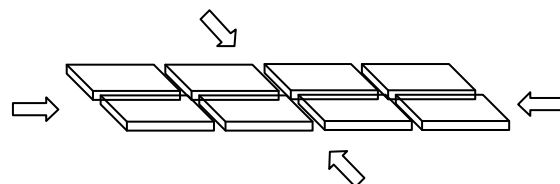
3. Kaschieren



4. Kleben

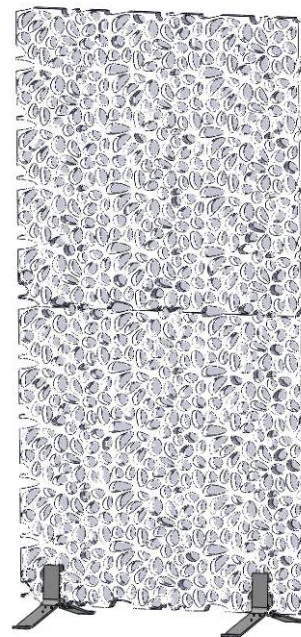
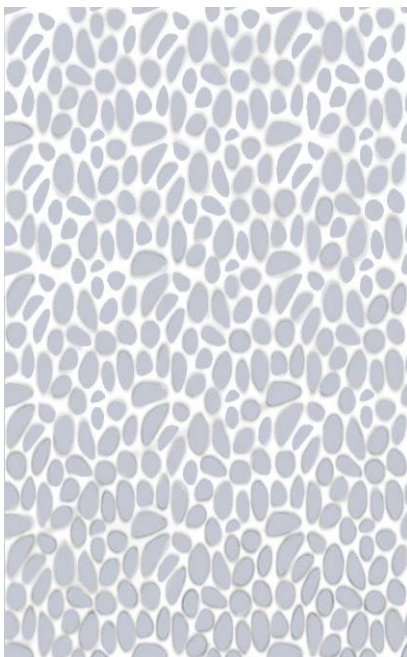
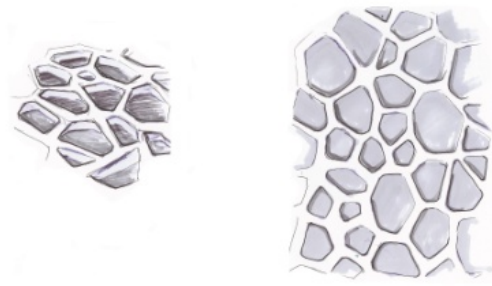
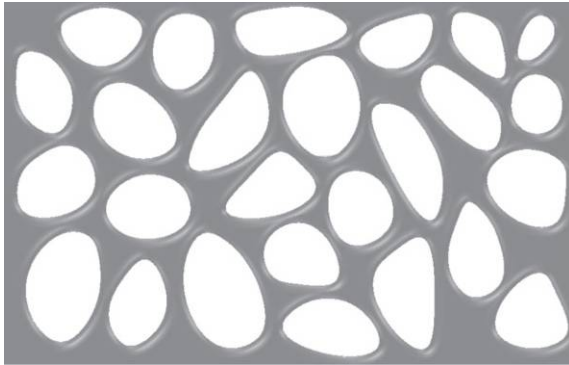


5. Dekaschieren



6. Moduladdition

Gestaltungsansätze: Organische Strukturen unterstreichen den Materialcharakter des geschäumten Materials. Harte, präzise Formen und Kanten lassen sich in diesem Herstellungsverfahren schlecht abbilden. Große Radien und weiche Kanten waren daher Gestaltungsschwerpunkt bei diesem Verfahren.



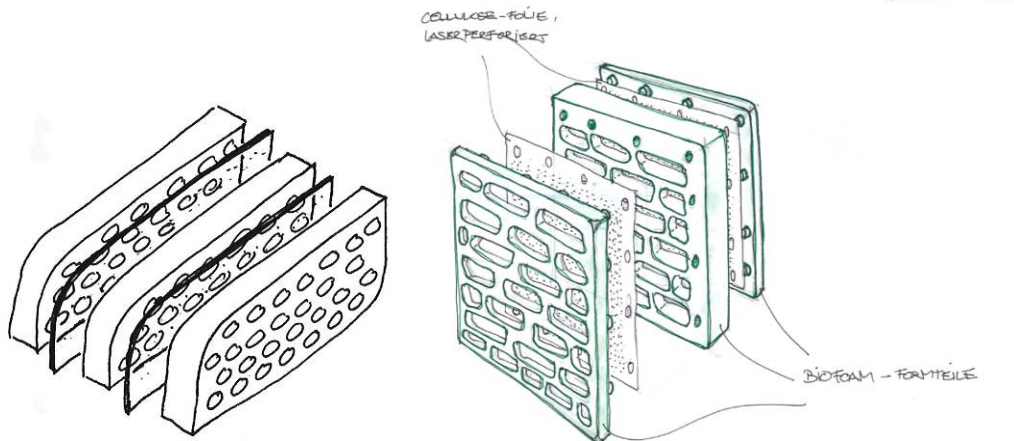


Abb. Studien zu Schaumstrukturen.

3.4.8 Spritzguss



Abb. 51: 1.) Colbond/ NL; 2.) Lumicor/ USA; Bilder: Stylepark; 3.) Naturfaser/PLA-Sandwichplatte, Köhler/©ITKE; Bild: Michael Damböck

Die formulierte Idealvorstellung war, eine Herstellungsmethode zu finden, bei der auf die bisher so aufwändigen und somit auch kostenintensiven Fertigungsschritte wie Perforation, Kanteneinbringung, Kaschieren, Dekaschieren, verzichtet werden kann. Ein Herstellungsverfahren, das die genannten Fertigungsschritte vereinfachen könnte, ist das Spritzgussverfahren. Technologisch anspruchsvoll ist hierbei, die Integration der Mikroperforation in den Herstellungsprozess und das optimale Verhältnis von Modulgröße zu Herstellungs- und Werkzeugkosten zu finden. Von Zulieferern wurden zunächst maximal mögliche Größen von 400 mm x 400 mm genannt. In konventionellem Kunststoff kalkuliert, erschienen zudem die Stückkosten in der Serienfertigung sehr niedrig auszufallen.¹⁵

Firma:

Bei der Technologierecherche zur Realisierung der Idee „Naturfasergewirr“ sind wir auf die Firma Koziol und das Spritzgießen gestoßen.

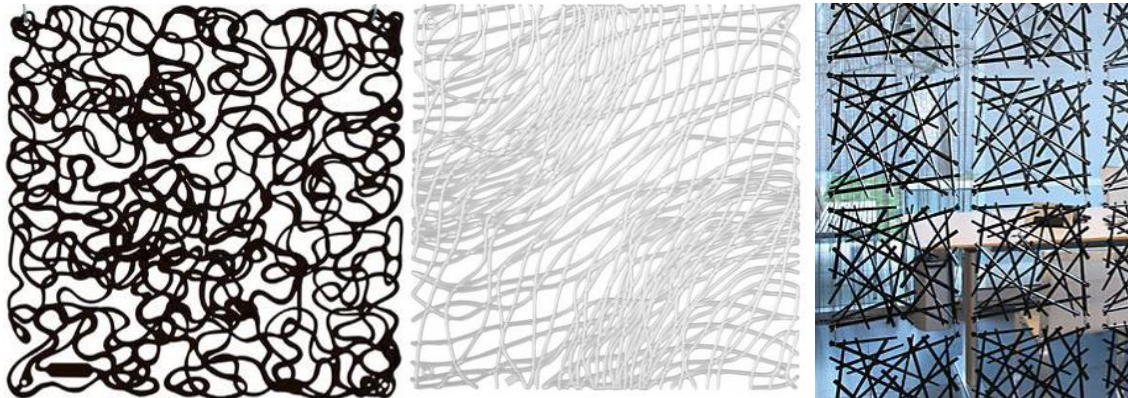


Abb. 52: Kunststofffliesen als Raumteiler ©Koziol

Das Unternehmen Koziol hat uns ermöglicht, mithilfe eines vorhandenen Spritzgusswerkzeuges, das zur Herstellung der Raumteiler-Module verwendet wird, Demonstratoren aus einem biobasierten Kunststoff herzustellen.

Üblicherweise wird Polycarbonat eingesetzt. Das PLA-PHB-Blend (z.B. Arboblend®) verhielt sich wie verzugfreies PS.

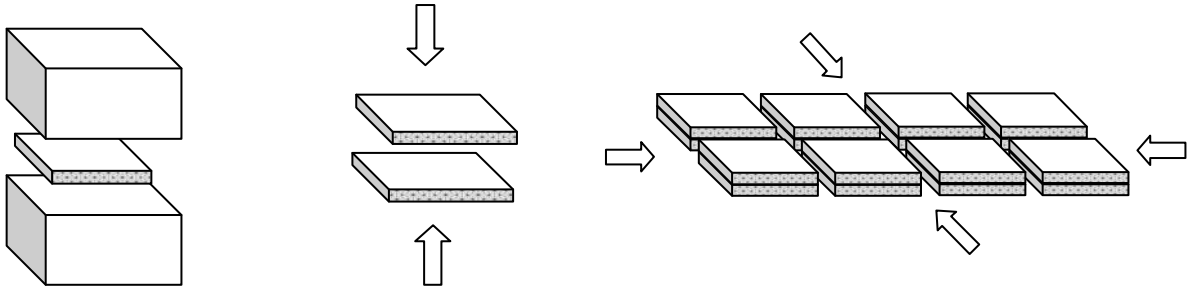
Die Raumteilerplatten weisen eine Bauteilhöhe von wenigen Millimetern auf. Der Projektpartner nimbus group, peilt in Orientierung an das vorhandene Produkt *rossoacoustic® CP30*, eine Bauteildicke von 3-5 cm an. Die Bauteildicke beeinflusst auch die akustische Wirksamkeit.

Bei einem höheren Spritzgusswerkzeug werden mehrere Einspritzpunkte benötigt. Verwendet man einen Kaltkanalverteiler, so verteilt eine 'Spinne' die Schmelze. Der Nachteil ist jedoch, dass die Schmelze dadurch schneller abkühlt und zäher wird. Auf diese Weise könnten keine komplexen Geometrien gespritzt werden. Verwendet man einen Heißkanalverteiler, so bleibt die Schmelze bis zum Formteil gleich flüssig.

Die Werkzeugkosten sind hier jedoch auch doppelt so hoch wie beim Kaltkanalverteiler und kosten mehrere 10.000,- €.

Problem bei höheren Werkzeugaufbauten ist zudem die Entformung. Eine geteilte Entformungsschräge (konisch) ist jedoch möglich. Des Weiteren war relevant für uns, welche Bauteildicke im Spritzguss noch realisierbar ist: In einem Winkel von 1° vom Bauteiloberrand, konisch über die Dicke zum Bauteilunterrand gehend, muss noch eine Rippenstärke von 1mm vorhanden sein.

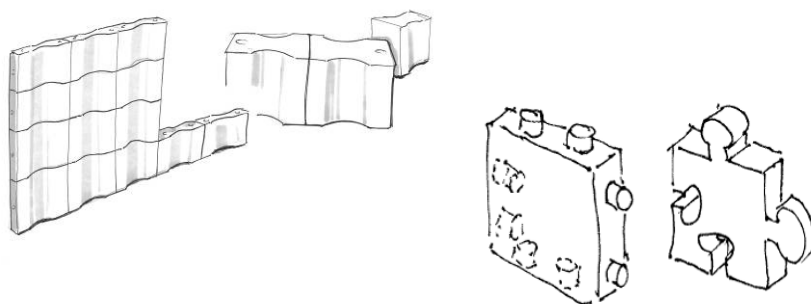
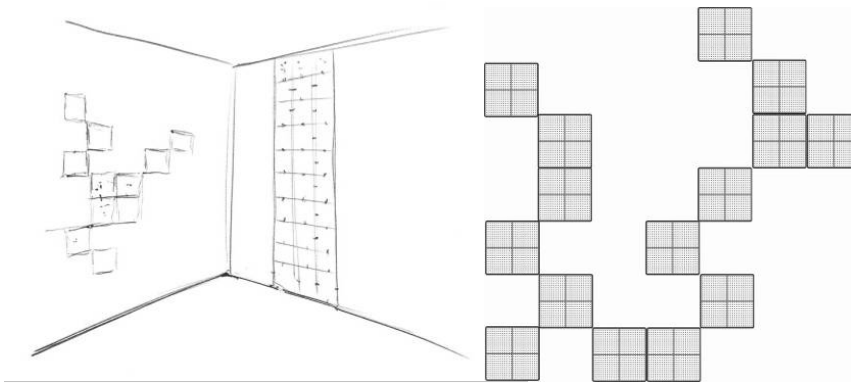
Fertigungsabläufe:

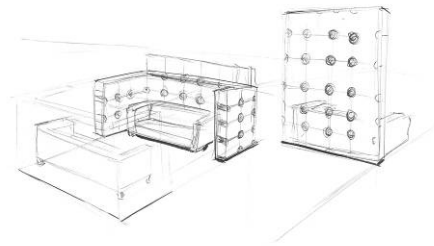
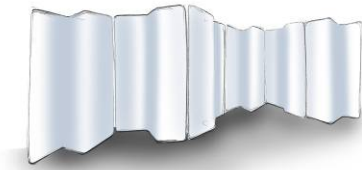
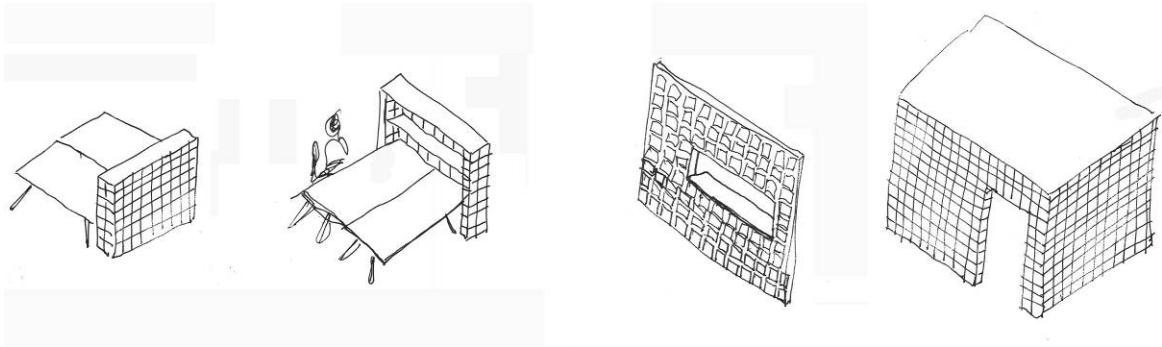


1. Spritzen der Halbschale 2. Montage der Halbschalen 3. Moduladdition (ggf. durch Endverbraucher)

Interessant erscheint, dass der 3. Fertigungsschritt nicht zwingend notwendig erscheint. Mit einem entsprechenden Konzept kann die Montage dem Endverbraucher überlassen werden.

Gestaltungsansätze: Das Spritzgussverfahren bietet prinzipiell eine große Vielfalt an gestalterischen Möglichkeiten.





Vorteile:

- Sehr kurze Taktzeiten (18-80 Sekunden).

Nachteile/ Herausforderungen:

- Die Fließfähigkeit thermoplastischer Kunststoffe wird durch Additive meist herabgesetzt. Je geringer die Fließfähigkeit und je komplexer die Struktur, desto mehr Anspritzpunkte sind notwendig und desto teurer wird das Werkzeug. Da vorhandene biobasierte thermoplastische Kunststoffe hinsichtlich ihrer Eigenschaften (Brandverhalten, Wärmeformbeständigkeit), nicht direkt eingesetzt werden können, müssen diese den Anforderungen in Innenräumen entsprechend modifiziert werden. Die Fließfähigkeit gewählter und modifizierter Biokunststoffe ist daher noch nicht bekannt.
- Aufgrund hoher Werkzeugkosten müsste eine eher modulartige Produktstruktur konzipiert werden. Eine Bausteingröße von 25x25 cm wäre noch realisierbar. (Werkzeugkosten je nach Geometrie und Bauteilhöhe ca 50.000,- €)
- Lohnt sich erst ab hohen Stückzahlen.

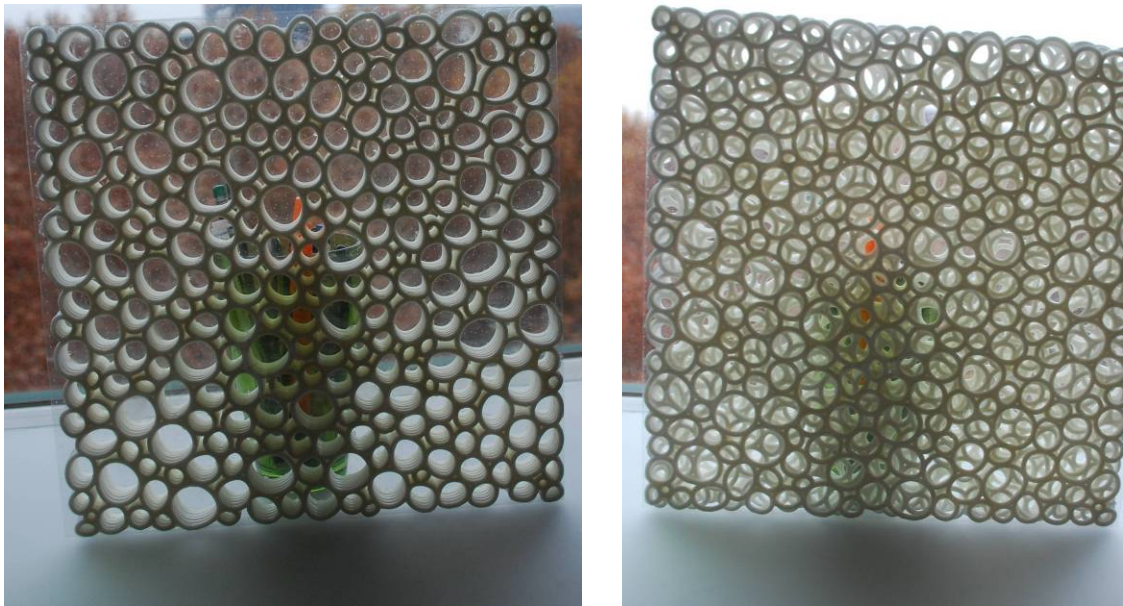


Abb. 53: Demonstratoren: Spritzguss-Formteile (verklebt) aus einem Polylactid-Blend

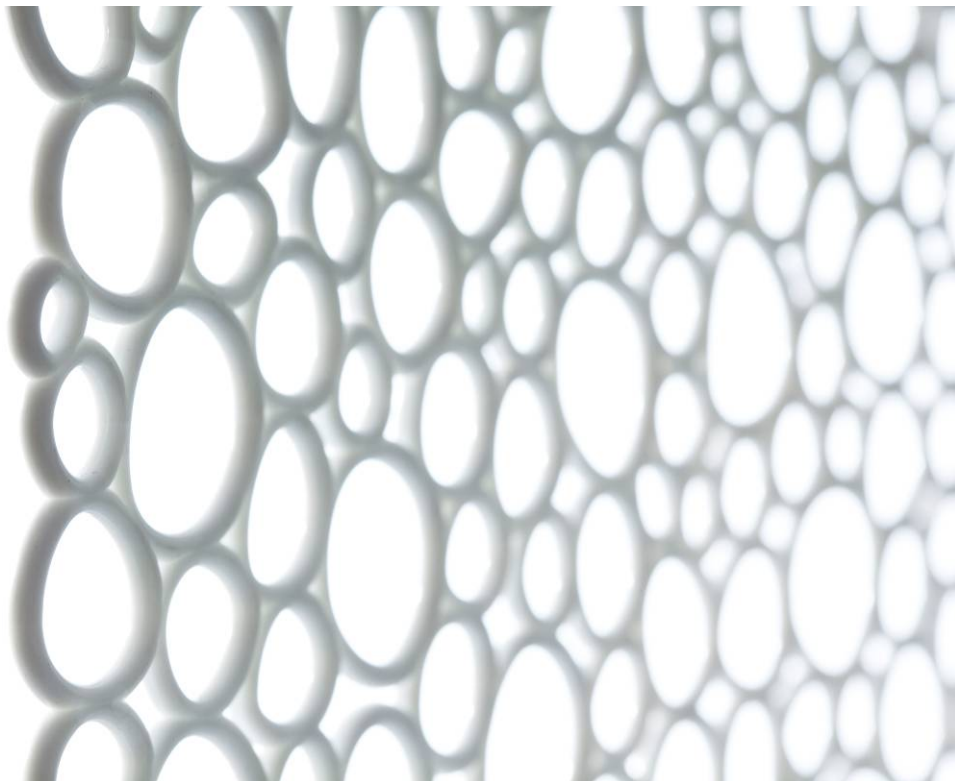


Abb. 54: Demonstrator: Spritzguss-Formteil aus einem Polylactid-Blend;
Design: ©Koziol; Herstellung: Koziol

Da das Spritzgießen die Herstellung eines offenen Kerns ermöglicht, wird das Verfahren weiter betrachtet. Siehe **Kapitel 3.5.3** Akustische Beurteilung der Demonstratoren und **Kapitel 4** Entwicklung des Akustikmoduls.

3.4.9 Verbindungsmöglichkeiten Sandwichkern – Deckfolien

Der Sandwichkern muss stets mit den Deckfolien verbunden werden. Dies geschieht über Leimen/ Laminieren. Keiner der bisher kontaktierten Firmen, die die Sandwichkerne mit Hilfe unterschiedlicher Herstellungsverfahren testweise produziert haben, konnte die Verbindung mit der Deckschicht zufriedenstellend umsetzen. Dies liegt unter anderem daran, dass Sandwichplatten in vielen technischen Anwendungen eingesetzt werden, in denen Ästhetik und optische Qualität keine Rolle spielen (z.B. Flugzeugbau, Lüftungsgitter, Kunststoffpaletten, etc.)

Die saubere und optisch möglichst nicht sichtbare Verbindung zwischen Deckfolie und Kern stellt daher in jedem Falle eine Herausforderung dar und müsste in der späteren Produktion des Produktes an einen weiteren Auftragnehmer vergeben werden.

Im Zuge dieser Problematik war die Überlegung, ob es weitere Möglichkeiten gibt, Kern und Deckfolien miteinander zu verbinden.

Ein einfaches Trennen von Deckschicht und Kern wäre auch dann vorteilhaft, wenn beispielsweise unterschiedliche (biobasierte) Kunststoffe zum Einsatz kommen und dadurch auch die Entsorgung / das Recycling erleichtern.

Allen Versuchen gemeinsam ist die Tatsache, dass es sich um Maßarbeit handelt und die Übertragung in eine kontinuierliche, maschinelle Fertigungstechnik erst zu einem späteren Zeitpunkt des Projektes erfolgen sollte.

Experimentell wurde das Vernähen des Kerns mit den perforierten Deckschichten durchgeführt. In Handarbeit konnte dies vor allem bei den Faltkernen aus mikroperforierten Folien und den mikroperforierten Deckfolien realisiert werden (siehe Abb. 39, Muster 1+2)

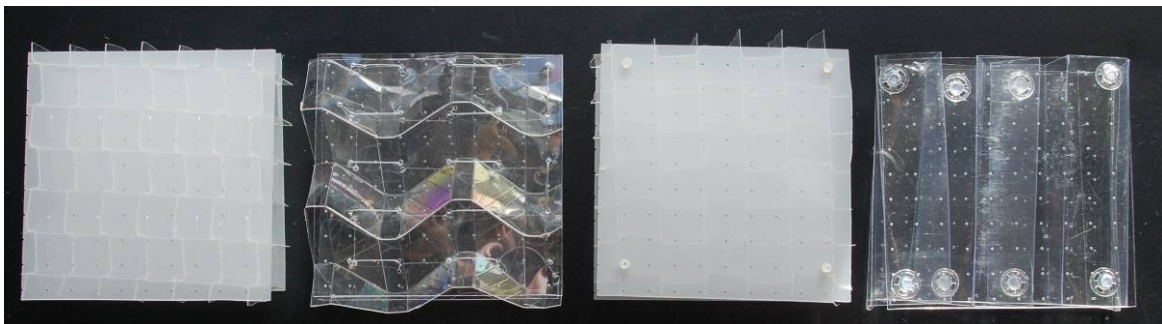


Abb. 55: Experimentelle Suche nach alternativen Verbindungsmöglichkeiten: 1. Nähen, 2. Nähen, 3. Prinzip Stift + Ring, 4. Druckknopf © ITKE Universität Stuttgart

Des Weiteren wurden dünne Kunststoffstifte und (elastische) Ringe eingesetzt (siehe Abb. 39, Muster 3). Hier waren Etikettiergeräte für Textilien das Vorbild. Dieses Verfahren würde sich für mikroperforierte Faltkerne oder offene Spritzguss- und Extrusionskerne eignen. Das vierte Muster wurde mit Druckknöpfen ausgestattet. Hier war die Idee, ob es möglich wäre, mittels Tiefziehen den Sandwichkern sowie die Deckfolien so zu konzipieren, bzw. so umzuformen, dass diese ineinander geklickt werden können.

Im Zuge der Verbindungsproblematik zwischen Deckschicht und Kern sowie dem ökonomischen Druck Fertigungsschritte zu minimieren, kam zunehmend der Gedanke auf, ein Bauteil zu entwickeln, das möglichst viele Fertigungsschritte in einem vereint.

Dabei entstand das Spritzguss-Konzept-Modell. Dahinter steckt die Idee, die mikroperforierte Deckschicht, Stege sowie die Kanten als Halbschalen mittels Spritzguss herstellen zu lassen. Durch das Zusammenstecken von zwei Halbschalen entsteht das Akustikmodul als Bausteinlösung.

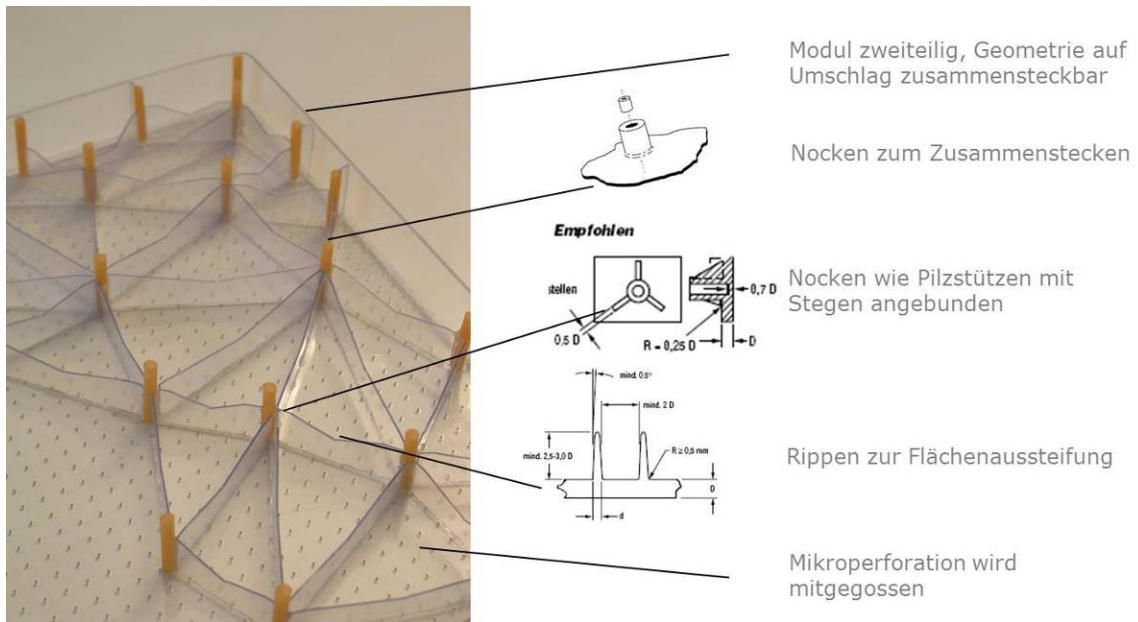


Abb. 56: Spritzguss- Konzeptmodell, Modell + Bild: nimbus group

Die Entwicklung des Akustik-Moduls wird in **Kapitel 4** beschrieben

3.4.10 Fazit Herstellungsverfahren aus Sicht des Partners nimbus group

Sandwichbauweise

Der Herstellungsprozess von rossoacoustic® CP30 ist sehr arbeits- und kostenintensiv. Ein Ersatz der konventionellen Folien durch biobasierte Folien ist problemlos möglich und sehr einfach zu realisieren. Da jedoch beim Umstieg dieses Verfahrens auf Biofolien, alle Arbeitsschritte identisch mit der konventionellen Fertigung sind, lassen sich kaum Einspareffekte bei den Produktionskosten erzielen.

Die beim Test verwendeten CTA Folien weisen zudem einen zu geringen Anteil an nachwachsenden Rohstoffen bzw. zu geringen Bioanteil auf.

Twin-Sheet

Akustische Messungen ergaben, dass der schallharte Kern mehr oder weniger stark

reflektierend wirkt, was die Absorptionsleistung negativ beeinflusste (**siehe auch Kapitel 3.5.3**). Dem stehen hohe Werkzeuginvestitionskosten gegenüber. Eine weitere Untersuchung von Gestaltungsansätzen erschien mit dieser Technologie unter ökonomischen Gründen daher fraglich und wurde zurückgestellt.

Tiefziehen

Da beim Tiefziehen nach momentanem Stand der Technik, eine Fertigung von bereits mikroperforierten Modulen nicht möglich ist und nachträglich eingebrachte Mikroperforation sehr aufwendig ist, erschien dieses Fertigungsverfahren als wenig geeignet.

Falten

Eine gefaltete Struktur erschien aus akustischer Sicht als erfolgversprechendste Lösung, da der gezackt gefaltete Kern wie ein Diffusor wirkt, was in Kombination mit der Mikroperforation gute akustische Messwerte verspricht. Maximale Modulbreiten von ca. 600 mm), fehlende Prozesssicherheit durch fehlende Klebeerfahrung im Sichtbereich und relativ hohe Erstellungskosten durch anfallende Werkzeugkosten für einen Prägewalzensatz sowie die Notwendigkeit Kanten- und Eckenabschlüsse additiv hinzuzufügen zu müssen, was wiederum den Fertigungsprozess in seiner Komplexität erhöht und die Fertigungskosten steigen lässt, gaben den Ausschlag dieses Verfahren zunächst nicht weiter zu verfolgen.

Verstrecken

Der Herstellungsprozess ist sehr arbeits- und somit kostenintensiv.

Extrusion

Neben hohen Investitionskosten für Extrusionswerkzeug und Perforation, gaben vor allem die zu erwartende halbzeugartige Anmutung und die streifenartige Modulteilung (Assoziation Doppelstegplatte) den Ausschlag, dieses Verfahren nicht weiter zu entwickeln.

Schäumen

Entgegen der ersten verfügbaren Materialmuster und aufgrund besserer Unterscheidbarkeit zu erdölbasiertem Polystyrolschaum ist dieser Kunststoff vorerst nur in einer optisch nicht sehr ansprechenden, grünlich eingefärbten Variante zu bekommen. Deckschicht und Kern müssen zudem aus zwei verschiedenen Materialien hergestellt werden. Dem Schaumhersteller liegen zudem noch keine Erfahrungen/Erkenntnisse vor, wie sich das Material verkleben lässt. Die komplette Fertigungsstruktur müsste neu erschaffen werden. Eine serienreife Umsetzung erscheint zum momentanen Zeitpunkt eher fraglich.

Spritzgiessen

Maximal drei Arbeitsschritte sprechen für ein sehr effizientes Fertigungsverfahren. Eine Modulgröße von 250 mm x 250 mm x ca. 25 mm für eine Halbschale steht in einem ausgewogenen Verhältnis von Werkzeug zu Stückkosten (konventioneller Kunststoff als Referenz). Größere Modulgrößen sind technisch machbar, aber mit sehr hohen Werkzeugkosten verbunden. Dickere Halbschalen (>25 mm) erfordern relativ dicke Wandstärken, was dem Anspruch der Materialökonomie widersprechen würde.

Mit einem modularen Gestaltungskonzept kann zudem die Montage dem Endverbraucher überlassen werden, was diesem eine hohe Flexibilität in der Anwendung bietet.

3.5 Akustische Beurteilung der Demonstratoren

3.5.1 Wirkungsprinzip der Mikroperforation

Die Mikroperforation ist ein vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik lizenziertes Verfahren, bei dem Schall durch Reibung in Wärme umgewandelt wird.

Die Luftpfropfen, die sich in den Löchern der Mikroperforation befinden, werden durch die auftretenden Schallwellen in Schwingung versetzt. Durch Reibung an der Oberfläche des Lochs wird der Schall dabei in Wärme umgewandelt. Der erzielte Effekt ist dabei ähnlich wie bei textilen Oberflächen. Im Unterschied zum Textil funktioniert die Mikroperforation allerdings faserfrei. Produkte, die durch Mikroperforation Schall absorbieren, können daher auch transparent oder transluzent sein.

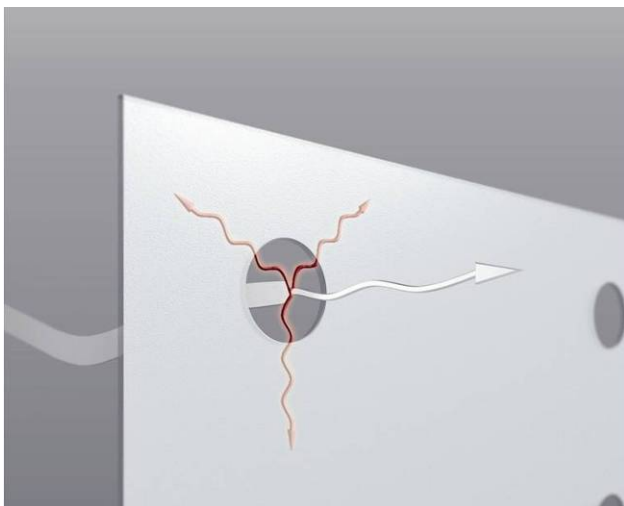


Abb. 57: Wirkungsweise Mikroperforation

Lochdurchmesser und Lochabstand hängen bei der Mikroperforation von der Materialstärke ab. Bei den Rossoacoustic-Folien liegt der Lochdurchmesser bei ca. 400 µm, der Lochabstand beträgt 6 mm. Daraus ergeben sich 27.000 Löcher pro Quadratmeter.

Durch die Absorption der Mikroperforation können Räume bedämpft werden. Durch Verringerung der Nachhallzeit steigt die Sprachverständlichkeit.¹⁶

3.5.2 Akustische Anforderungen

Aufbauend auf der Stellwand CP30 von Rossoacoustic wird auch hier ein Produkt angestrebt, das die Raumakustik durch Absorption und Schirmung verbessert.

Die Schallabsorption verringert Nachhallzeiten und verbessert dadurch die Sprachverständlichkeit. Durch bestimmte Anordnungen im Raum, zum Beispiel trennend zwischen zwei Arbeitsplätzen, sollte das Produkt auch als schallschirmend wirken. Bei der Schallschirmung wird die Ausbreitung des Direktschalls vermindert.

Ein Schalldämmer, das heißt ein Produkt, das Schall komplett isoliert, wurde nicht angestrebt.

Im Vergleich zur CP30 hat man sich hier zum Ziel gesetzt, ein Produkt zu entwickeln, das einen breiteren Frequenzbereich absorbiert. Vor allem tiefere Frequenzen sollten besser absorbiert werden. Zudem wurde eine Verbesserung der Wirkungsweise um 30% angestrebt.

3.5.3 Messungen im Kundt'schen Rohr

Im Kundt'schen Rohr werden unter Laborbedingungen Absorptionswerte gemessen. Dabei wird die Materialprobe dicht fixiert und mit Direktschall beschallt. Zeitversetzt wird vor der Probe Schall gemessen. Zuerst der auftreffende Schall, dann der von der Probe reflektierte Schall. Aus der Differenz dieser Werte ergibt sich der Absorptionswert.

Der Abstand der Probe zur Rückwand und damit der Luftpuffer hinter der Probe, kann variiert werden. Dadurch verändern sich die Messwerte.

Je höher der Ausschlag im Diagramm, desto mehr wird in diesem Frequenzbereich absorbiert. Der Absorptionswert eins, ist dabei ein theoretischer Wert und entspricht einem gedachten optimalen Absorber. Je weniger Ausschläge die Kurve aufweist, desto gleichmäßiger absorbiert die Probe Schall verschiedener Frequenzen.

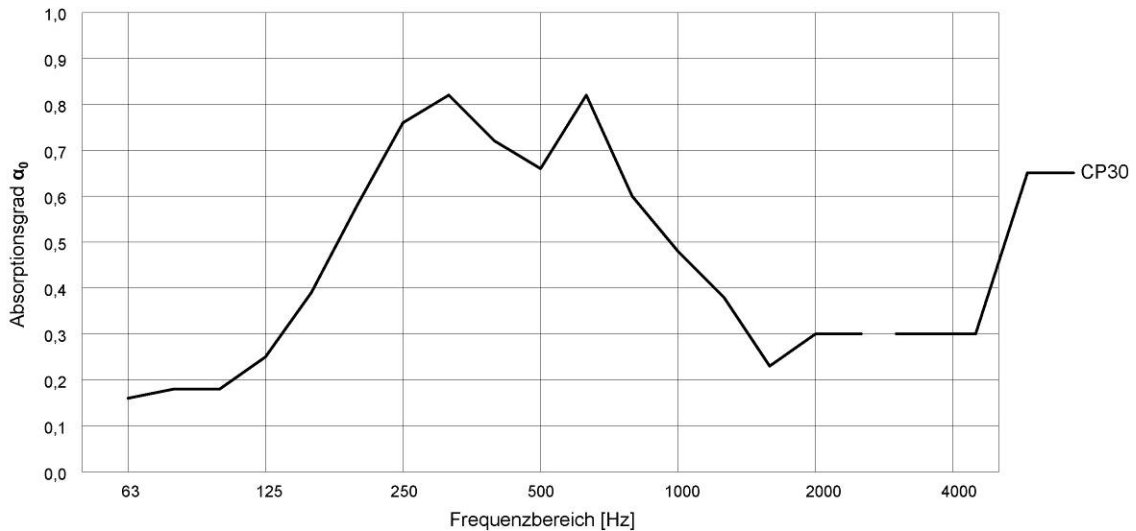


Abb. 58: Messung CP30 im Kundt'schen Rohr, Wandabstand 50 mm

Gemessen wurden die Demonstratoren BioCP30, Twin-Sheet, Falten und Voronoi.

BioCP30: Die BioCP30 ist wie die CP30 aufgebaut, aus einem Wabenkern mit kaschieren perforierten Deckschichten.



Material: CTA (Cellulose-Triacetat)
Wabengröße: 9 mm x 9 mm
Folienstärke Deckfolien: 1,5 mm
Lochdurchmesser: 400 μm
Lochabstand: 6 mm

Probe 1: CTA-30, 30 mm Gesamtstärke

Probe 2: CTA-40, 40 mm Gesamtstärke

Probe 3: CTA-50, 50 mm Gesamtstärke

Erkenntnisse aus den Messungen:

Das Absorptionsverhalten der CTA-Proben ist vergleichbar mit dem der CP30. Die Kurven verhalten sich in Höhe und Position der Ausschläge ähnlich. In tieferen Frequenzen absorbieren die CTA-Proben etwas besser. Im Bereich um 300Hz werden teilweise über 90% absorbiert. Zwischen 800Hz und 1000Hz absorbieren die CTA-Proben deutlich besser. In den hohen Frequenzen ab 1600Hz, weist die CP30 höhere Absorptionswerte auf. Die Probe CTA-50 absorbiert in tieferen Frequenzen besser, als

CTA-40 und CTA-30. In höheren Frequenzen absorbiert CTA-50 schlechter als CTA-40 und CTA-30.

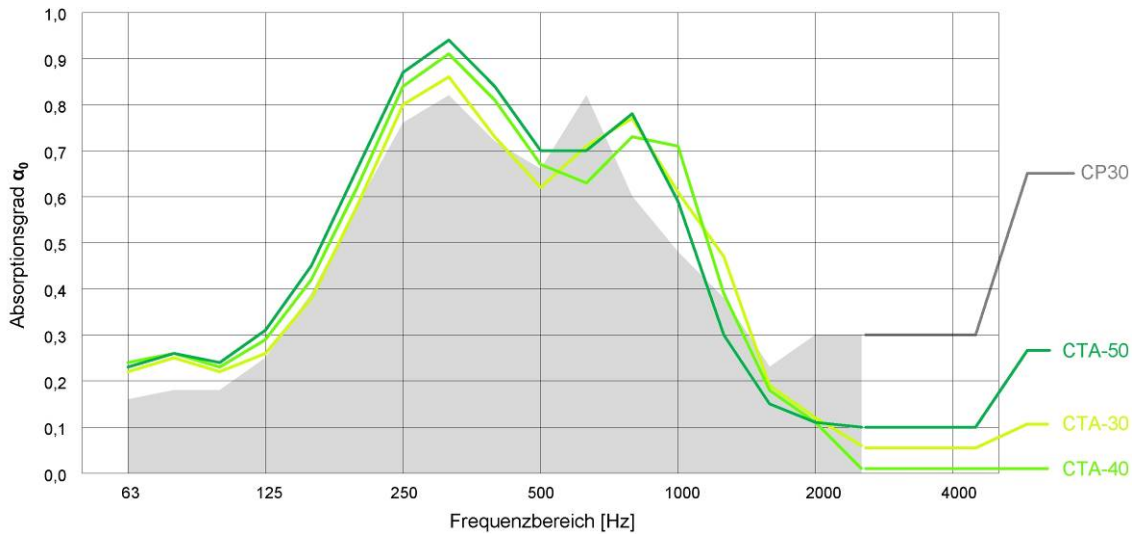
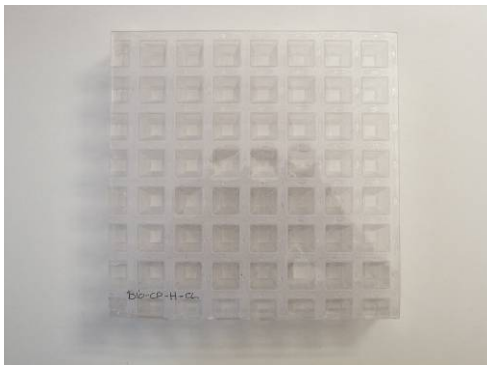


Abb. 59: Messung CTA-30, CTA-40, CTA-50 im Kundt'schen Rohr, Wandabstand 50mm

Twin-Sheet: Die Twin-Sheet Demonstratoren bestehen aus einem beidseitig tiefgezogenen luftundurchlässigen Kern mit Pyramidenstumpf-Struktur und aufkaschierten, mikroperforierten Deckfolien.



Folienstärke Deckfolien: 0,35 mm
Lochdurchmesser: 400 µm
Lochabstand: 6 mm
Gesamtstärke: 42 mm

Probe 1: H-W, Kern aus weißem ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol),
Probe 2: H-CL, Kern aus transparentem PET (Polyethylenterephthalat)

Erkenntnisse aus den Messungen: Zwischen 100Hz und 1600Hz absorbieren die H-Proben deutlich schlechter, als die CP30. Beide Proben weisen deutliche Ausschläge in den Bereichen um 1000Hz und 2000Hz auf. Die Probe H-CL weist zudem hohe Absorptionswerte um 250Hz auf, während die Probe H-W erhöhte Absorptionswerte um 400Hz zeigt. Die Unterschiede lassen sich durch unterschiedliche Eigenschwingungen des Materials erklären.

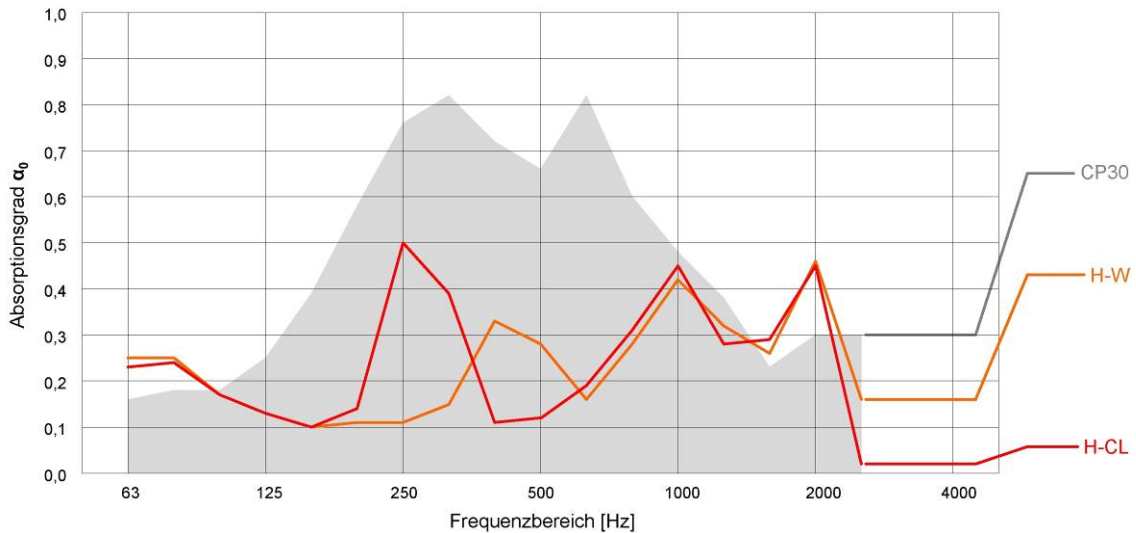


Abb. 60: Messung H-W, H-CL im Kundt'schen Rohr, Wandabstand 50mm

Falten: Die gefalteten Demonstratoren bestehen aus einem Folienkern mit Zick-Zack-Faltung und perforierten Deckschichten.



Folienstärke Deckfolien: 0,25 mm
 Lochdurchmesser: 400 μm
 Lochabstand: 6 mm

- Probe 1: FA-30, 30 mm Gesamtstärke, Kernfolien luftdicht
- Probe 2: FA-30-P, 30 mm Gesamtstärke, Kernfolien perforiert
- Probe 3: FA-40, 40 mm Gesamtstärke, Kernfolien luftdicht
- Probe 4: FA-40-P, 40 mm Gesamtstärke, Kernfolien perforiert
- Probe 5: FA-50, 50 mm Gesamtstärke, Kernfolien luftdicht
- Probe 6: FA-50-P, 50 mm Gesamtstärke, Kernfolien perforiert

Erkenntnisse aus den Messungen: Die Proben mit perforierten Deckschichten haben ein ähnliches Absorptionsverhalten wie die CP30. In den tieferen Frequenzen unter 250Hz absorbieren sie besser, in den höheren Frequenzen ab 1250Hz absorbieren sie schlechter. Die Proben mit luftdichten Kernen weisen einen starken Einfall bei 315Hz auf. Um 500Hz absorbiert die Probe FA-50 besser als die CP30, die Probe FA-40 ungefähr gleich gut und die Probe FA-30 deutlich schlechter. Die Proben FA-50 und FA-50-P absorbieren in tieferen Frequenzen besser, als die dünneren Proben und in den

höheren Frequenzen tendenziell schlechter. Die Proben mit perforierten Kernfolien weisen homogenere Kurven auf, als die mit luftdichten Kernfolien.

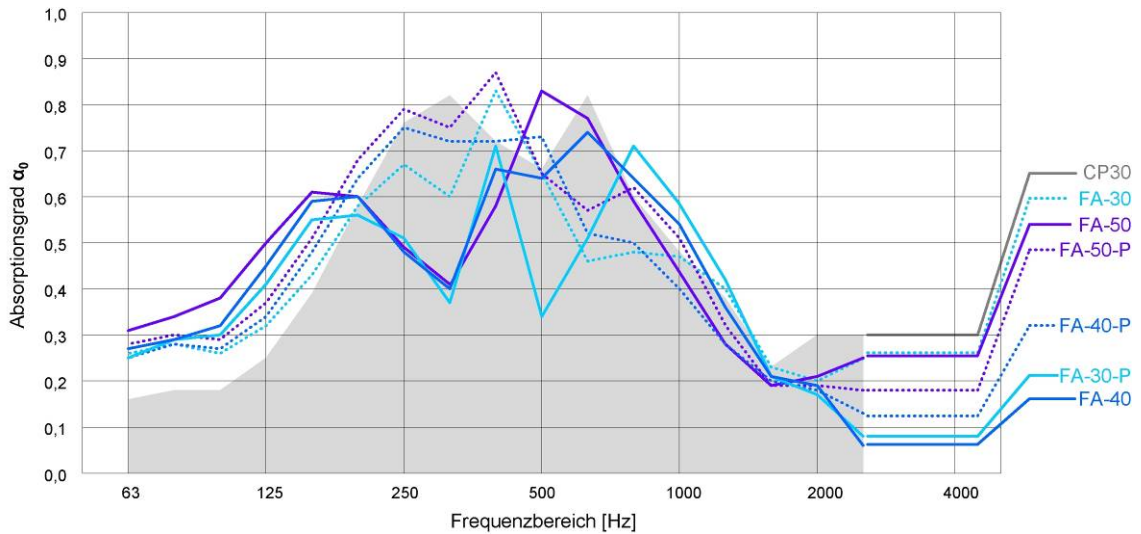


Abb. 61: Messung FA-30, FA-30-P, FA-40, FA-40-P, FA-50, FA-50-P im Kundt'schen Rohr, Wandabstand 50 mm

Voronoi: Der Demonstrator Voronoi besteht aus einem Acryl-Waben-Kern im Voronoi-Muster und perforierten Deckfolien.



Folienstärke Deckfolien: 0,35 mm
Lochdurchmesser: 400 μm
Lochabstand: 6 mm
Gesamtstärke: 21 mm

Probe 1: V21

Erkenntnisse aus den Messungen: Die Probe V21 absorbiert im Allgemeinen etwas schlechter als die CP30. In tieferen Frequenzen unter 100Hz, in mittleren Frequenzen um 500Hz und in hohen Frequenzen um 1600Hz, weist die Kurve deutliche Ausschläge auf und kommt hier auf höhere Absorptionswerte, als die CP30.

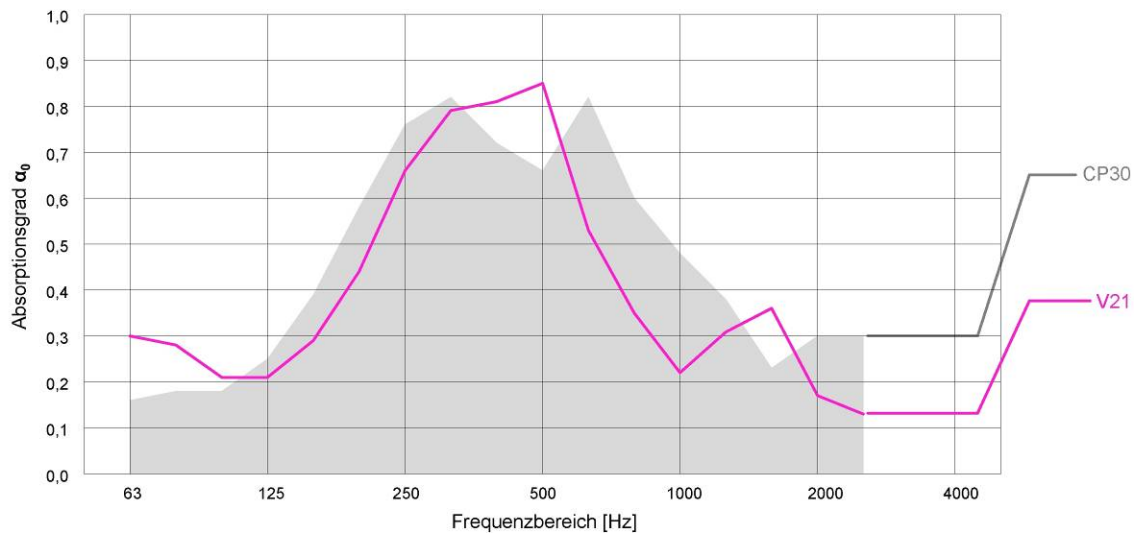


Abb. 62: Messung V-21 im Kundt'schen Rohr, Wandabstand 50 mm

3.5.4 Fazit

Aus den vorgenommenen Messungen haben sich zwei Tendenzen für die Weiterentwicklung ergeben.

Erstens: Je größer die Gesamtstärke eines Moduls, desto besser werden tiefe Frequenzen absorbiert. Dies konnte im Vergleich der gefalteten Demonstratoren unterschiedlicher Gesamtstärken und im Vergleich der BioCP30-Proben unterschiedlicher Stärke erkannt werden.

Zweitens: Je luftdurchlässiger der Kern, desto besser kann die Mikroperforation wirken. Zu beobachten war dies zum einen im Vergleich der perforierten Kernfolien zu den luftdichten Kernfolien der gefalteten Proben, zum anderen in den schlechten Absorptionswerten der Twin-Sheet Proben mit luftdichtem Kern.

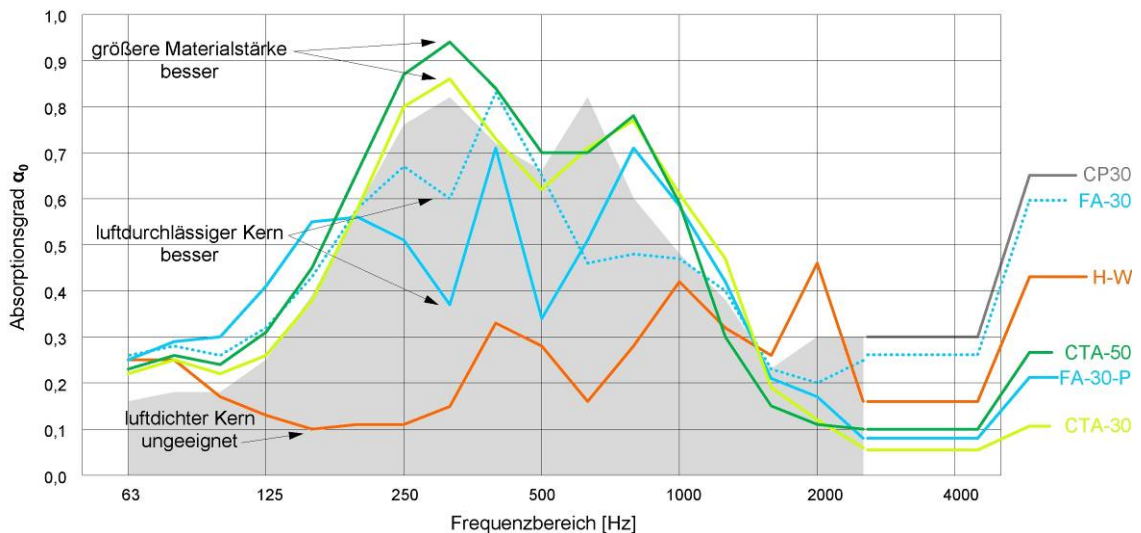


Abb. 63: Vergleich der Messwerte CTA-50, CTA-30, FA-30, FA-30-P, H-W

3.6 Produkttypologien und Proportionsstudien

3.6.1 Produkttypologie

Unter der Marke Rossoacoustic werden verschiedene Produkttypen vertrieben. Angefangen von Vorhangsystemen für den Einsatz am Fenster, über verschiebbare Akustikpaneele zur Verschattung oder Raumgliederung, bis hin zu akustisch wirksamen Paravents oder „Desk Panels“ zur Abtrennung von Arbeitsplätzen.

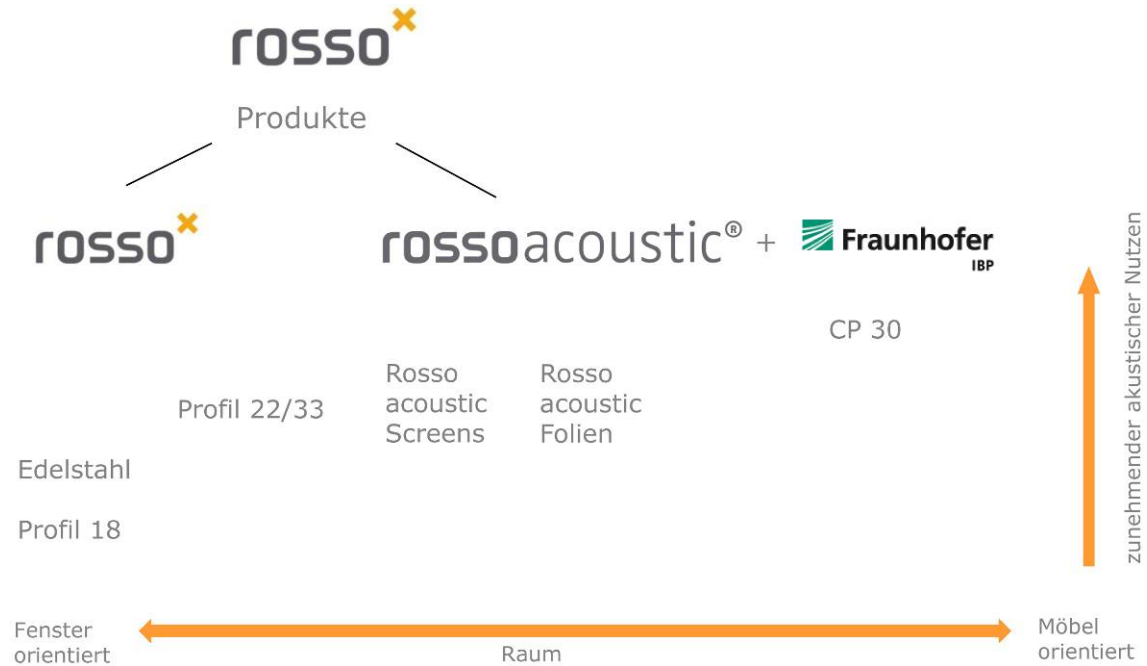


Abb. 64:Produktportfolio Rosso und Rossoacoustic

Mit dem BioComposites-Produkt wurde ein Produkttyp angestrebt, der sich in die vorhandene Rossoacoustic-Produktstruktur eingliedern lässt und sie bestenfalls ergänzt. Untersucht wurden fünf Produkttypen.

Paravent

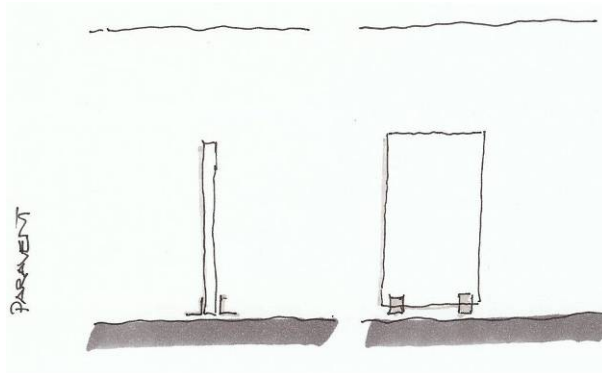


Abb. 65: Skizze Paravent

Der Paravent ist ein einfach verstellbares Paneel, das zur Raumbgliederung dient.

Dieser Produkttyp wurde als Ergänzung zum vorhandenen CP30-System angedacht. Als solche würde man die BioCP30 in denselben Formaten wie die CP30 anbieten. Zur Befestigung und Montage könnte man auf bereits vorhandene Beschläge zurückgreifen.

Mit dem Demonstrator BioCP30 hatte man bereits eine mögliche Herstellung für den Paravent recherchiert.

Nichttragende Trennwand

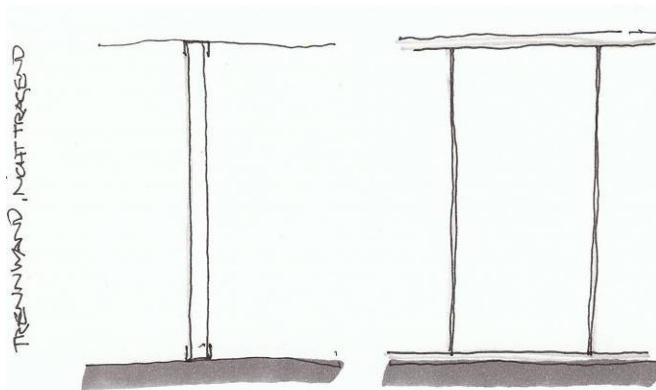


Abb. 66: Skizze nichttragende Trennwand

Die nichttragende Trennwand ist ein bauliches Wandelement, das zur räumlichen Separierung dient. Als fest montiertes Bauteil ist die Trennwand mit der Architektur verbunden.

Die Anschlüsse an Boden, Decke und benachbarte Trennwände, stellen in der Entwicklung dieses Produkttyps eine Herausforderung dar. Der Einsatz als raumhohes

Element verlangt außerdem eine Lösung im Umgang mit unterschiedlichen Raumhöhen. Als architektonisches Element sind größere Formate nötig, als beim Paravent. Sowohl in Herstellung, als auch im Vertrieb, stellen große Formate eine Herausforderung dar.

In der Rossoacoustic-Produktfamilie wäre die nichttragende Trennwand eine Neuheit. Mit der Produkteinführung könnte ein umfassenderes Akustikangebot angestrebt werden.

Verstellbares Trennelement

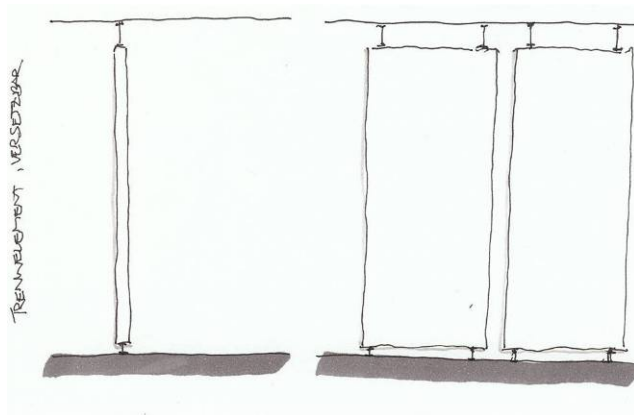


Abb. 67: Skizze verstellbares Trennelement

Als eine Mischung aus Paravent und Trennwand dient das verstellbare Trennelement zur Gliederung von Räumen.

Da die Anschlüsse zu Boden und Decken hier lösbar gestaltet sein sollen, ist deren Entwicklung noch anspruchsvoller als bei der Trennwand. Wie bei der Trennwand ist der Umgang mit unterschiedlichen Raumhöhen zu klären.

Das verstellbare Trennelement wäre im Rossoacoustic Portfolio als Weiterentwicklung des Produkttyps Paravent zu sehen.

Modulwand „Glasbaustein“

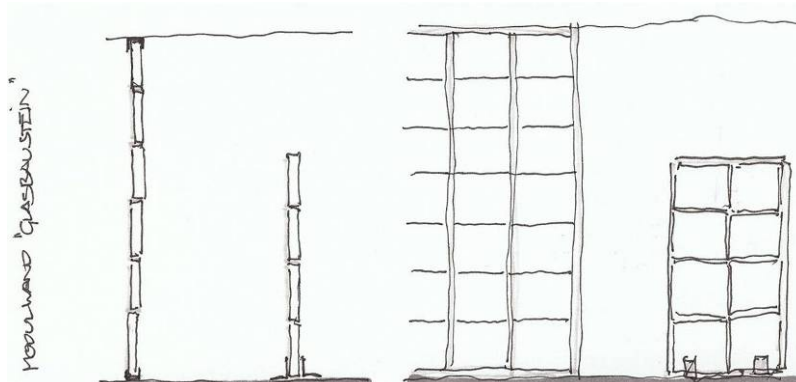


Abb. 68: Skizze Modulwand

Anders als bei den Produkttypen Paravent, Trennwand und Trennelement, recherchierte man hier ein Produkt mit Modulcharakter. Die Modulwand dient vielmehr dem Bauen von Räumen, als deren Separierung. Mit der Modularität kommt auch Flexibilität: durch Addition von Bausteinen werden freistehende Räume, Wände, Desk-Panels oder Möbel geschaffen. Dabei ist die Größe des Objekts stufenweise anpassbar.

An die Verbindungen der Elemente untereinander werden hier höchste Ansprüche gestellt. So müssen sie zum einen in der Addition genug Stabilität aufweisen um Hebelkräften standzuhalten, zum anderen sollten die Verbindungen lösbar ausgeführt sein. Wie bei den schon besprochenen Produkttypen, sind Anschlüsse an Boden und Decke zu klären.

Im Rossoacoustic Portfolio könnte man mit der Modulwand, dem Paravent und den Flächenvorhängen einen grundverschiedenen Produkttyp gegenüberstellen.

Platte, Baustoff, Halbzeug

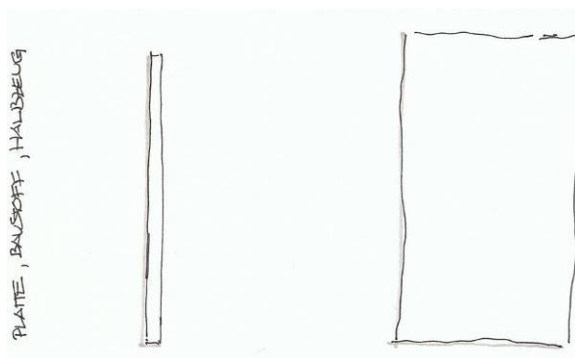


Abb. 69: Skizze Platte, Baustoff, Halbzeug

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Produkttypen recherchierte man hier die Möglichkeit, einen Baustoff oder Halbzeug ohne „Veredelung“ anzubieten.

Als Baustoff wird das Plattenmaterial an Schreiner, Innenausbauer oder Baumärkte verkauft. In der Entwicklung des Baustoffes entfallen die arbeitsintensivsten Entwicklungsschritte, wie die Ausarbeitung von Kantendetails, Anschlüsse, Beschläge und Formate. Demnach spart man in der Fertigung beachtliche Kosten ein und kann so ein günstiges Produkt auf den Markt bringen. Zudem erübrigt sich die Problematik des Verschnitts in der Produktion. Der Arbeitsaufwand in der Kundenbetreuung wäre im Vergleich zu anderen beratungsintensiven Rosso und Rossoacoustic-Produkten überschaubar.

Die Einführung dieses neuen Produkttyps würde teilweise neue Vertriebswege und die Akquise eines neuen Kundenstamms nach sich ziehen. So stellt die Eingliederung eine gewisse Herausforderung dar.

Fazit

In der weiteren Entwicklung wurden die Produkttypen „Nichttragende Trennwand“ und „Verstellbares Trennelement“ verworfen. Da der Einsatz beider Produkttypen als raumhohe Trennung angedacht war, fürchtete man, dass neben einer räumlichen Trennung, auch eine akustische Abtrennung erwartet werden würde. Dies entsprach allerdings nicht der akustischen Zielsetzung, in der man akustische Schirmung und Absorption, nicht aber Isolation definiert hatte.

Die Produkttypen Paravent, Modulwand und Halbzeug/Platte wurden weiterverfolgt. Auch der Einbau in Möbeln und die Kombination mit Licht als vertikale, leuchtende Fläche wurden angedacht.

3.6.2 Proportionsstudien und Modularisierung

Aufgrund der untersuchten Herstellungsmethoden und deren maximal möglichen Abmessungen, konzentrierte man sich in den Proportionsstudien auf Modularisierungen unterschiedlicher Art.

In den Untersuchungen wurden grundsätzlich drei unterschiedliche Typen der Modularisierung betrachtet: quadratische Module, horizontal angeordnete Längsmodule und vertikal angeordnete Längsmodule.

Die Module wurden in unterschiedlichen Anwendungen geprüft: als Paravent, als raumhohe Trennwand, als Desk-Panel und vertikal von der Decke abgehängt, als sogenannter „Baffle“. Bei der Wahl der Formate und Proportionen baute man auf den Studien auf, die man bereits in der Entwicklung der CP30 gemacht hatte.

Quadratische Module



Abb. 70: 1.) Edra; 2.) Studio Arihiro Miyake; 3.) Koziol

Das Quadratraster ist als Inbegriff von Modularisierung zu sehen. Die Richtungslosigkeit der Module reduziert den planerischen Aufwand auf ein Minimum und erleichtert den Aufbau. Formal führt das Quadratraster die ebenfalls im Quadrat angeordnete Mik-

roperforation im Großen weiter. Mit den LED-Boards sind quadratische Module in der Rosso Schwesterfirma Nimbus bereits stark vertreten. Die Einführung eines quadratischen Moduls bei Rosso würde diese Entwicklungsgeschichte also fortführen.

In den quadratischen Modulen wurden unterschiedliche Formate untersucht: 20 cm, 30 cm und 40 cm Seitenlänge.

Modul 20/20

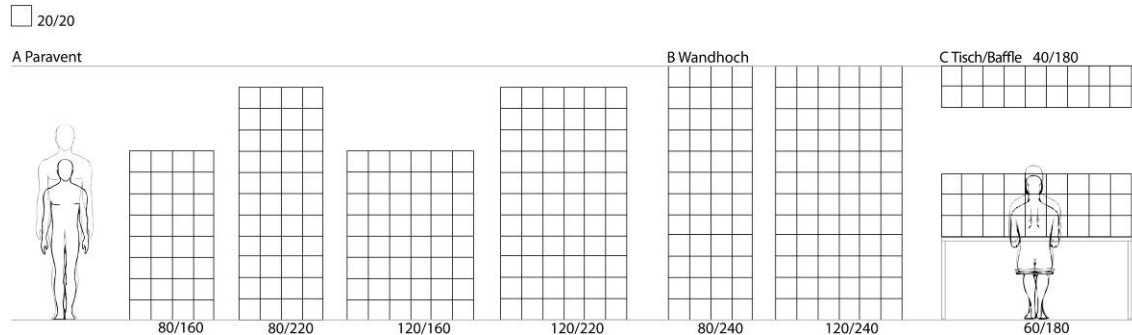


Abb. 71: Module 20/20

Mit dem Modul von 20 cm Seitenlänge können alle angestrebten Formate errichtet werden. Tische mit einer gängigen Breite von sowohl 180 cm als auch 200 cm werden mit bündigem Abschluss bestückt. Mit relativ kleinen Schritten von 20 cm passt sich das Modul an viele gängige Raumhöhen an.

Modul 30/30

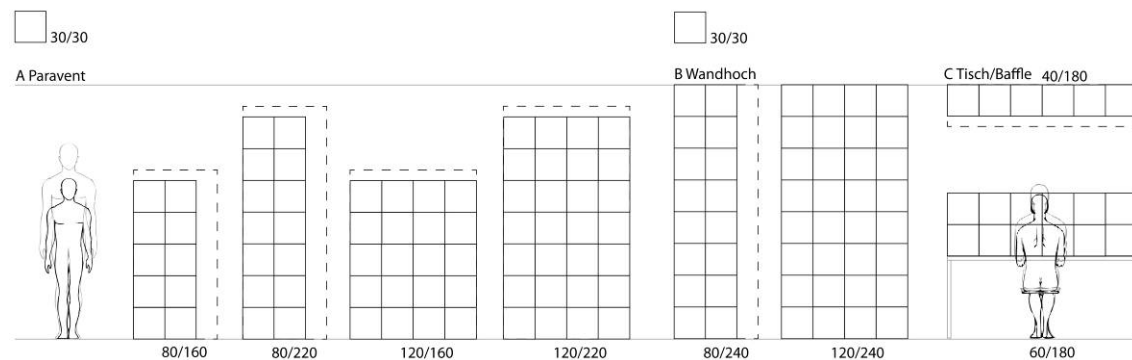


Abb. 72: Module 30/30

Mit einer Seitenlänge von 30 cm können viele der angestrebten Formate nicht abgebildet werden. Zudem kann zwar eine Tischbreite von 180 cm mit einem bündig abschließenden Desk-Panel versehen werden, bei dem zweiten gängigen Tischmaß von 200 cm ist dies allerdings nicht möglich.

Modul 40/40

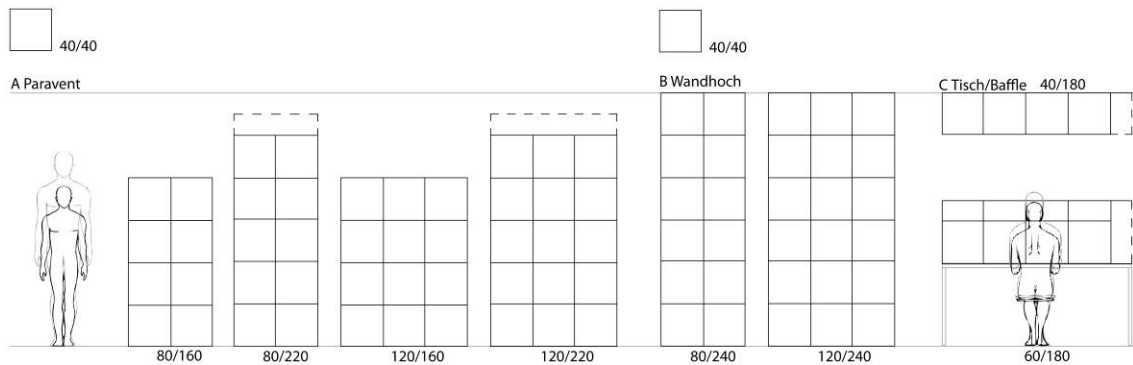


Abb. 73: Module 40/40

Mit dem 40er Modul können einige der angestrebten Formate nicht errichtet werden. Vor allem die Breite und Höhe eines Desk-Panels bei einem Tischmaß von 180 cm sind problematisch. In der raumhohen Anwendung können Schritte von 40 cm zu Schwierigkeiten führen. Im Vergleich zu einem 20er Modul spart man allerdings beim Aufbau viele Teile ein. Für ein Paneel der Größe 80 cm x 160 cm benötigt man zum Beispiel 32 20er Module, aber nur 8 40er Module.

Modul 40/40 in Kombination mit Modul 20/20

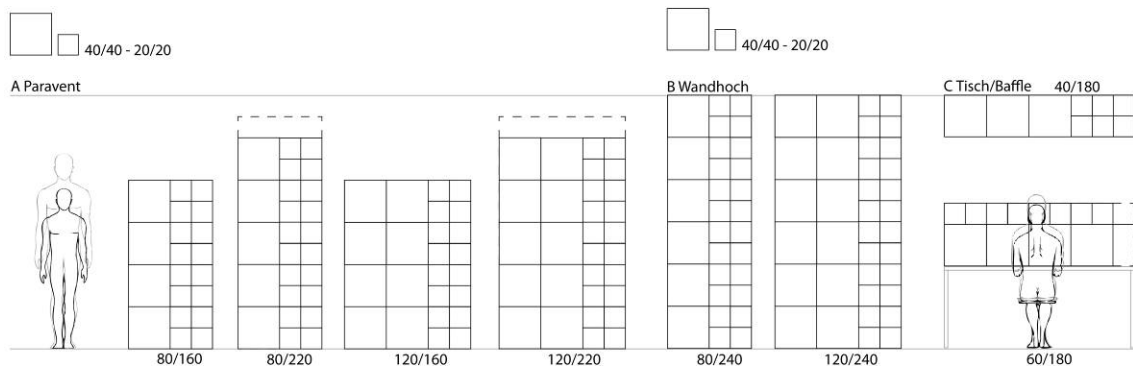


Abb. 74: Module 40/40 in Kombination mit Modulen 20/20

Mit einer Kombination aus 40er und 20er Modulen wird eine einfachere Anpassung in der Höhe und an Tischbreiten ermöglicht. Allerdings bedeuten zwei Module sowohl planerisch, als auch produktionstechnisch einen Mehraufwand.

Horizontale Module

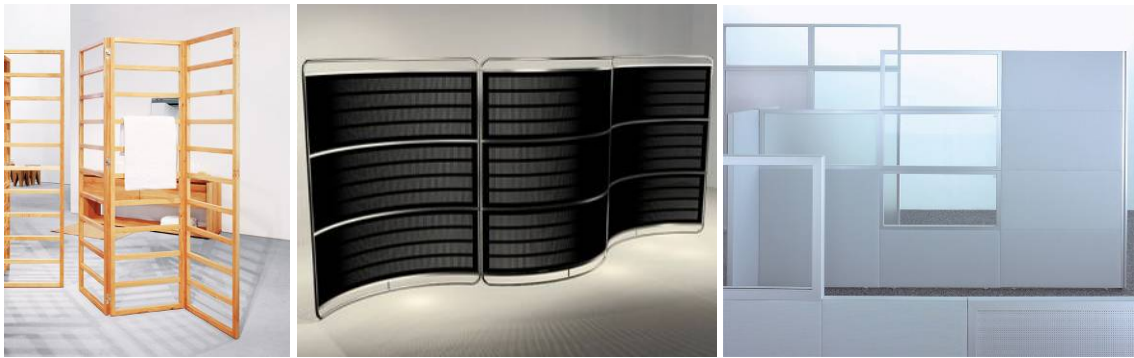


Abb. 75: 1.) Paravent von e15; 2.) Henrik Tengler: Swing; 3.) Preform

Im Unterschied zu quadratischen Modulen, hat man bei Längsmodulen nicht den Anspruch, alle Anwendungen mit nur einem Format zu ermöglichen. Vielmehr dachte man die Einführung von unterschiedlichen Standardbreiten an. Verschiedene Höhen werden durch die Addition der Module nach oben erreicht. Damit ist auch eine Anpassung auf individuelle Breiten vorstellbar.

Allgemein stellen die Verbindungen nach oben (horizontale Verbindungen) eine größere Herausforderung dar, als die Verbindungen zur Seite (vertikale Verbindungen). Durch die Addition nach oben wird die Formstabilität beeinträchtigt. Diese muss durch die Verbindungsstücke wiederhergestellt werden.

Untersucht wurden die vier Höhen 10 cm, 20 cm, 30 cm und 40 cm.

Horizontalmodul 10

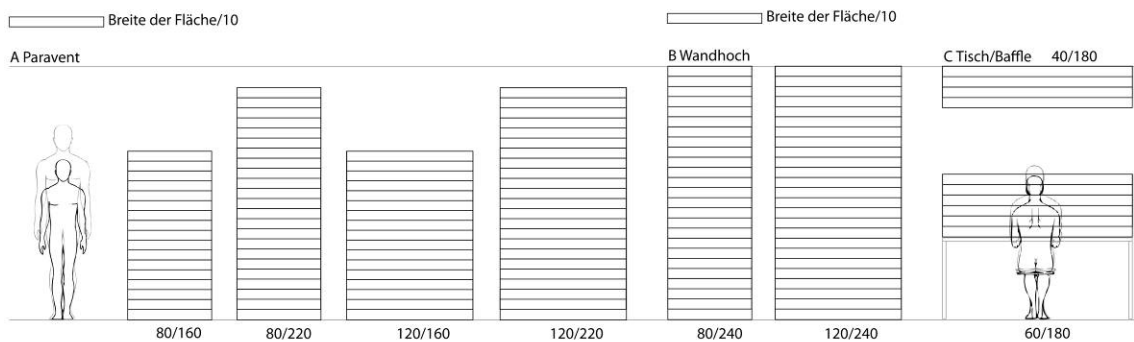


Abb. 76: Horizontale Längsmodule, Höhe 10 cm

Mit einer feinen Höhenstaffelung von nur 10 cm, ist jedes der angestrebten Formate abbildbar. Die Höhenanpassung in raumhohen Anwendungen lassen sich einfach umsetzen. Da sich die Module über die gesamte Breite erstrecken, hält sich die Anzahl der Module für ein Standardpaneel von 80 cm auf 160 cm, trotz der kleinen Höhenabmessungen von 10 cm, in Grenzen.

Horizontalmodul 20

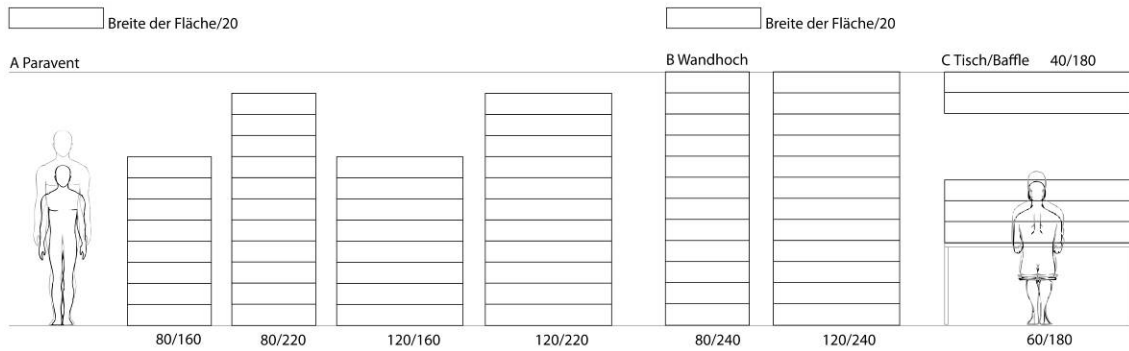


Abb. 77: Horizontale Längsmodule, Höhe 20cm

Wie bei den quadratischen 20er Modulen sind hier alle angestrebten Formate möglich. Im Vergleich zu den 10er Modulen reduziert sich die Modulanzahl bei gleicher Fläche um die Hälfte.

Horizontalmodul 30

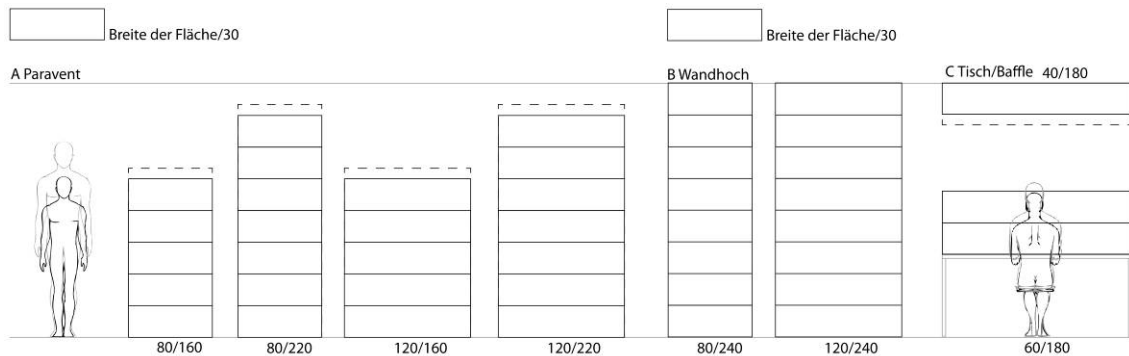


Abb. 78: Horizontale Längsmodule, Höhe 30cm

Die Höhen der angestrebten Formate sind mit dem 30er Modul teilweise nicht ganz zu erreichen. Die Kombination von 2 Modulen als Desk Panel, also 60 cm, eignet sich andererseits besonders gut.

Horizontalmodul 40

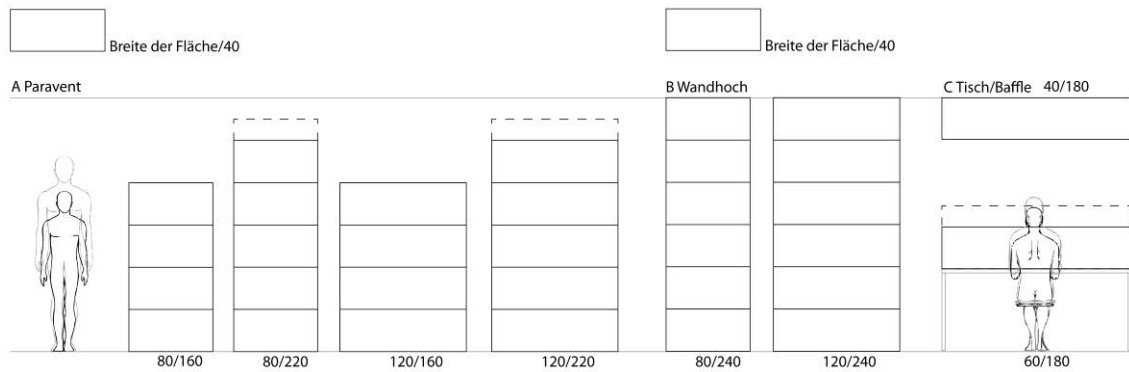


Abb. 79: Horizontale Module, Höhe 40cm

Die angestrebten Formate werden mit dem 40er Modul teilweise nicht ermöglicht. In der Anwendung als Desk Panel muss zwischen 40 cm (eher zu niedrig) und 80 cm (ziemlich hoch) entschieden werden. In der raumhohen Anwendung sind Abstufungen von 40 cm eher ungeeignet. Mit einer Höhe von 40 cm werden die Module im Vergleich zu 10 cm oder 20 cm Höhe unhandlicher und schwerer. Um eine Höhe von 160 cm zu erreichen benötigt man hier allerdings nur 4 Module, statt, wie bei den 10er Modulen, 16.

Vertikale Module



Abb. 80: 1.) Eames Trennwand; 2.) Ligne Roset; 3.) Fritz Hansen

Wie bei den Horizontalmodulen hat man bei Vertikalmodulen nicht den Anspruch, alle Anwendungen mit nur einem Format zu ermöglichen. Hier werden statt Standardbreiten, Standardhöhen angeboten. Verschiedene Breiten werden durch die seitliche Addition der Module erreicht. Eine Anpassung auf individuelle Höhen ist denkbar. Dies erleichtert vor allem die Anwendung als raumhohe Trennwand. Im Gegensatz zur horizontalen Addition, ist die Addition zur Seite praktisch endlos möglich.

Bei einer Addition zur Seite werden die Verbinder nicht so sehr beansprucht. Eine vertikale Formstabilität ist durch die Ausrichtung der Module bereits gewährleistet. Da die

angestrebten Formate in der Regel eine größere Höhe als Breite aufweisen, ist die Zahl der Module je Standardpaneel bei vertikalen Modulen geringer.

Die Breiten 10 cm, 20 cm und 40 cm wurden hier untersucht.

Vertikalmodul 10

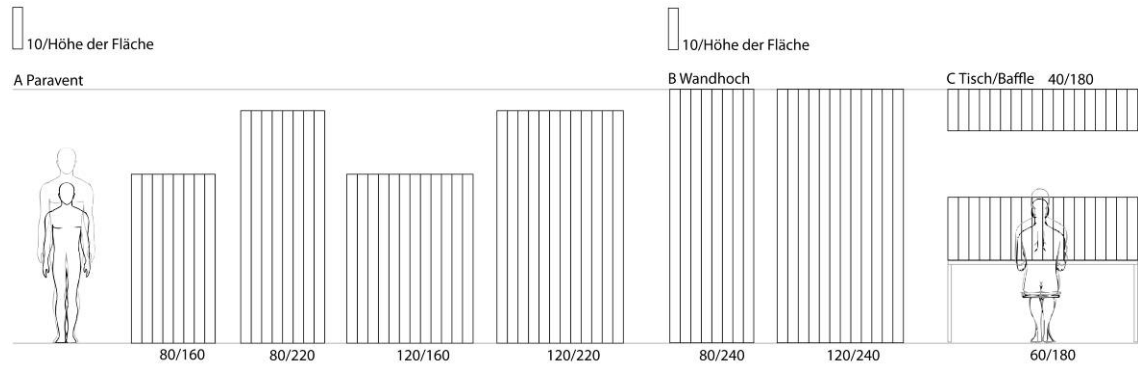


Abb. 81: Vertikale Längsmodule, Breite 10 cm

Mit dem 10er Modul werden alle angestrebten Formate abgebildet. Neben den gängigen Tischbreiten von 180 cm oder 200 cm, kann auch auf individuelle Breiten gut eingegangen werden. Schmale Module dieser Art bieten sich vor allem zur passgenauen Errichtung einer Trennung zwischen zwei Wänden an.

Vertikalmodul 20

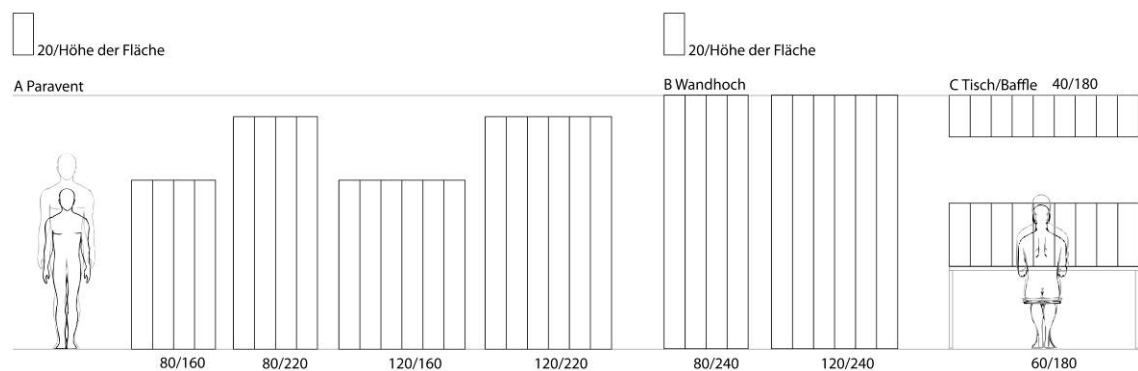


Abb. 82: Vertikale Längsmodule, Breite 20 cm

Auch mit dem 20er Modul erreicht man alle angestrebten Formate. Die Addition zur Seite ist mit Abstufungen von 20 cm noch immer flexibel gestaltet. Die Anzahl der Module halbiert sich im Vergleich zum 10er Modul.

Vertikalmodul 40

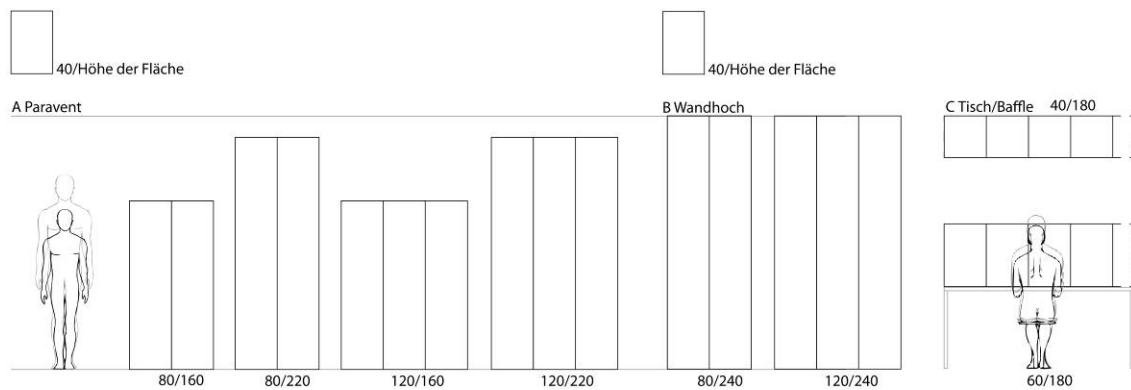


Abb. 83: Vertikale Längsmodule, Breite 40 cm

Die gängige Tischbreite von 180 cm kann mit dem 40er Modul nicht bündig abschließend erreicht werden. Die Anzahl der Module reduziert sich im Vergleich zum 20er Modul wieder auf die Hälfte. Allerdings scheinen die Module - vor allem in ihrer Anwendung als 80 cm schmales Paneel- etwas wuchtig und sind zudem unhandlicher.

Fazit

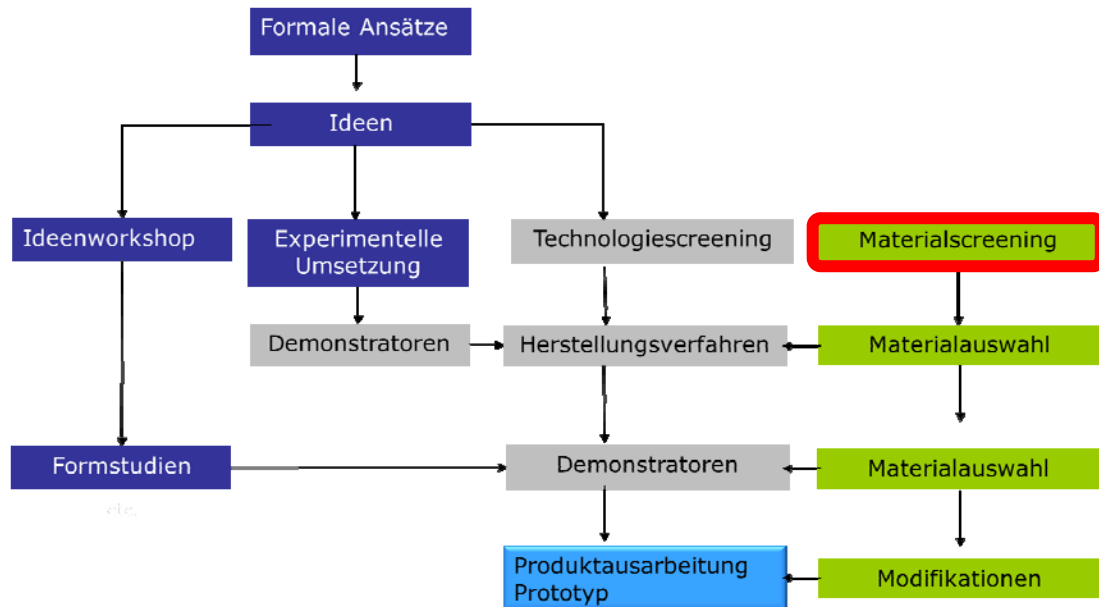
In einem Feedbackgespräch sagte Stefan Behnisch (Behnisch Architekten), er wäre nicht auf die Idee gekommen, das quadratische Modul in Frage zu stellen. Das Quadrat erscheint als logische Weiterentwicklung der Gestaltungshaltung von Nimbus und Rosso. Die Richtungslosigkeit der Module vereinfacht zudem Planung und Aufbau.

Für alle Module gilt: Je kleiner die Module, desto besser und flexibler kann auf die vorgefundenen Gegebenheiten eingegangen werden, aber desto mehr Teile werden benötigt. Eine höhere Modulzahl bringt durch eine größere Addition von Wandungen gleichzeitig mehr Gewicht und durch den höheren Materialeinsatz auch einen höheren Quadratmeterpreis. Zudem erhöht sich die Anzahl der Verbindungsstücke zwischen den Modulen und damit erhöhen sich auch die potentiellen Schwachstellen im Verbund. Je größer die Module, desto weniger flexibel anpassbar ist das System, aber desto einfacher und schneller ist der Aufbau.

Die Herausforderung bei der Wahl der Modulgrößen lag also darin, das richtige Mittelmaß zwischen Flexibilität, Einfachheit im Aufbau, Stabilität, Preis und Gewicht zu finden.

3.7 Materialscreening – Vorauswahl geeigneter Biokunststoffe und Halbzeuge

Im ersten Schritt des Materialscreenings wurde unter Berücksichtigung der in 3.7.1 genannten Anforderungen nach Halbzeugen (z.B. Folien und Platten) aus biobasierten Kunststoffen und Biokunststoffgranulaten recherchiert, die sich unmittelbar und ohne Modifikationen in Innenräumen einsetzen lassen.



3.7.1 Anforderungen

Musterbauordnung (MBO)

Bei der Entwicklung von Bauprodukten aus biobasierten Kunststoffen stellt sich die Frage, welche Anforderungen und gesetzlichen Regelungen diese erfüllen müssen.

Die Bauproduktenrichtlinie 89/106/EWG ist in Deutschland durch das Bauproduktengesetz vom 10.8.1992 umgesetzt. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union haben auf Vorschlag der Europäischen Kommission am 9. März 2011 eine neue Verordnung zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten erlassen. Die Bauproduktenverordnung (EU) Nr. 305/2011 ersetzt ab Juli 2013 die Bauproduktenrichtlinie (89/106/EWG).

In der Bauproduktenverordnung ist folgendes verankert:

"Bauwerke müssen als Ganzes und in ihren Teilen für deren Verwendungszweck tauglich sein, wobei insbesondere der Gesundheit und der Sicherheit der während des gesamten Lebenszyklus der Bauwerke involvierten Personen Rechnung zu tragen ist ..."¹⁷

Dabei werden folgende, allgemein formulierte Grundanforderungen an Bauwerke und ihre Bauteile formuliert:

"- mechanische Festigkeit und Standsicherheit

- Brandschutz
- Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz (z.B. Freisetzung giftiger Stoffe)
- Sicherheit und Barrierefreiheit bei der Nutzung
- Schallschutz
- Energieeinsparung und Wärmeschutz
- nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen" ¹⁸

Für den Einsatz von Bauprodukten in Deutschland gelten die Anforderungen der jeweiligen Landesbauordnungen (LBO). Die Musterbauordnung (MBO) ist eine Standard- und Mindestbauordnung, die den Ländern als Grundlage für deren jeweilige Landesbauordnungen (LBO) dient. In der aktuellen **MBO** vom Oktober 2008 ist im **Vierten Abschnitt - Wände, Decken, Dächer** unter dem **§ 26 Allgemeine Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen** folgendes verankert:

" (1) Baustoffe, die nicht mindestens normal entflammbar sind (leicht entflammbare Baustoffe) dürfen nicht verwendet werden; dies gilt nicht, wenn sie in Verbindung mit anderen Baustoffen nicht leicht entflammbar sind."

Leicht entflammbare Baustoffe entsprechen nach der **DIN 4102** der Baustoffklasse B3 und nach der neuen EU-Norm **DIN EN 13501** der Baustoffklasse F.

Wenn die im Forschungsprojekt zu entwickelnden Akustikleichtbauplatten zur Raumtrennung eingesetzt werden, greift die Norm **DIN 4103 für nicht tragende, innere Wände (Trennwände)**.

Trennwände müssen so ausgebildet werden, dass sie statischen und stoßartigen Belastungen standhalten können.

Nach **§ 29 Trennwände** der **Musterbauordnung (MBO)** gelten folgende Brandschutzanforderungen:

In den Gebäudeklassen 2 (gilt nicht für Wohngebäude) bis 5 muss der Feuerwiderstand 30 Minuten betragen (F30 – feuerhemmend)

Klasse				
1	freistehende Gebäude	H ≤ 7 m	max. 2 Nutzungseinheiten ≤ 400m ²	Gebäude geringer Höhe
2	Gebäude	H ≤ 7 m	max. 2 Nutzungseinheiten ≤ 400m ²	
3	sonstige Gebäude	H ≤ 7 m		
4	Gebäude	H ≤ 13 m	Nutzungseinheiten ≤ 400 m ²	Gebäude mittlerer Höhe
5	sonstige Gebäude einschließlich unterirdischer Gebäude			
	Hochhäuser	H > 22 m		

Tabelle 1: Gebäudeklassen nach der Musterbauordnung

Die in der **DIN 4102-4** (Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile) genannten Baustoffe sind ohne weitere Brandprüfung in die dort angegebene Baustoffklasse eingereiht. Da biobasierte Kunststoffe eine für das Bauwesen neue Werkstoff-

klasse darstellen, sind diese nicht aufgelistet. In diesem Fall muss die Baustoffklasse durch Brandprüfungen ermittelt werden.

Werden die Akustik-Leichtbauplatten als Raumgliederungselement eingesetzt, so greift die Norm **DIN 1023 Büromöbel – Raumgliederungselemente**, die in der DIN 1023-1-3 Maße, mechanische Sicherheitsanforderungen und Prüfungen (Stand sicherheits- und Loslöseprüfung) behandelt.

Bei der Frage, welche Dauergebrauchstemperatur von vorhandenen und zu modifizierenden Biokunststoffen erreicht werden muss, konnte in Regelwerken und baurechtlichen Bestimmungen keine Antwort gefunden werden. Es muss stets die Standsicherheit gewährleistet sein. Daher werden die Wärmeformbeständigkeits- und Dauergebrauchstemperaturen vorhandener Kunststoffe zu Rate gezogen, die in Architekturanwendungen zu finden sind:

	max. Anwendungstemperatur		HDT-B ISO75	HDT-A	Vicat- ISO 306 (B 50)	Quelle
	kurzzeitig °C	dauernd °C				
PETG (z.B. Vivak)		65,00	70- 72	63-68	80,00	1
A-PET (amorph)		65,00	70,00	63,00		2
PC	160,00	135,00	137,00	128,00	150 (VST/B/50)	3
PMMA	85,00	70,00	100,00	97,00	100,00	4
PE-LD	80-90	60-75	41,00			5
PE-HD	90-120	75-90	86,00	49,00	75,00	6
PVC U	70,00	60,00	61,00	69,00	77,00	7
PTFE			121,00	50,00		8
PP	140,00	100,00	105,00	65,00	90,00	9
PS	80,00	50-70			84,00	10

Tabelle 2: Wärmeformbeständigkeit und Gebrauchstemperatur (transparenter) von Kunststoffen, die in der Architektur angewendet werden

Fazit – baurechtliche, baupraktische, nutzungsbedingte und fertigungstechnische Anforderungen:

- Eine Dauergebrauchstemperatur von mindestens 65°C sollte erreicht werden
- Das Bauteil muss normal entflammbar sein und darf nicht brennend abtropfen.
Das Baumaterial (hier Biokunststoff) sollte daher auch mindestens die Baustoffklasse B2 (DIN 4102) oder die DIN EN 13501 die Euroklasse D oder E Brandklasse nach UL (Underwriter laboratories) 94 V1
- Der Feuerwiderstand des Bauteils muss 30 Minuten betragen

- Abgabe gefährlicher Stoffe in Anlehnung an **DIN EN15102 Dekorative Wandbekleidungen – Rollen- und Plattenform:**

Höchstwert Formaldehydabgabe: 120mg/kg, Abgabe von Schwermetallen und anderen Substanzen (z.B. Cadmium 25 mg/kg), max. Abgabe von Vinylchloridmonomer 0,2 mg/kg

Anforderungen hinsichtlich Ästhetik und Verarbeitung

- Transparent und transluzent
- Keine Rollneigung
- Weitgehend kratzfest
- Stanzbar
- Verformbar unter Vakuum und Wärme
- Ritzbar (Ritzprägen fürs Falten)
- faltbar

3.7.2 Vorhandene Halbzeuge aus biobasierten Kunststoffen

Es wurden folgende, auf dem Markt verfügbare Halbzeuge (hier Folien) identifiziert: Folien aus Cellulosetriacetat, Cellulosediacetat und Polylactid.

Cellulosetriacetat (CTA)

Folien aus CTA werden als Polarisator-Basisfolie für LCD-Bildschirme, beim Transferdruck, als Trennfolie für die Leiterplattenherstellung oder als Vorlaufstreifen zur Filmentwicklung verwendet. Die Folie ist nicht, bis sehr eingeschränkt, thermisch verformbar und lässt sich mit dem Wärmeimpulsverfahren verschweißen.

Sie lässt sich sehr gut ritzbrechen und wird daher auch beim Trickfilm eingesetzt (Schablonen). Die Folien sind hochtransparent und bilden keine Newtonschen Ringe (regenbogenfarbene Schlieren) auf. Aufgrund seiner Hygroskopizität verhalten sich CTA-Formteile antistatisch und verstauben weniger leicht als andere Kunststofffolien.

CTA-Folien werden im Gießverfahren hergestellt. Die (mechanischen) Eigenschaften sind daher in Längs- und Querrichtung gleich.

Folien aus Cellulosetriacetat sind je nach Beanspruchung in einem Bereich von -10 bis + 110°C temperaturstabil. Kurzzeitig bis 180°C. In Produktdeklarationen ist häufig zu lesen, dass Halbzeuge aus CDA und CTA aufgrund des hohen Anteils an Weichmachern (nicht biobasiert) selbstverlöschend sind. Bei Kontaktaufnahme mit entsprechen-

den Firmen wird darauf hingewiesen, dass dies im Einzelfall überprüft werden muss und die Zugabe von Flammschutzmitteln empfehlenswert sei.

CDA ist beständig gegen Öle, Fette, Benzine und aliphatische Kohlenwasserstoffe. Halbzeuge aus CDA sind nicht beständig oder löslich in Chlorkohlenwasserstoffen, Ketonen, Alkoholen, aromatischen Lösungsmitteln und Basen.

Cellulosediacetat (CDA)

CDA wird für polarisierte Sonnen- oder Skibrillen, für Flachbildschirmfolien, für Dämmungen (transparente Wärmedämmung) oder beispielsweise für Fingerabdruckfolien verwendet.

Die Eigenschaften sind weitestgehend mit denen von Cellulosetriacetat vergleichbar. Folien aus CDA lassen sich besser umformen und brechen nicht so leicht.

Der Rohstoff Diacetat wird dadurch produziert, dass Cellulose aus Holzschliff oder Baumwoll-Linters mit Essigsäureanhydrid behandelt wird. Die hieraus entstehenden Flocken werden mit einer kleinen Menge Weichmacher und Spuren eines Antiblockmittels (verhindert das Anhaften der Folien) gemischt. Nachfolgend werden sie auf ein Endlosband gegossen, um eine ungerectete Folie mit hervorragenden optischen Eigenschaften zu produzieren.¹⁹

Der Kilogrammpreis von CDA und CTA beträgt ca. 8,-€ pro Kilogramm.

Polylactid (PLA)

Polylactid wird aktuell vornehmlich in der Landwirtschaft (z.B. Mulch-Folien) oder in der Verpackungsindustrie (z.B. Plastiktüten, Joghurtbecher), aber auch für Kredit- und Gutscheinkarten, bei Cateringartikeln und zunehmend auch in der Elektronikindustrie verwendet (z.B. Gehäuse von USB, Handy, etc.).

Der nicht modifizierte Kilogrammpreis eines Standard-PLA liegt je nach Abnahmemenge bei ca. 1,40 -2,00 €.

3.7.3 Überprüfung der Umformbarkeit geeigneter Halbzeuge

Tiefziehversuche mit Cellulosetriacetatfolien

Die Abbildung 84 zeigt, dass sich Gießfolien aus CTA nur sehr bedingt umformen lassen. Als Werkzeug fungierte hier eine Holzplatte mit Halbkreisen (180°C).

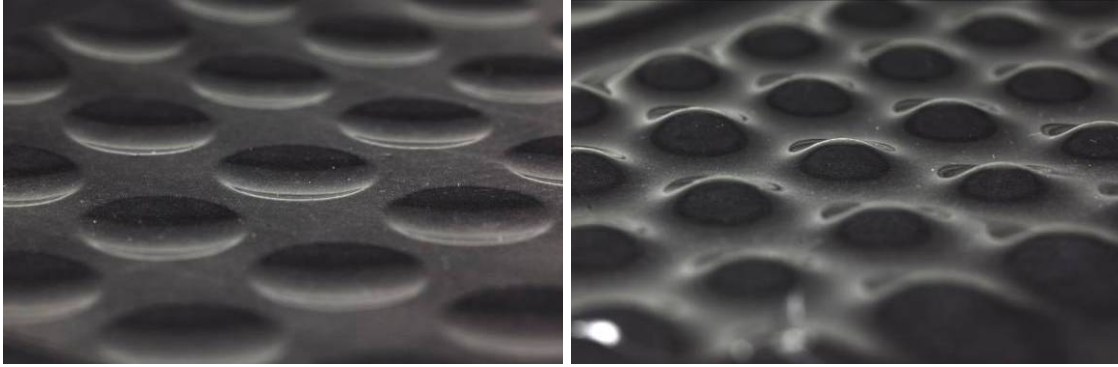


Abb. 84: Tiefziehversuche Cellulosetriacetatfolie (Folienunterseite, Folienoberseite)

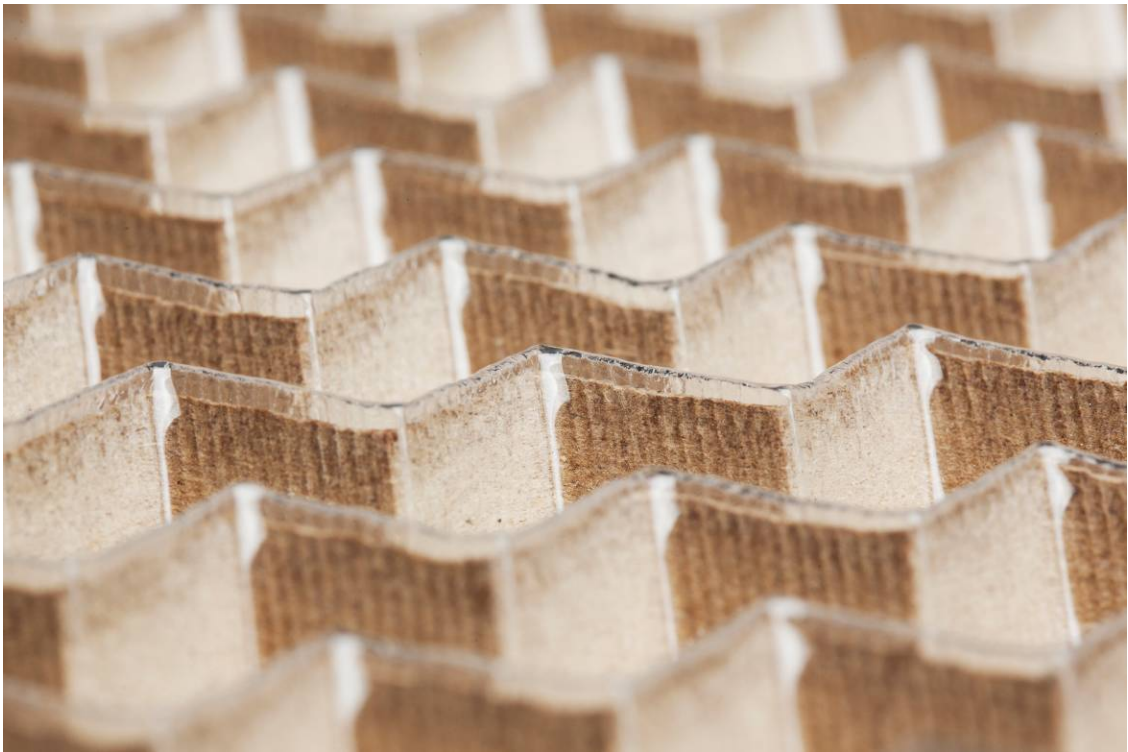


Abb. 85: Tiefziehversuch mit einer Folie aus Polylactid; Folie und Formwerkzeug

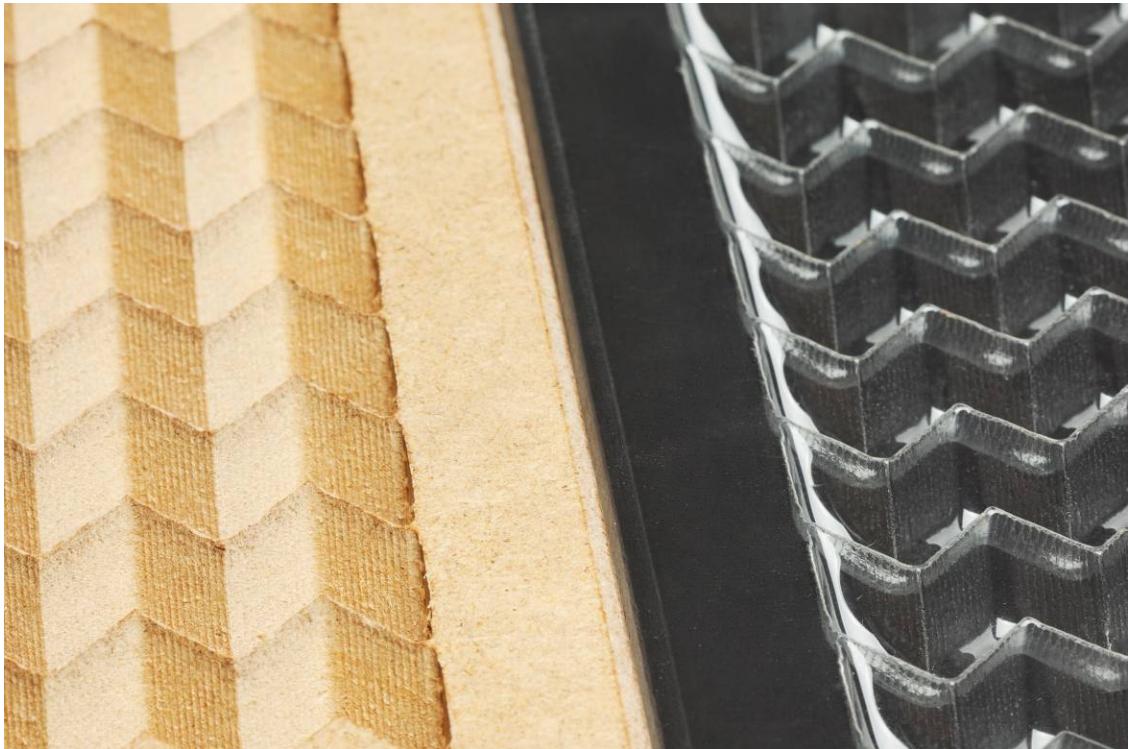


Abb. 86: Tiefzieh-Formwerkzeug (links) und Formkörper aus Polylactid (rechts)

Die Abbildungen 86 und 87 zeigen deutlich, dass sich Polylactid besser thermisch verformen lässt, als Cellulosediacetatfolien. Kanten wurden beispielsweise nicht exakt abgeformt und erscheinen als weiche Kurven. Auch feine Oberflächenstrukturen konnten nicht abgebildet werden.

Da Cellulosediacetatfolien über eine bessere Wärmeformbeständigkeit verfügen, als aktuell verfügbare Halbzeuge aus Polylactid, wurden diese dennoch weiter berücksichtigt. Sie wären eine Alternative für die Deckschichten der Sandwichplatten, für das Falten, Tiefziehen und das Twin-Sheet-Verfahren. Beim Vakuumverformen könnte die schlechtere Formbarkeit bereits beim Design des Sandwichkerns berücksichtigt und das Werkzeug entsprechend ausgelegt werden.

Cellulosediacetatfolien waren zudem die einzigen Halbzeuge, die auch als flamm-schutzausgerüstete Variante auf dem Markt erhältlich sind. Die Thermoverformbarkeit der Cellulosediacetatfolien wird durch das Flammenschutzmittel nicht beeinträchtigt (Abbildung 88).

Die Firma Celanese hat uns freundlicherweise im Labormaßstab eine Flamm-schutz-ausgerüstete CDA-Folie der Dicke 200 Mikron hergestellt, da diese lediglich in einer Dicke von 36 Mikron produziert werden. Bei einer Abnahme von 1,5 bis 2 Tonnen werden diese auch in anderen Dicken produziert.



Abb. 87: Tiefziehwerkzeug (links) und Formkörper aus Cellulosediacetat (rechts)



Abbildung 88: Tiefziehen einer flammgeschutztausrüsteten Cellulosediacetatfolie



Abb. 89: Unterseite des Formkörpers aus Cellulosediacetat: keine exakte Abformung



Abb. 90: Probleme beim Tiefziehen einer Biokunststoffolie: milchige Stellen

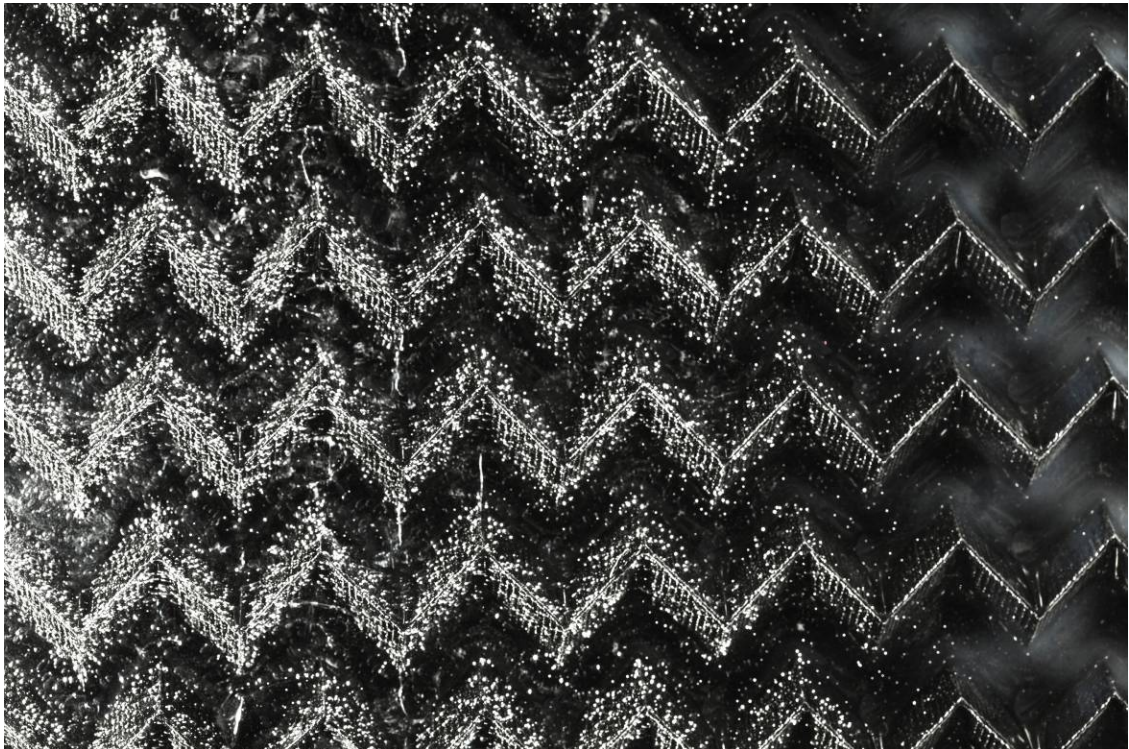


Abbildung 91: Probleme beim Tiefziehen einer Biokunststoffolie: Bläschenbildung

Tiefziehen mikroperforierter und kaschierter Folien: Das Tiefziehen führt zu einem geschlossenen Sandwichkern. Dies bringt den Nachteil mit sich, dass der Schall direkt zurückgeht. Winkel zur Streuung des Schalls sind dann vorteilhaft.

Eine Möglichkeit den geschlossenen Tiefziehkern im Sandwichbauteil zu öffnen, ist die Mikroperforation der Folie im Kern. Da das Thermoformen von Folien unter Vakuum erfolgt, lassen sich perforierte Folien nicht auf diesem Weg umformen. Daher wurde das Tiefziehen mikroperforierter und mit einer beidseitig angebrachten abziehbaren Schutzfolie versehen. Das Abformen des Werkzeuges ist nicht exakt möglich. Die für das Tiefziehen geeignete Schutzfolie löst sich, schmilzt und verzieht sich.

Des Weiteren verteuert der zusätzliche Fertigungsschritt der Kaschierung die Produktionskosten zusätzlich.



Abb. 92: Ergebnis des Tiefziehversuches einer mikroperforierten und kaschierten Bio-kunststoffolie

3.7.4 Ökologische Beurteilung vorhandener Halbzeuge und Granulate

	Werkstoff [Pellets]	Energieverbrauch [MJ/kg]	Treibhausgasemission [kg CO2 eq./kg polymer]
bio-basiert	PLA	76.0 ³⁾	1.55 ³⁾
	PLA	54.0 ¹⁾	4.0 ¹⁾
	PLA ingeo 2009 CIT	42.2 ⁶⁾	1.3 ⁶⁾
	PLA Bioraffinerie	29.2 ¹⁾	1.9 ¹⁾
	PHA	94.0 ³⁾	1.9 ³⁾
	PHA Fermentation	81.0 ¹⁾	4.8 ¹⁾
	PHA Fermentation + Bioenergie	81.0 ²⁾	-0.5 ²⁾
	CA	89.0 ³⁾	2.2 ³⁾
erdöl-basiert	PMMA	112 ⁷⁾	3.8 ⁸⁾
	PET	82.7 ³⁾	3.4 ³⁾
	PET bottle grade	77.0 ²⁾	4.3 ²⁾
	PVC	59.3 ⁶⁾	2.7 ⁶⁾
	PUR	99.5 ¹⁾	5.9 ¹⁾
	HDPE	80.0 ²⁾	1.7 ²⁾
	PP	73 ⁶⁾	1.9 ⁶⁾
	PS	86.5 ⁵⁾	4.6 ⁵⁾
	PC	113.0 ⁴⁾	10.0 ⁴⁾

Tabelle 3: Vergleich des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bio- und erdölbasierter Kunststoffe

3.7.5 Fazit - Beurteilung vorhandener Halbzeuge und Granulate

Die unten stehende Tabelle zeigt, dass Cellulosedi- und Triacetatfolien zwar die gewünschten Gebrauchstemperaturen aufweisen, der Anteil nachwachsender Rohstoff durch den Herstellungsprozess, die Zugabe des notwendigen Weichmachers und anderer Additive bei ca. 50-80% liegt. Die Möglichkeiten zur Weiterbearbeitung sind bei Cellulosediacetat zufriedenstellend. Beim Design von Tiefziehstrukturen müsste man die etwas eingeschränkte Umformbarkeit von Cellulosediacetatfolien bei der Werkzeugauslegung berücksichtigen. Das Falten stellt kein Problem dar.

Cellulosetriacetat- und Cellulosediacetatfolien sowie Folien aus Polylactid lassen sich mikroporieren. Cellulosediacetatfolien würden sich hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit lediglich für die Deckschichten eignen. Beachten wäre hier zudem die notwendige Verbindung von Deckfolien mit dem Sandwichkern. Es lassen sich lediglich gleiche Polymerarten miteinander verschweißen, was sich bei eigenen Versuchen an der Hochschule für Medien in Stuttgart testen lies.

Polylactidfolien lassen sich hingegen problemlos ritzen, falten oder tiefziehen. Ein Bioanteil von 100% ist als sehr positiv zu bewerten. Polylactid weist jedoch eine nicht ausreichende Wärmeformbeständigkeit sowie ein nicht akzeptables Brandverhalten (brennende Tropfen mit Beitrag zur Brandausbreitung) auf. Diese Eigenschaften müssten daher im Forschungsprojekt verbessert werden, sollte man sich für Polylactid entscheiden.

	Foliendicke	tiefziehen	falten	Brandschutzlösung	Gebrauchstemperatur	Bioanteil
Cellulosediacetat					ca. 70-80°C	
z.B. Clarifoil	125µm	geht bedingt	geht	ja, bei einer Abnahme von 1,5-2 Tonnen	kurzzeitig bis 110°C	ca. 50%
	150µm	geht bedingt	geht			
	36µm					
Cellulosetriacetat		geht nicht	bricht	ja, bei einer Abnahme	ca. 70-80°C	
Z.B. Tacphan N	190µm			von ca. 2 Tonnen	kurzzeitig bis 110°C	ca. 50-80%
Polylactid					ca. 45-50°C	
	500µm	geht	geht	nein, muss entwickelt werden	kurzzeitig bis 60°C	ca. 100%
	250µm	geht	geht		muss verbessert werden	
Legende	positiv					
	negativ					

Tabelle 4: Gegenüberstellung vorhandener Biokunststoff-Halbzeuge

3.7.6 Fazit: Akustikmodul als Spritzgussteil

Siehe auch **Kapitel 4 – Entwicklung des Akustikmoduls**

Als Fazit aus dem Kapitel 3 – kann festgehalten werden, dass Aspekte und Fragen wie

- Anzahl notwendiger Verfahrensschritte zur Realisierung des Endproduktes
- Vorhandensein von Halbzeugen und Werkstoffen oder besteht die Notwendigkeit einer Modifikation und somit die Entwicklung eines modifizierten Biokunststoffes?
- Resultierender Endpreis pro m²
- Ergebnisse der akustischen Messungen der Demonstratoren im Kundtschen Rohr
- Möglichkeiten zur Realisierung unterschiedlicher Produktvarianten ohne großen Mehraufwand

Zur Entscheidung für eine Fertigungstechnologie maßgeblich beitragen.

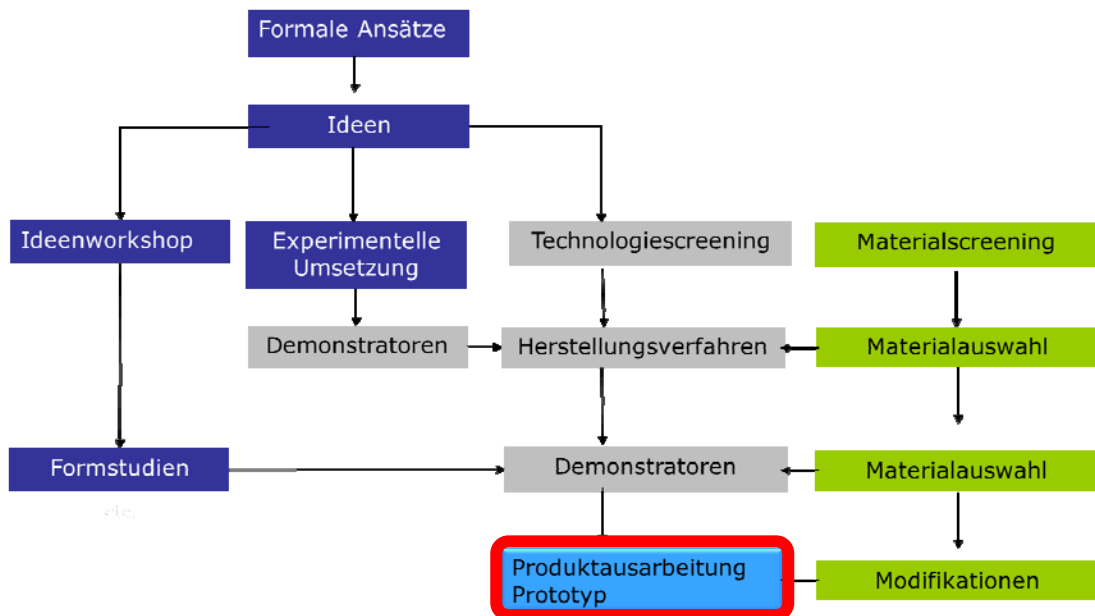
Nachdem dem Geschäftsführer der nimbus group die Demonstratoren, deren akustische Messungsergebnisse sowie Fertigungsmethoden etc. dargestellt wurden, formulierte dieser abschließend:

„Es wäre ideal, wenn wir ein Verfahren finden, das alle Fertigungsschritte von CP30 in sich vereint. Ein Produkt, das fertig aus der Maschine fällt...“

(Dietrich Brennenstuhl, Geschäftsführer der nimbus group)

Das Spritzgussverfahren bietet die Möglichkeit, viele Herausforderungen wie z.B. die perforierte Deckschicht, Kantenlösungen und den Sandwichkern in einem Herstellungsschritt zu vereinen.

4 Entwicklung des Akustikmoduls



4.1 Produkttypus

4.1.1 Produkttyp mit Modulcharakter

Mit der Entscheidung für Spritzguss als Herstellungsverfahren wurde die maximal mögliche Größe des Teils als Bedingung vorgegeben. Gleichzeitig ist Spritzguss ein Verfahren, das auf große Stückzahlen ausgelegt ist und erst bei großer Stückzahl rentabel wird. Die Bedingungen der begrenzten Teileabmessungen und der unbegrenzten Stückzahl hatten die Entwicklung eines addierbaren Produkts mit Modulcharakter zur Folge.

Mit dieser Entscheidung für ein modulares System hat man sich gleichzeitig für ein völlig neuartiges Produkt im Rossoacoustic Produktportfolio entschieden. Dem Paravent und den Flächenvorhängen wird ein grundverschiedener Produkttyp gegenübergestellt.

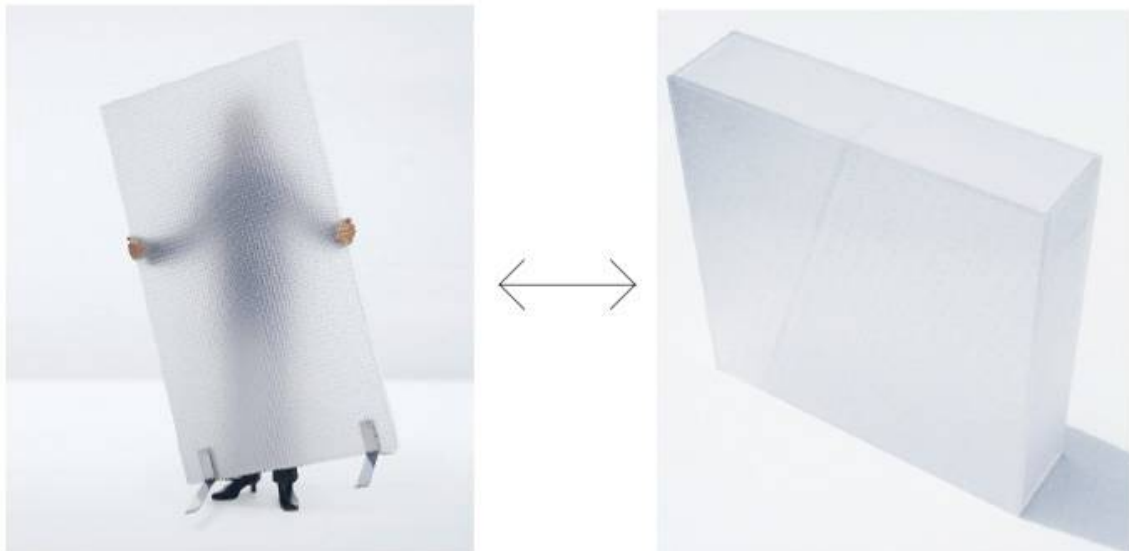


Abb. 93: Rossoacoustic CP30 und Biocomposites Modul Rossoacoustic CP30 und Biocomposites Modul

4.1.2 Anwendung

Wie beim CP30 Paneel ist auch beim Biocomposites Produkt eine der Hauptanwendungen am Arbeitsplatz. So können sowohl benachbarte Arbeitsplätze voneinander abgetrennt werden, als auch, über den Einsatz als Desk Panel, gegenüberliegende. Anders als bei der CP30 bietet das Biocomposites Modul jedoch die Möglichkeit, die Höhen und Breiten individuell stufenweise anzupassen. Zum Beispiel können Abtrennungen zu Laufwegen hin höher ausgebildet sein. Desk Panels können je nach Arbeitssituation halbhoch oder über Kopf hoch errichtet werden. Zur Verdeckung der Bildschirmrückseite können höhere Ecken gebaut werden.



Abb. 94: Darstellung Anwendung am Arbeitsplatz

Neben den untersuchten Anwendungen als Paravent, Desk Panel und Baffle ergeben sich beim Biocomposites Modul zusätzlich eine Reihe weiterer möglicher Anwendungen.

Trennwand/Empfang

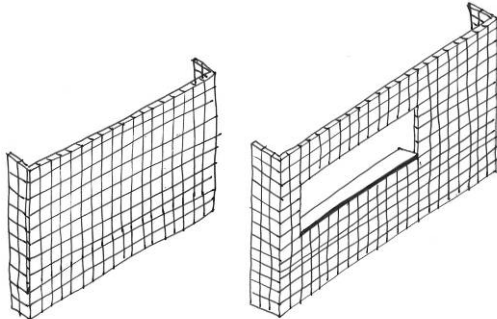


Abb. 95: Anwendungsskizze Trennwand/Empfang

Viel ausgeprägter als bei der CP30, wird mit dem Biocomposites Modul die Ausbildung von Trennwänden ermöglicht. Die Verbindungen der Elemente sind stabiler ausgeprägt und eine Addition zur Seite ist praktisch endlos möglich. Die Höhen sind durch die Module stufenweise anpassbar. Durch die Ausformung von Ecken oder Rippen kann mehr Stabilität erreicht werden. Im Einsatz als Empfang ist die Ausbildung von Fensteröffnungen denkbar.

Möbel

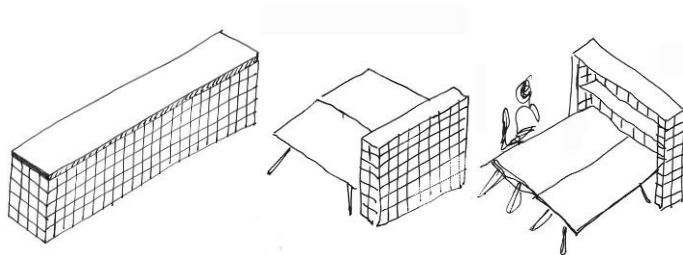


Abb. 96: Anwendungsskizze Tresen, Arbeitsplatzabtrennung, Regal

Mithilfe eines 90° Verbinders können die Biocomposites Module auch über Eck addiert werden. Damit ergibt sich die Möglichkeit, auch Möbel mit akustischer Funktion zu bauen. Beim Bau eines Tresens oder eines Regals zur Arbeitsplatzabtrennung ist eine Kombination mit Plattenmaterial denkbar. So kann zum Beispiel der Tresen mit einer Abdeckplatte aus Holz ausgeführt werden.

Räume

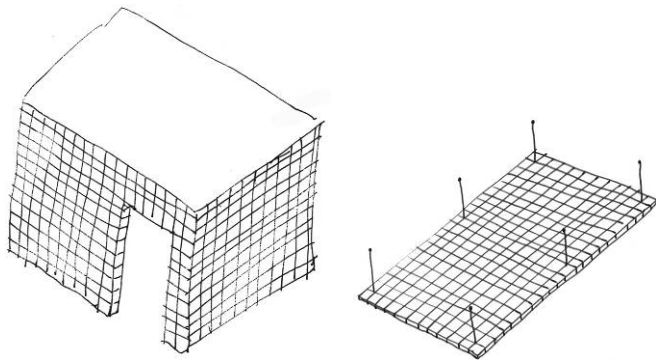


Abb. 97: Anwendungsskizze Raum (Raum-im Raum) /abgehängte Decke

Neben Möbeln wurde mit der Entwicklung eines 90° Verbinders auch die Anwendung als Raum und Raumecke angedacht. Die Modularität ermöglicht hier die Ausbildung von Tüрдurchgängen. Der Einsatz als abgehängte Decke ermöglicht eine räumliche Begrenzung auch nach oben.



Abb. 98: Darstellung Anwendung als Raum/Empfang/Tresen

4.1.3 Proportionen

Aus vorangegangenen Proportionsstudien entwickelte sich eine Tendenz hin zum 20/20 Quadratmodul. Mit dem 20er Modul sind alle angestrebten Formate abbildbar,

die Anwendung als Desk-Panel bei den beiden gängigen Tischbreiten 180 cm und 200 cm ist bündig abschließend möglich und im raumhohen Einsatz sind stufenweise Höhenanpassungen von 20 cm sinnvoll.

In der Rücksprache mit Stefan Behnisch (Behnisch Architekten) wurde das 20er Modul jedoch aus formalen Gründen kritisiert. Die Assoziationen zu Glasbausteinen oder Fliesenrastern waren zu stark. Außerdem wurde diskutiert, ob eine Anpassung an architektonische Rastermaße beim Biocomposites Modul angebracht ist, als eine Anpassung an Möbelabmessungen. Im Unterschied zu den bisherigen Rossoacoustic Produkten bietet das Biocomposites Modul die Möglichkeit, architektonische Elemente zu errichten. Eine Anpassung an Achsmaße aus der Architektur wäre also durchaus sinnvoll. Zudem wurde angeregt, sich in den Modulabmessungen an das Optimum in der Herstellung zu orientieren.

Als Folge der Rücksprache mit Stefan Behnisch wurden unterschiedlich vorhandene Modulformate und Achsmaße noch einmal im Detail untersucht.

Glasbausteine

Die gängigsten Glasbausteine weisen Seitenlängen von 19 cm auf. Unter Berücksichtigung der Fugen ergibt sich hierdurch ein Achsmaß von 20 cm. Neben diesen Glasbausteinen sind auch Bausteine mit Seitenlängen 24 cm zu finden. Das Achsmaß beträgt damit 25 cm. Besonders im großflächigen Einsatz eignen sich diese größeren Bausteine, da geringere Stückzahlen nötig sind und der Aufbau damit zeiteffektiver ist.

Euro-Modul 10 cm: Maße für Büromöbel

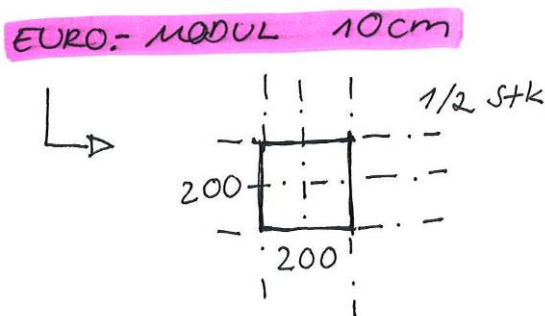


Abb. 99: Raster Euro-Modul

Den gängigsten Möbelabmessungen liegt das so genannte Euro-Modul zugrunde. Es definiert bei Möbelbreiten,-höhen und -tiefen Abmessungen, die sich aus einem Vielfachen von 10 cm ergeben.

Mit einem Biocomposites Modul der Seitenlänge 20 cm könnte man viele gängige Möbelabmessungen abdecken.

Oswald Mathias Ungers: 60 cm x 60 cm

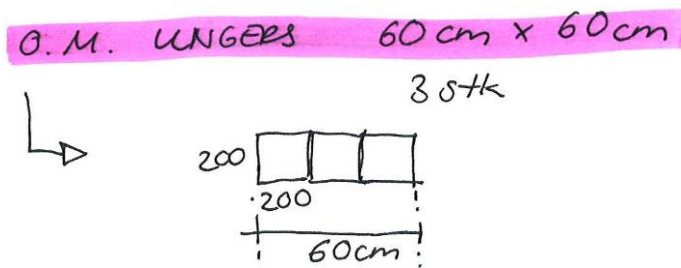


Abb. 100: Achsmaß O. M. Ungers

Bei der Recherche von Rastermaßen in der Architektur begegnet man unweigerlich dem deutschen Architekt Oswald Mathias Ungers. Seine Architektur ist vom stringenten Aufbau nach Rastern geprägt. Das 60 cm Raster wurde bei seinen Bauten mit Abstand am häufigsten eingesetzt.

Drittelt man das Achsmaß von 60 cm, ergeben sich daraus Modulmaße von ebenfalls 20 cm Seitenlänge.

Achsmaß 1,35 m

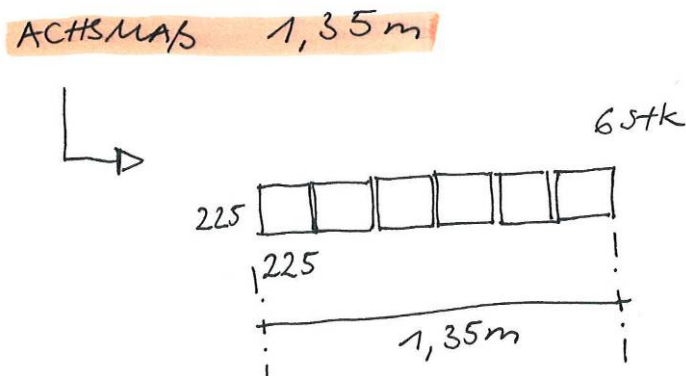


Abb. 101: Achsmaß 1,35 m

Im Buch *Neufert Bauentwurfslehre* führt Prof. Ernst Neufert das Achsmaß von 1,35 m als eines der gängigsten im Bau von Büro- und Verwaltungsgebäuden auf. Dem Maß 1,35 m liegt die Standardbreite einer Gipskartonplatte zugrunde.

Eine Aufteilung des Achsmaßes in sechs Teile ergibt ein Modul der Seitenlänge 22,5 cm.

Achsmaß 1,50 m

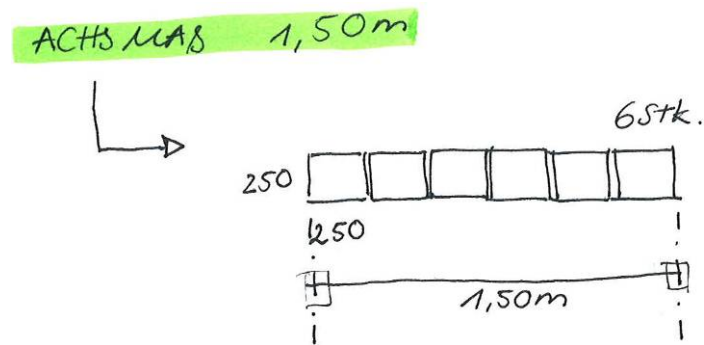


Abb. 102: Achsmaß 1,50 m

Ein weiteres im von Neufert aufgeführtes Achsmaß für Büro- und Verwaltungsgebäude ist 1,50 m.

Eine Unterteilung in sechs führt zu einer Modulgröße von 25 cm auf 25 cm.

Oktameter 1,25 m

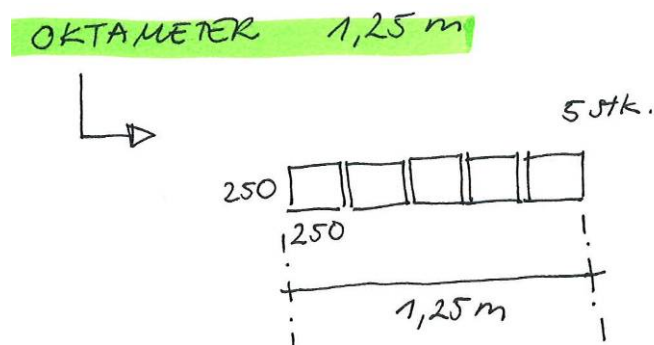


Abb. 103: Oktameter 1,25 m

Der Oktameter bezeichnet das Achtel eines Meters, also 12,5 cm. Diese Unterteilung liegt zum Beispiel den Achsmaßen von Mauerwerk zugrunde. Aus der Addition dieser Elemente ergibt sich ein architektonisches Achsmaß von 1,25 m.

Eine Unterteilung in fünf Teile führt zu einem Modul mit Seitenabmessungen von ebenfalls 25 cm.

Die drei Module mit den Seitenlängen 20 cm, 22,5 cm und 25 cm, die sich aus den vorangegangenen Recherchen entwickelt haben, wurden am Beispiel einer konkreten Anwendung am Arbeitsplatz rechnerisch untersucht. Im Anwendungsbeispiel soll eine Viererarbeitsgruppe mit halbhohen Wänden abgetrennt werden. Die Abmessung des Raums, der sich dabei ergibt, sind in allen drei Beispielen annähernd gleich.

Modul 20	Modul 22,5	Modul 25
Raum 4,20 m x 4,40 m	Raum 4,05 m x 4,50 m	Raum 4,25 m x 2,50 m
624 Module	476 Module	384 Module

Abb. 104: Anwendungsbeispiel mit unterschiedlichen Modulabmessungen

Mit dem 20er Modul werden zum Aufbau des Anwendungsbeispiels 624 Teile benötigt, vom Modul der Seitenlänge 22,5 cm werden 476 benötigt und beim 25er Modul genügen bereits 384 Teile.

4.1.4 Fazit: Modul der Seitenlänge 25 cm

Die Untersuchungen ergaben, dass größere Module in vielerlei Hinsicht Vorteile darstellen. So sind sie wegen der geringeren benötigten Stückzahl einfacher und schneller aufzubauen. Neben der Anzahl der Module verringern sich bei größeren Formaten auch die Anzahl der benötigten Verbinder und damit die Anzahl der möglichen Schwachstellen. Zudem werden bei der Verwendung von größeren Modulen die Aufdopplungen von Wandstärken und damit sowohl Gewicht, als auch Kosten reduziert.

Auch aus ästhetischen Gesichtspunkten tendierte man zu größeren Formaten. Zum einen wollte man Assoziationen zu Fliesenrastern vermeiden, zum anderen sollten große Formate vor allem in großflächigen Anwendungen eine ruhigere Struktur bewirken.

Die Untersuchungen der vorhandenen architektonischen Raster ergaben, dass mit einem Modul der Seitenlänge 25 cm, zwei der drei gängigsten Achsmaße für Büro- und Verwaltungsgebäude abgedeckt werden.

Die maximalen Abmessungen beim Spritzguß, die mit ca. 40 cm Seitenlänge angesetzt wurden, bestätigte weiterhin die Umsetzbarkeit eines 25er Moduls.

4.2 Technische und Formale Ausarbeitung

4.2.1 Herstellungsbedingte Anforderungen

„Es wäre ideal, wenn wir ein Verfahren finden, das alle Fertigungsschritte von CP30 in sich vereint. Ein Produkt, das fertig aus der Maschine fällt...“

(Dietrich Brennenstuhl, Geschäftsführer der nimbus group)

Lochform und Durchmesser der Mikroperforation

Von spritzgusstechnischer Seite wurde die Realisierbarkeit einer in den Fertigungsprozess integrierten Mikroperforation für möglich befunden. Erste computergestützte, akustische Berechnungen des Fraunhofer Institutes IBP, definierten die Lochgröße (von 0,5 mm - maximal 0,6 mm) und den idealen Lochabstand der Mikroperforation (6 mm). Von Seiten des Spritzgießers wurden als technisch machbar ein Lochdurchmesser von 0,6 mm und ein Lochraster von 8 mm Lochabstand genannt. Ein geringerer Lochabstand hätte zur Folge, dass der Materialfluss, des während des Spritzgießens zähfließenden Kunststoffes, um die lochbildenden Pins im Werkzeug nicht mehr gleichmäßig herumfließen kann und es zu unsauberem Löchern und zudem zu unschönen Fließnähten um die Löcher kommen kann.

Spritzgusstechnisch betrachtet ist es zudem wünschenswert, mit möglichst großer Entformungsschräge zu arbeiten, auch bzw. gerade bei den Löchern der Mikroperforation, um die Anzahl der Auswerfer zu reduzieren. Deren Auswerferpunkte wirken auf Sichtflächen optisch störend und können den optischen Eindruck negativ beeinflussen. Bei von der Fa. Simon Kunststofftechnik gespritzten nimbus Leuchte „Q-V6“ wurden beispielsweise die Auswerfer auf den Rand des Gehäuses gesetzt, was die Auswerferpunkte nahezu unsichtbar macht. Lediglich im unmontierten Zustand der Leuchte lassen sich die Auswerferpunkte bei genauerer Betrachtung erkennen. Das Gehäuse wirkt dadurch optisch ansprechend und entsprechend hochwertig verarbeitet.



Abb. 105: nimbus Leuchte Q-V6

Für die Standzeit des Werkzeuges entscheidend ist, wie die Pins, die die Mikroperforation bilden sollen, in das Werkzeug integriert werden können. Um die Pins im Schadensfall oder bei Verschleiß ersetzen zu können und um damit eine aufwändige Werkzeugreparatur zu vermeiden, macht es Sinn, diese Pins auswechselbar zu machen. Hierfür ist es notwendig, für jeden einzelnen Pin eine ausreichend große „Standfläche“ im Werkzeugaufbau vorzusehen. Bei einem Lochabstand von 8 mm kann die Grundfläche des Pins so ausgelegt werden, dass jeder einzelne Pin stabil in das Werkzeug integriert werden kann. Ferner sollte darauf geachtet werden, dass die Seite des Pins, die im Werkzeug das feine Loch der Mikroperforation bildet, so kurz wie möglich zu halten ist, da auf die Pins beim Spritzvorgang ein relativ hoher Druck des zähfließenden Kunststoffes einwirkt.

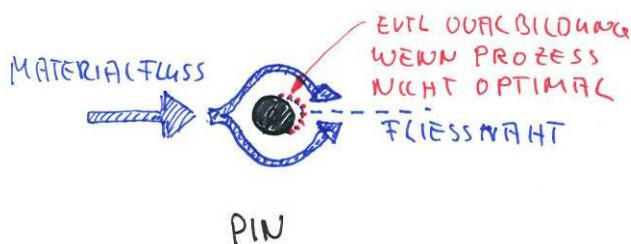


Abb. 106: Schematische Darstellung des Materialflusses beim Spritzgussvorgang

Ist diese Spitze zu lang, können sich die Pins beim Spritzgussvorgang verbiegen, was zu unregelmäßigen Lochausbildungen und unsauberen Lochbildern führen kann. Ferner verschleißt das Werkzeug dadurch schneller, was zu kurzen Wartungsintervallen bzw. Standzeiten des Werkzeuges führen kann. Führt man die Abschlüsse der Pins zu kurz aus, gefährdet man die Wirkungsweise der Mikroperforation. Der für die Energie-

vernichtung der Schallwellen zuständige Luftpfropfen, der sich in der Mikroperforation befindet, benötigt eine bestimmte Reibungsfläche, die dem Luftpfropfen eine Trägheit verleiht. Diese Trägheit bewirkt letztendlich die Vernichtung der Schallenergie. Das hierfür notwendige Loch benötigt dafür ein bestimmtes Verhältnis von Lochdurchmesser zu Lochtiefe (siehe auch Kapitel Akustik).

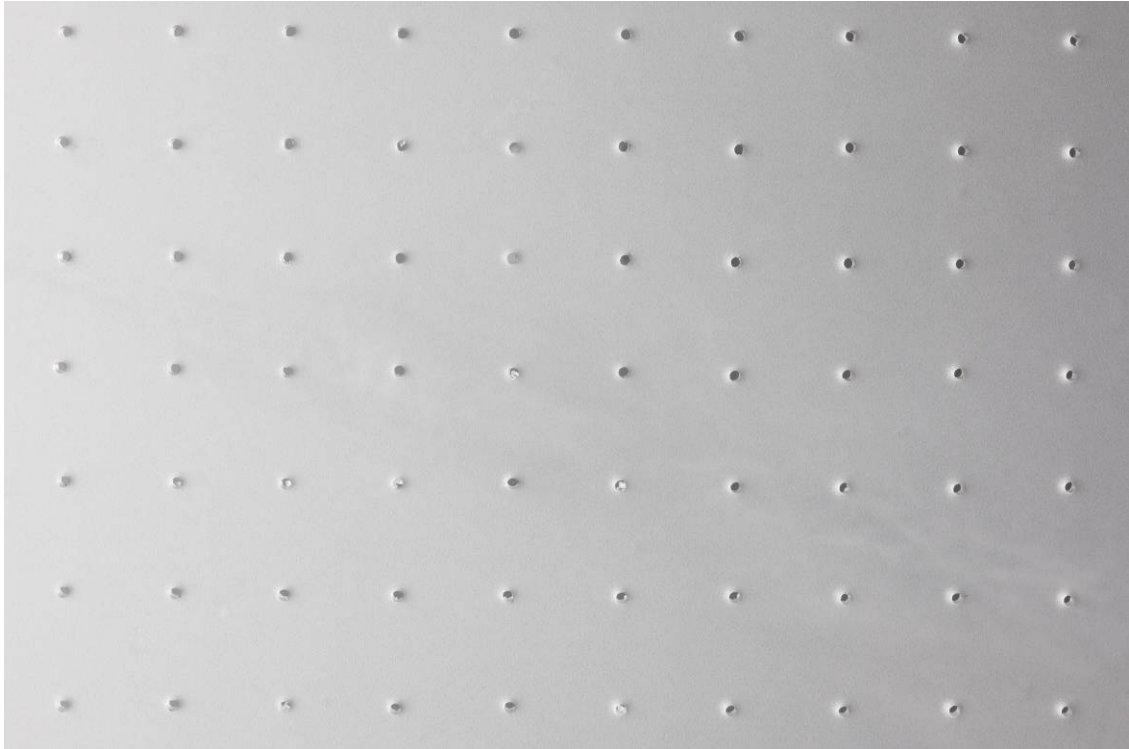


Abb. 107: 0,6 mm Lochbohrung bei 8 mm Lochraaster (ohne kegelförmige Senkung)

Um die Stabilität der Pins zu gewährleisten, wurde die Strecke des für die akustische Wirksamkeit entscheidenden Durchmessers auf das notwendigste Maß verkürzt. Zur Werkzeuginnenseite hin läuft der Pin konisch/kegelförmig aus. Das „ideale Loch“ der Mikroperforation stellt also ein Kompromiss aus den technischen Anforderungen des Spritzgießens und der akustischen Wirksamkeit dar. Die Gestaltung desselben beschränkt sich daher weitestgehend auf die Definition des Winkels der kegelförmigen Senkung.

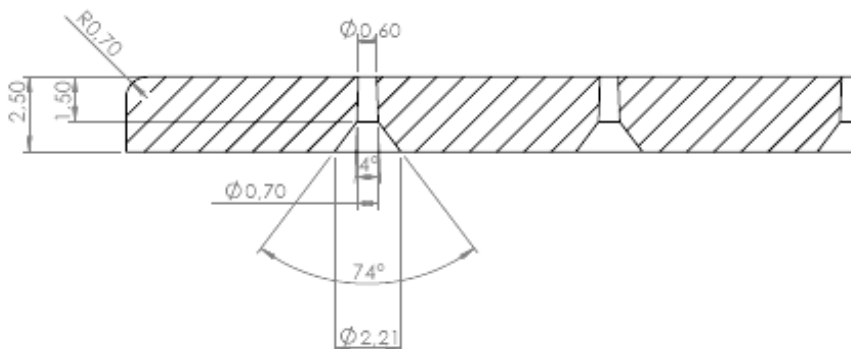
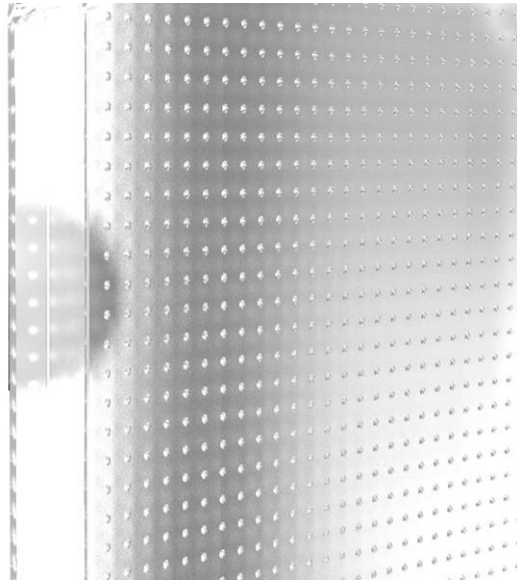


Abb. 108: Schnitt durch die Definition des Lochdurchmessers für ein Probewerkzeug

Der Konus liegt aus entformungstechnischen Gründen auf der Innenseite des Moduls. Die Lochtiefe für die Wirkungsweise der Mikroperforation ist mit hier 1,5 mm ausreichend bemessen. Simulation der Mikroperforation per CAD.



Werkzeuggröße und Materialstärken

Modulgrößen von z. B. 1150 mm x 2200 mm (der maximalen Größe von CP 30), das wurde nach den ersten Informationsgesprächen mit unterschiedlichen Spritzgießern sehr schnell deutlich, lassen sich nur unter enormen Investitionskosten für die Werkzeuge bewerkstelligen. Neben den immensen Werkzeugkosten kommt zudem noch der Nachteil, sich vorab auf ein Format festlegen zu müssen. Die Erfahrung mit CP 30 zeigt jedoch, dass der Markt eine möglichst große Formatvielfalt wünscht, um möglichst flexibel in den Planungsmöglichkeiten zu sein.

Waren in den ersten Informationsgesprächen noch Modulgrößen von 400 mm x 400 mm durchaus realistisch, erwies sich im Laufe der weiteren Planung das Format 250 mm x 250 mm als das Format, welches im besten Kosten,- Nutzenverhältnis zu stehen schien. Dieses Format ergab sich aus einer Abwägung und internen Gewichtung der Faktoren:

- Werkzeugkosten
- Stückkosten
- Gewicht
- Materialverbrauch

Eine geschlossene Form in Form eines Hohlkörpers mit mikroperforierter Oberfläche ist im Spritzgussverfahren nicht realisierbar, weshalb im nächsten Schritt über ein Halbschalenmodul nachgedacht wurde, das sich z.B. auf Umschlag zum gewünschten Hohlkörper montieren lässt.

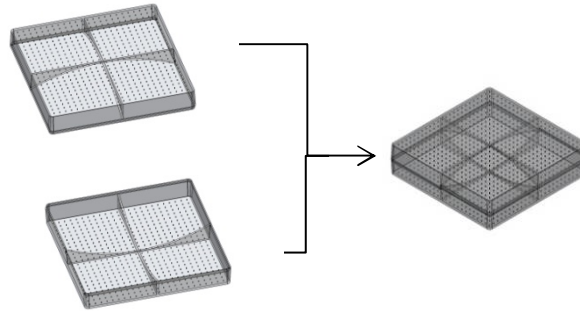


Abb. 109: Konstruktives Prinzip Halbschale

Hier gilt es, die ideale Mischung aus Stabilität und Materialökonomie zu finden. Erste Berechnungen ergaben, dass eine Ausgangswandstärke von ca. 2 - 2,5 mm bei Außenmaßen des Moduls ausreichend Stabilität bringen könnte, selbst wenn man auf stabilisierende Maßnahmen wie z. B. Stege o. ä. verzichten möchte. Berücksichtigt man die zur Entformung notwendigen Entformungsschrägen von ca. 2° und setzt man voraus, dass es aus statischen Gründen (das Modul soll idealerweise ohne Hilfsmittel stehen) glatte Außenkanten, ohne Schräge haben soll, resultierte hieraus eine Modulhöhe der Halbschale von ca. 25 mm.

Eine Bedingung an den Spritzguss war zudem, dass die Außenflächen der Module absolut plan sein müssen, damit die einzelnen Module ohne Hilfsmittel stehen. Bei den Halbschalen konnten daher nur auf der Innenseite die für die Entformung wichtigen Schrägen vorgesehen werden.

Aus materialökonomischen Gründen wären Wandstärken von unter 2 mm wünschenswert. Zum einen haben die Module dadurch ein geringeres Gewicht, zum anderen ist für den Herstellungsvorgang weniger Kunststoff nötig, welcher durch die momentan noch hohen Materialkosten einen großen Anteil an den Gesamtherstellungskosten ausmacht.

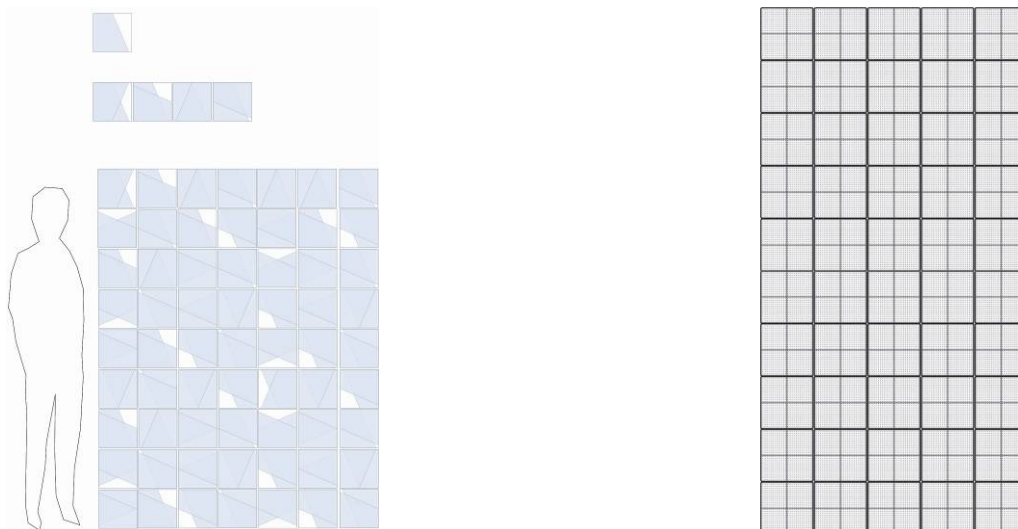
Geringere Wandstärken haben jedoch zur Konsequenz, dass die Module von den Flächenmaßen insgesamt etwas kleiner ausfallen sollten, um eine ausreichende Stabilität der Außenflächen zu gewährleisten. Bei dünneren Wandstärken lassen sich die Flächen schon bei leichtem Druck auf die Fläche relativ leicht verformen. Neben der damit verbundenen höheren Bruchgefahr, wirkt das Modul dadurch auch nicht sehr hochwertig. Konstruktiv kann diese Problematik dahingehend beeinflusst werden, indem man an der Innenseite der Halbschale mit verstärkenden Stegen arbeitet, die der Oberfläche die nötige Stabilität verleihen.



Abb. 110: Konzeptstudien: Halbschalenmodule mit Verstärkungsstegen

4.2.2 Design Workshop

Durch das technische Ausschlussverfahren und die daraus resultierende Festlegung auf eine bestimmte Fertigungstechnik definierten sich bereits einige gestalterische Rahmenbedingungen. Durch die Definition der Modulgröße auf 250 x 250 x 50 mm ergibt sich ein additives Raumteiler Konzept. Die einzelnen Module müssen miteinander zu einer Einheit verbunden werden.



Anhand dieser Vorgaben wurde ein zweiter firmeninterner Designworkshop, an dem sich neun Designer der nimbus group beteiligten, ins Leben gerufen. Der ganztägige Workshop diente der konzeptionellen Ideenfindung, der Findung konstruktiver Lösungen und/oder der Entwicklung von gestalterischen Ansätzen. Das Entwicklungsziel des Workshops (eine Präsentation hierzu kann separat angefordert werden) war:

„dem Akustikmodul neben seiner technischen und rationalen Intelligenz oder gerade durch seine technische und rationelle Intelligenz einen attraktiven Charakter zu verleihen.“

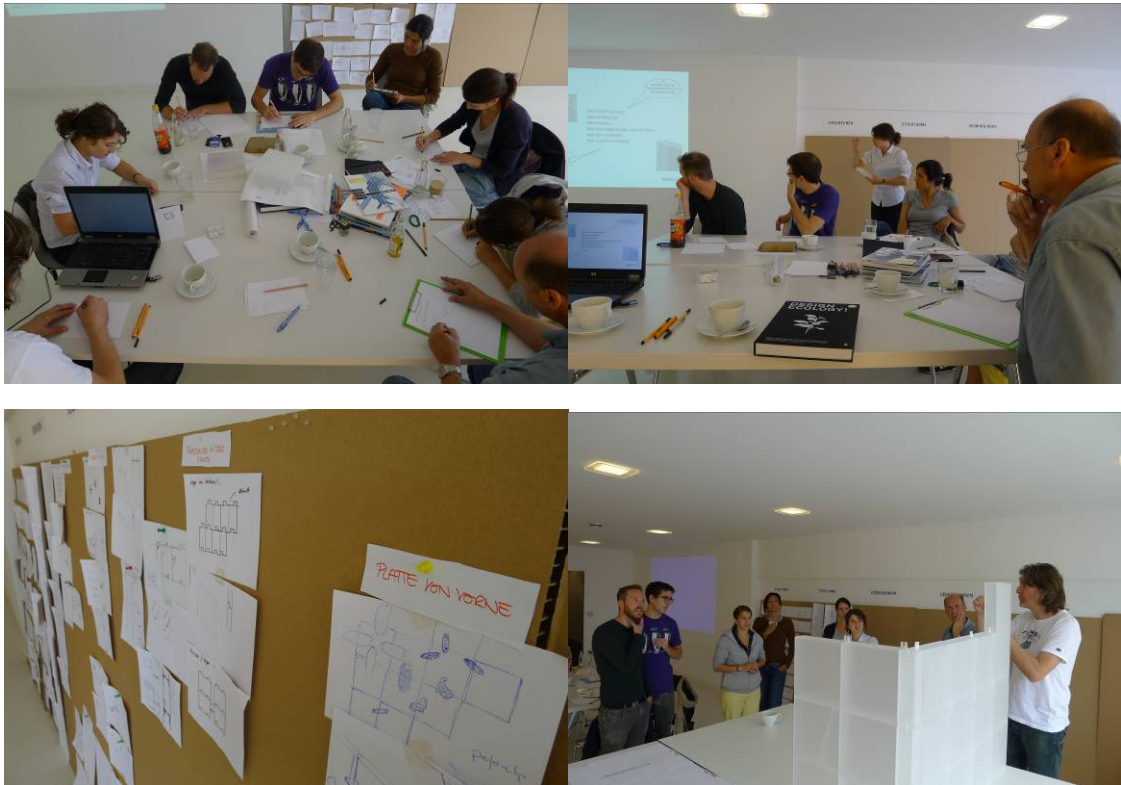


Abb. 111: Designworkshop im „MockUp“ der nimbus group

Im Laufe des Workshops wurden u.a. folgende, designrelevante Themen bearbeitet, die in nachfolgenden Kapiteln noch etwas ausführlicher behandelt werden:

Wie lassen sich einzelne Module miteinander verbinden?

Wie sehr „Bio“ muss das Design sein?

Braucht die Oberfläche der Module eine (modulübergreifende) Struktur?

Erste Ideen und Konzepte



Zur Verbindung der Module untereinander wurden unterschiedliche Ideen verfolgt, die von konstruktiven bis völlig freien Gestaltungsansätzen reichte.

Das Ideenspektrum reichte von LEGO-artigen Ansätzen über Formadditionen bis zu pragmatischen Ansätzen von Modulverbindungen mittels Verschraubung. Die Aufgabenstellung erwies sich als sehr komplex. Dennoch ergaben sich eine Reihe sehr interessanter konzeptioneller und/oder gestalterischer Ansätze, die eine nähere und genauere Ausarbeitung nahelegten. Es entstanden so eine Reihe unterschiedlicher Studien mit verschiedensten Themenschwerpunkten.

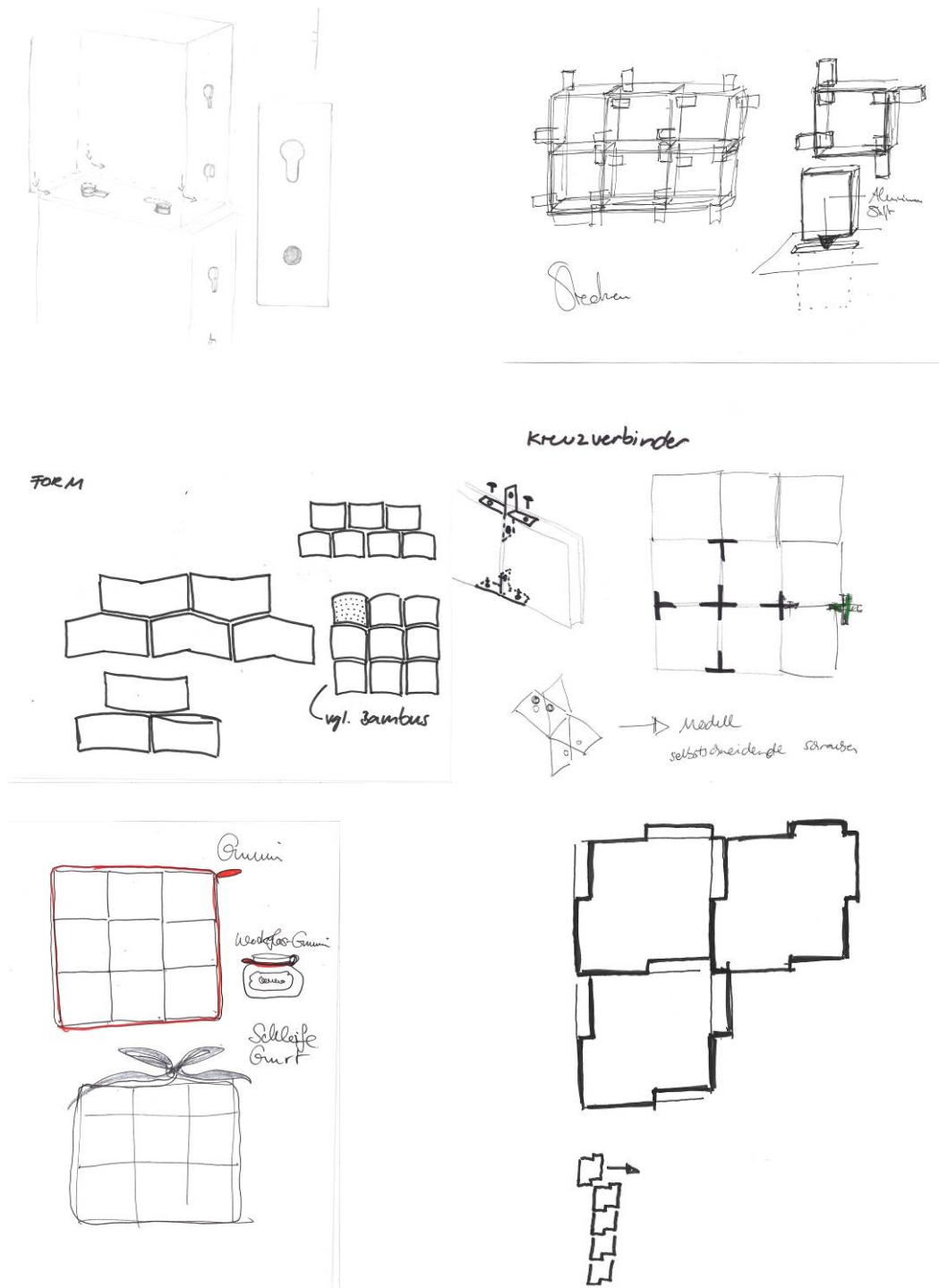


Abb. 112: erste Ideenskizzen zum Thema Modulverbindung

Nachdem das Konzept des additiven, modularen Aufbaus einzelner Module als Produktkonzept feststand, musste nach Lösungen gesucht werden, wie die Halbschalen miteinander verbunden werden können.

Clipsen

Die Halbschalen werden über angespritzte Verbindungselemente zusammengesteckt. Idealerweise ist das Halbschalenmodul so aufgebaut, dass sich durch umklappen und verdrehen zwei identische Halbschalen zu einem Komplettmodul montieren lassen. Die Verbindung mittels Clipsen hat den formal größten Einfluss auf die Gestaltung der Module, da die Verbindung direkt sichtbar und somit zu einem formbildenden Gestaltungselement wird. Neben der formalen Unaufdringlichkeit ist es sehr wichtig, dass die Elemente eine stabile Verbindung eingehen. Eine sehr präzise und nahezu toleranzfreie Fertigung ist Voraussetzung für eine einwandfreie Funktion nicht nur des einzelnen Moduls, sondern auch der Addition der Module untereinander. Zu große Ungenauigkeiten und/oder Toleranzen wirken sich hierbei negativ auf die gesamte Struktur aus.

Insbesondere wenn eine Erweiterung der funktionalen Nutzung des Moduls (z.B. die Integration von Licht, Akzentuierung durch farbige Folien o.ä.) möglich sein soll, ist eine Verbindung der Halbschalen mittels Clipsen eine sehr praxisnahe Lösung.

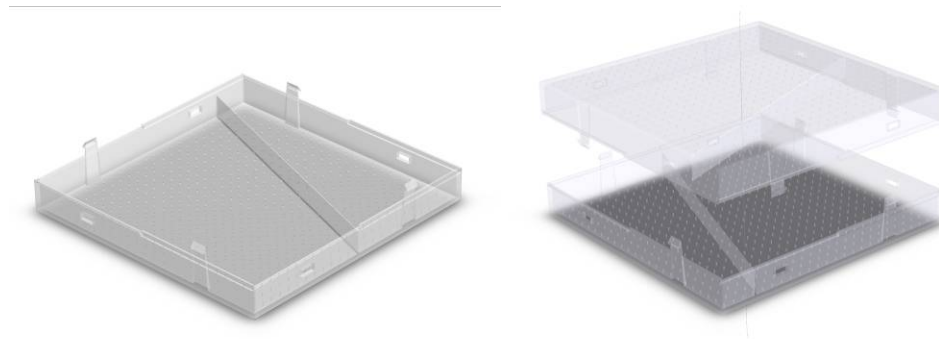


Abb. 113: Halbschalenmodul mit Rasthaken und Nut-/Federkante

Die Vorteile des Clipsens:

- Einfache, werkzeuglose Montage.
- Module sind zerlegbar (wichtig z.B. bei optionalen Lichtanwendungen; das Lichtmodul bleibt revidierbar, z. B. im Schadensfalle).
- Kein zusätzlicher Montageschritt notwendig.
- Kostengünstig durch Wegfallen eines Montageschrittes.

Kleben

Die Halbschalen werden mittels eines (speziellen) Klebers irreversibel miteinander verbunden.

Die Vorteile des Klebens:

- Höhere Festigkeit der Halbschalen untereinander.
- Keine sichtbaren und/oder formal unschönen Verbindungselemente.
- Höhere Festigkeit bei der Verbindung der Module untereinander.

Ein möglicher Nachteil kann sein, dass die Klebestellen sichtbar sind und der Prozess, sofern keine Erfahrungen beim Spritzgießen selbst vorliegen, ausgelagert werden müssen. Ein zusätzlicher Arbeitsschritt ist notwendig.

Ultraschallschweißen

Die Halbschalen werden wie beim Kleben irreversibel miteinander verbunden. Beim Ultraschallschweißen werden die Füge Teile durch gezieltes Umwandeln von Schallenergie in Wärme in der Fügezone unter Druck plastifiziert.

Die Vorteile des Ultraschallschweißens:

- Hohe Festigkeit/Dichte an der Füge Stelle.
- Schweißzeiten von wenigen Sekunden.
- Unauffällige Schweißnaht.
- Gut automatisierbar.
- Keine sichtbaren und/oder formal unschönen Verbindungselemente.

Dieses Verfahren ist prinzipiell eher für kleinteilige Verbindungsaufgaben geeignet. Nach ersten Einschätzungen könnte das Modul mit 250 mm Kantenlänge bereits zu groß für dieses Verfahren sein. Die Machbarkeit ist aber noch zu prüfen.

Vibrationsschweißen

Die Halbschalen werden relativ zueinander bewegt. Durch die entstehende Reibung erwärmen sie sich und werden gleichzeitig unter hohem Druck miteinander verbunden.

Die Vorteile des Vibrationsschweißens:

- Hohe Festigkeit/Dichte an der Füge Stelle.
- Gute Automatisierbarkeit des Schweißprozesses.
- Schweißzeiten von wenigen Sekunden.
- Schweißen unterschiedlicher Kunststoffe möglich.

- Schweißen einer unauffälligen, durchgängigen Naht.
- Auch für große Teile, die mit Ultraschall nicht mehr schweißbar sind.
- Keine sichtbaren und/oder formal unschönen Verbindungselemente.

4.2.3 Verbindung der Kuben

Eine Grundvoraussetzung für die Umsetzung des modularen Konzepts ist, die Module untereinander in einer ausreichend stabilen Art und Weise miteinander zu verbinden. Auch zu diesem Thema wurden im Design-Workshop (Präsentation kann angefordert werden) zunächst unterschiedlichste Ideen generiert.

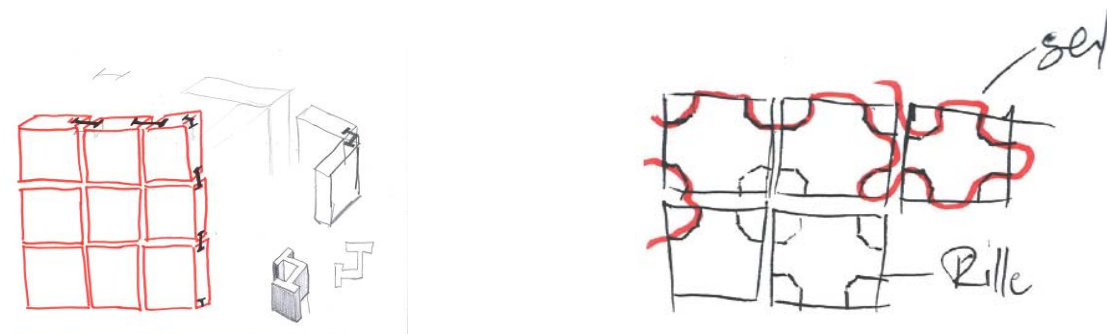
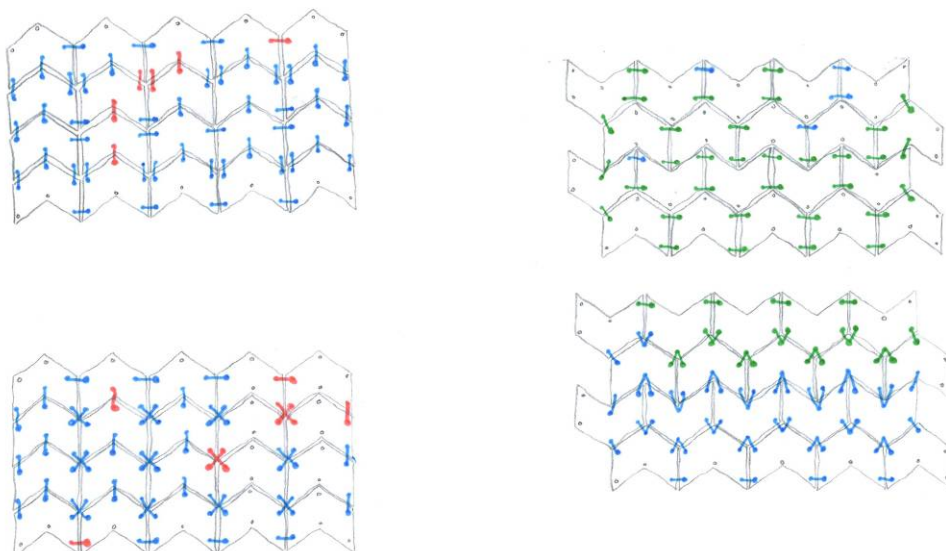


Abb. 114: Die Suche nach dem geeigneten Verbinder zieht sich wie ein roter Faden durch den gesamten Designprozess.



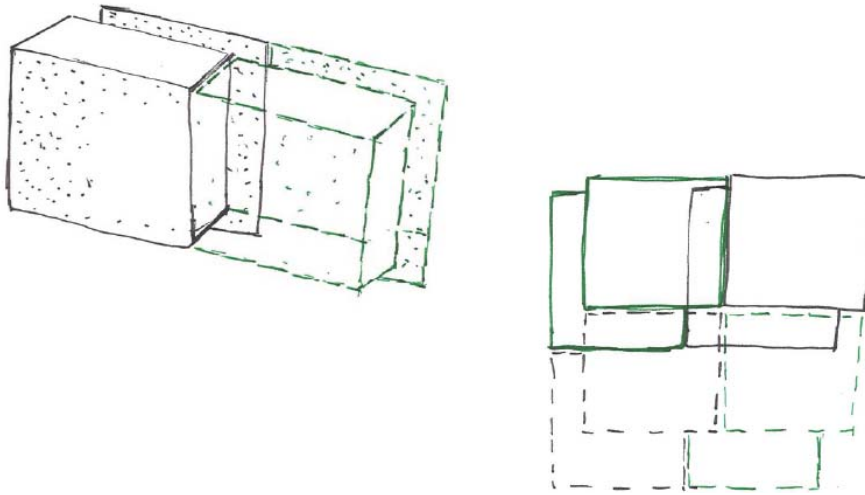


Abb. 115: Skizzen zu möglichen Verbindungslösungen

Bei den Verbindungen ergaben sich zunächst drei unterschiedliche Gestaltungsrichtungen:

- Verbindungen auf den Sichtflächen.
- Integrale Verbindungen.
- Unsichtbare Verbindungen.

Bei den ersten beiden Richtungen werden die Verbindungslösungen selbst zum Gestaltungsobjekt. Die visuelle Bedeutung ist im Vergleich zu einer „unsichtbaren“ Verbindung, die z. B. an den Seitenflächen erfolgt, sehr stark. Je stärker die Betonung des Verbindungsdetails, desto stärker wird die visuelle Botschaft auf die Funktion der Verbindung fokussiert. Die Betonung und Ausarbeitung dieses Gestaltungsdetails hängt somit sehr stark von der Häufigkeit der geplanten Nutzung ab. Eine einmalig installierte Modulwand stellt andere Anforderungen an die Montier- und Demontierbarkeit wie eine möglichst flexible, räumlich sich häufig verändernde Anordnung der Raumteilermodule.

Verbindungen auf Sichtflächen

Verbindungen, die über die Sichtflächen der Module erfolgen, erlauben eine Montage/ Demontage von der Vorder- und/oder Rückseite der Module. Der Vorteil liegt hier in der problemlosen Erreichbarkeit der „Beschläge“. Der Nachteil liegt, z. B. bei sehr hohen Raumteilerlösungen darin, dass die Montage entweder getrennt nach Vorder-/Rückseite erfolgen muss oder zwei Personen für die Montage nötig sind.

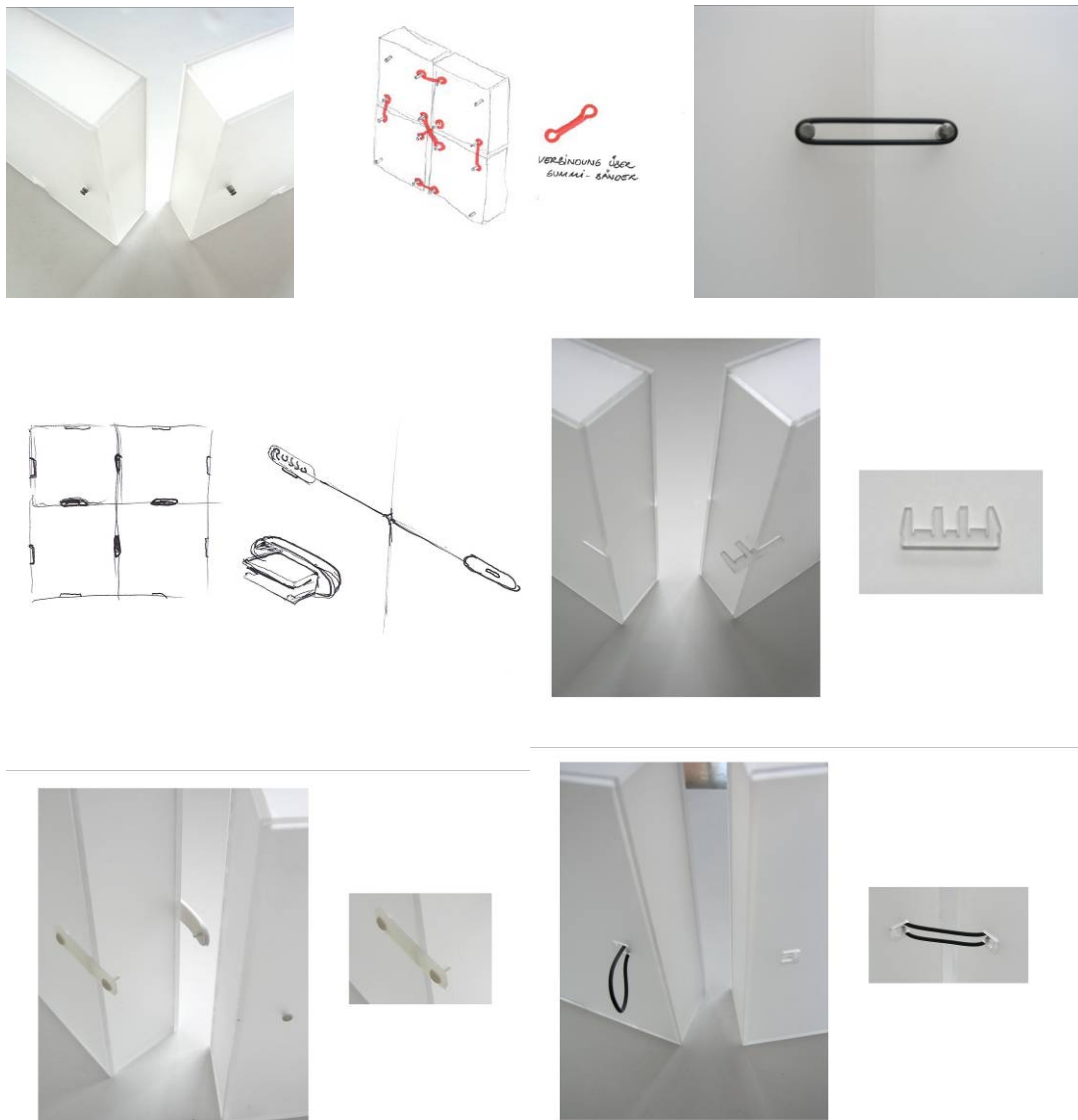


Abb. 116: Studien zu sichtflächenseitig montierbaren Verbindern

Eine mechanisch sehr stabile Verbindung der Module miteinander, ist die Verschraubung. Diese kann entweder direkt über die Module erfolgen oder aber über spezielle Beschläge. Nachteilig ist hierbei sicher der zu erwartende, zeitliche Montageaufwand.

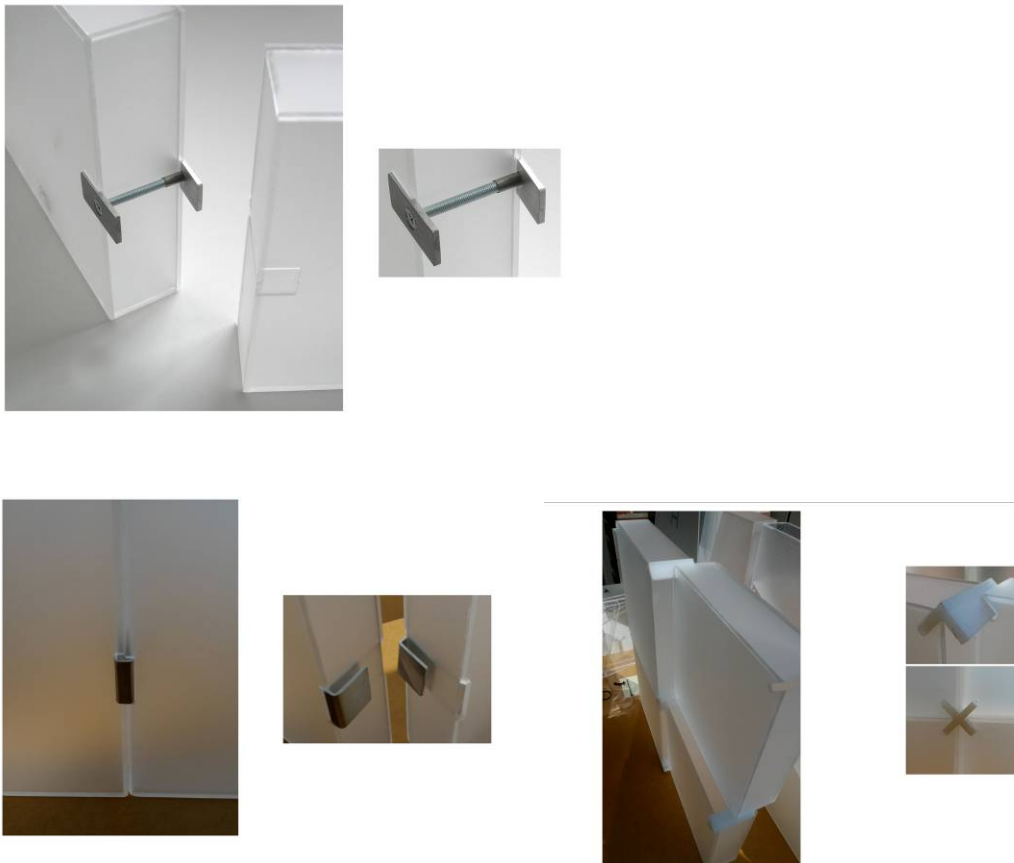


Abb. 117: Weitere Varianten von Schraub- und Steckverbindungen

Integrale Verbindungen

Integrale Verbindungen ergeben sich aus der Form des Modules selbst. Stecken, Rasten, Schieben sind einige mögliche Montagethoden. Die Verbindungslösung ist Teil der Form, im Idealfall bereits an das Modul angespritzt. Dies vermeidet zusätzliche Investitionen in evtl. zusätzlich anfallende Werkzeugkosten.

Möglicher Nachteil einer Integrallösung ist, dass in die neutrale Struktur des Modules eingegriffen werden muss. Lösungen wie Stecken, Schieben o.ä. erfordern meist ein „Mama-Papa“ Prinzip, was sich durch die Vorgabe, nur mit einer Halbschale zu arbeiten, als sehr komplex herausgestellt hat. Die Verbindung funktionierte oft nur in eine Richtung. Bei Lösungen, die in horizontaler Richtung funktionierten, erwies sich oft die vertikale Richtung als problematisch und umgekehrt.

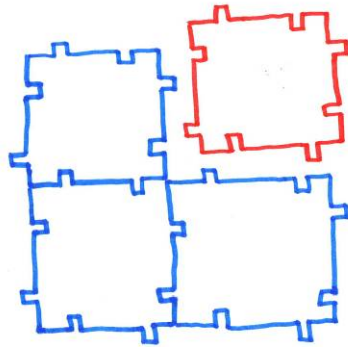
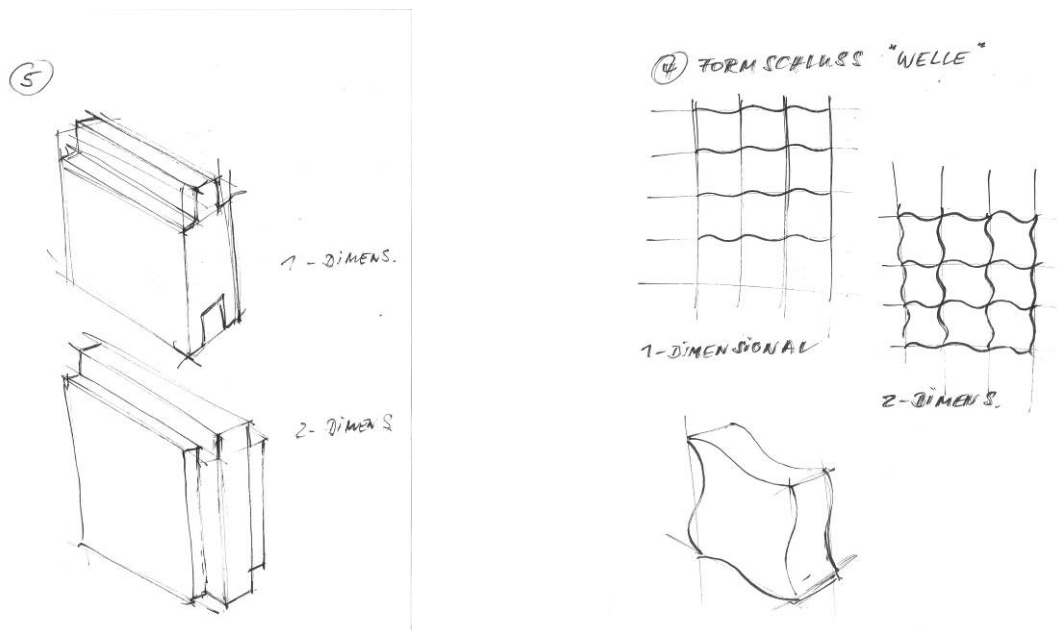
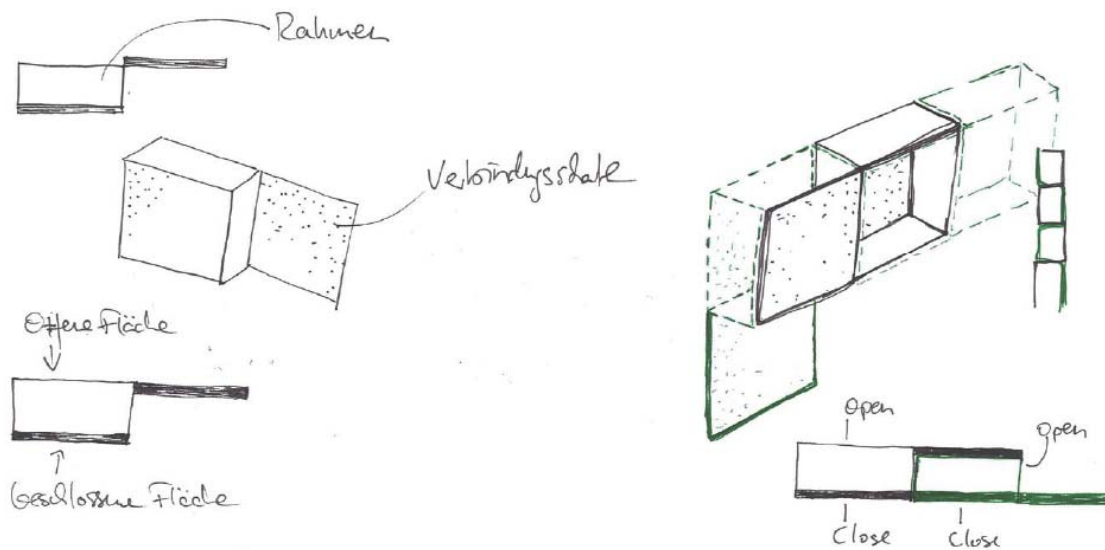


Abb. 118: Wie lässt sich der 4. Baustein integrieren? Als „Puzzleteil“ funktioniert die Addition zwar, jedoch kann der einzelne Baustein aus dem Verbund geschoben werden. Als Rastverbindung (im Legoprinzip) lässt sich das 4. Modul nicht integrieren.





Unsichtbare Verbindungen

Das Gestaltungskonzept der Biocomposite Module sieht die Möglichkeit der Demontierbarkeit zwar vor, dennoch sind wir nicht von einer häufig praktizierten, räumlichen Veränderung mit entsprechendem Montageaufwand ausgegangen. Die Annahme: der Raumteiler wird einmal aufgebaut und bleibt zunächst über einen längeren Zeitraum örtlich unverändert.

Um die Flächenwirkung möglichst nicht optisch zu beeinflussen, war bei dieser Gestaltungsaufgabe das Ziel, eine möglichst unsichtbare Verbindung zu finden. Dies schließt eine Modul-Addition über die Sichtflächen aus. Eine Lösungsmöglichkeit ist, die Verbindung über die Seitenkanten zu integrieren.



Abb. 119: Konzeptstudie: zweiteiliger Modulaufbau

Die mikroperforierten Flächen werden in einen vormontierten Rahmen eingeklipst. Nachteil: der Rahmen erfordert entweder eine andere Fertigungsmethode und/oder ein zusätzliches Werkzeug. Ferner musste der Biokunststoff an diese Fertigungsmethode angepasst werden. Dies erfordert eine neue Kunststoffrezeptur bzw. Compoundierung. Dies ist verbunden mit hohen Mindestabnahmemengen an das Rohmaterial.

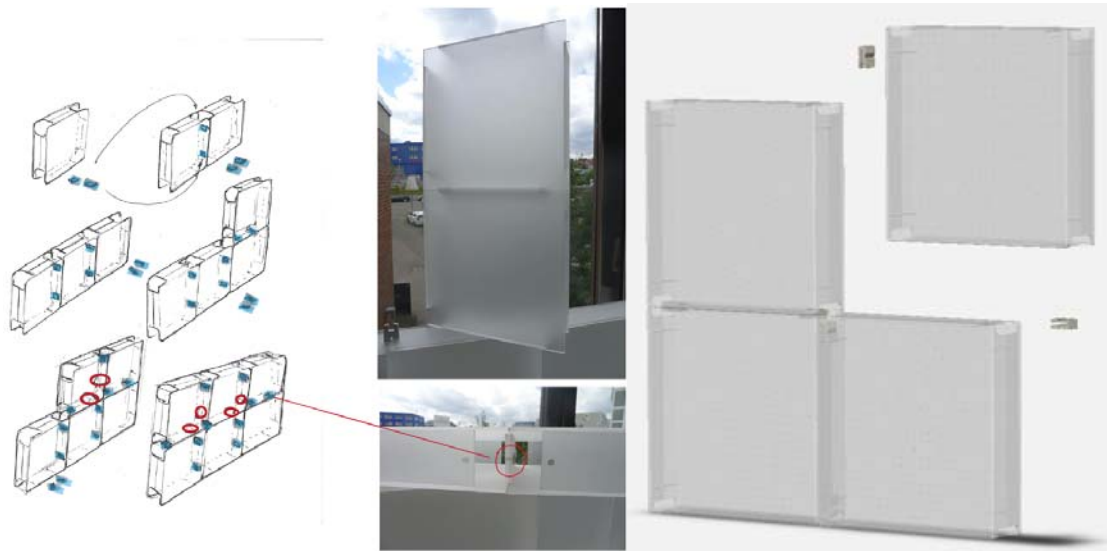


Abb. 120: mögliches Montageszenario

Die bei dieser Verbindungslösung notwendigen, offenen Ecken lassen das Modul "unfertig" erscheinen. Zudem ergeben sich langfristig vmtl. Probleme mit Verschmutzung von innen.

Die Kanten sollten also möglichst geschlossen bleiben und den Modulen untereinander dennoch ausreichend Stabilität verleihen. Eine zunächst sehr einfache und formal reduzierte Lösung mit integrierten Magneten erwies sich, vor allem bei größeren Modulmengen, als instabil.

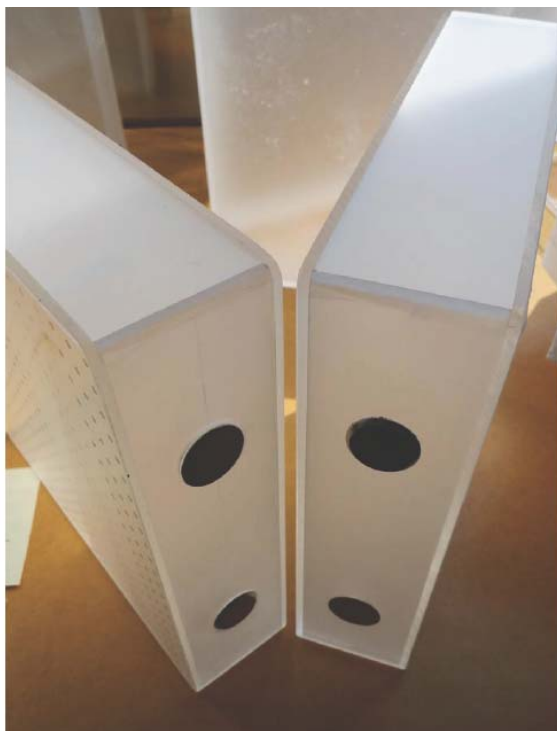


Abb. 121: Module mit integrierten Magneten

Auch auf die korrekte Polung bei der Montage wäre zu achten.

Die Verbinderlösung soll möglichst unauffällig ausfallen, aber dennoch stabil sein. Die Montage soll möglichst werkzeuglos funktionieren und jedes Modul miteinander verbunden sein, um statische Schwachstellen auszuschließen. Die Module sollen sich möglichst leicht ineinander stecken lassen und untereinander fest verbunden sein. Idealerweise sollte die Demontage auch werkzeuglos funktionieren. Diese Bedingung muss aber nicht erfüllt werden, da davon ausgegangen wird, dass die Module eher stationär eingesetzt werden oder zur Ortsveränderung nur teilweise demontiert werden. Im Gegensatz zu festinstallierten Modulsystemen, wie z.B. Glasbausteinen, die i.d.R. fest eingemauert werden, soll eine Demontierbarkeit möglich bleiben.

Ein Lösungsansatz hierzu waren modulübergreifende Steckverbinder, intern N- und H-Verbinder genannt, die sich seitlich in die Module stecken ließen und die in der ersten Variante auf Klemmpassung vorgesehen waren. In den Halbschalen befinden sich hierfür ca. 3 mm schmale Schlitz, in welche die die Verbinder gesteckt werden können.

Die Verbinder sind von der Dimensionierung her so ausgelegt, dass sie möglichst ohne Spiel in die Schlitz gesteckt werden können. Diese Lösung erfordert einen höchst präzisen, nahezu fertigungstoleranzfreien Werkzeugbau und Spritzgießvorgang. Um die Oberfläche außen möglichst neutral zu halten, wurden die Schlitz zur Modulinnenseite hin nicht geschlossen. Die hierzu notwendigen Wandungen hätten sich nach außen hin durch Schattierungen abgezeichnet.

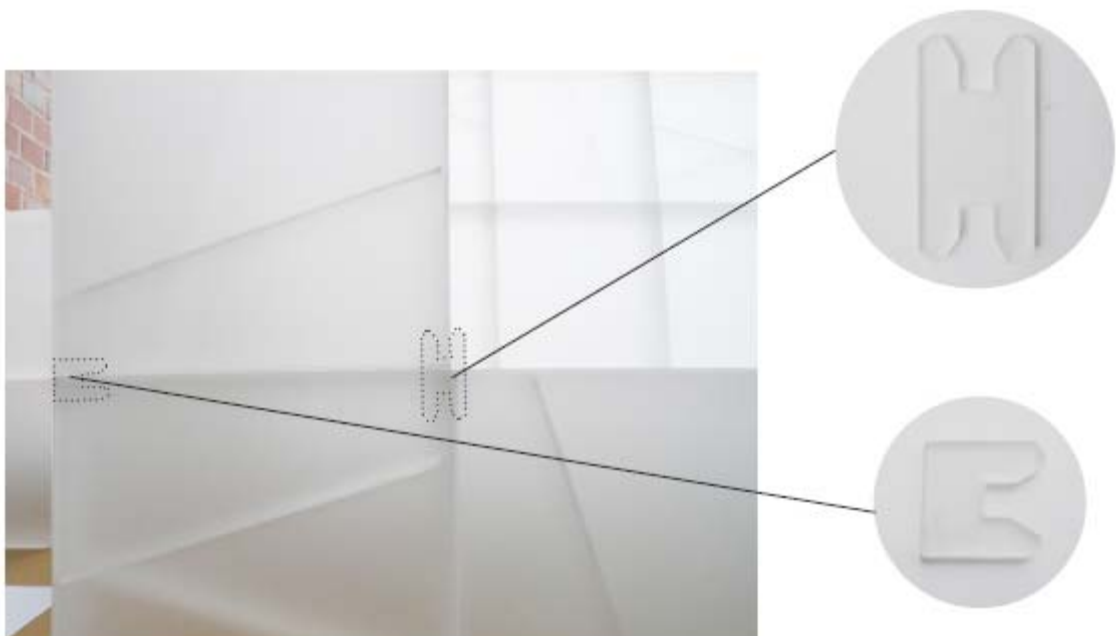


Abb. 122: Funktionsprinzip der N- und H-Verbinder

Hierzu wurden mehrere Varianten an Verbindern ausprobiert. Da die Verbinder flächenbündig eintauchen sollten, stellte sich die Frage nach der Demontierbarkeit. Ein Lösungsansatz stellte kleine Löcher im Verbinder dar, die einem Monteur die Möglichkeit geben, mittels eines (speziellen?) Werkzeugs die Verbinder aus den Modulen her-

aus zu hebeln. Um dies zu ermöglichen, muss an den Ecken der Module Platz hierfür geschaffen werden. Radien an den Modulecken sind eine dezente, visuell unauffällige Lösung hierfür. Zur Beurteilung der Eckradien wurden mittels CAD verschiedene Radien getestet. Kleine, enge Radien wirken sich weniger auf das geschlossene Gesamtbild der Moduladditionen aus, während größere Radien die einzelnen Module stärker betonen.

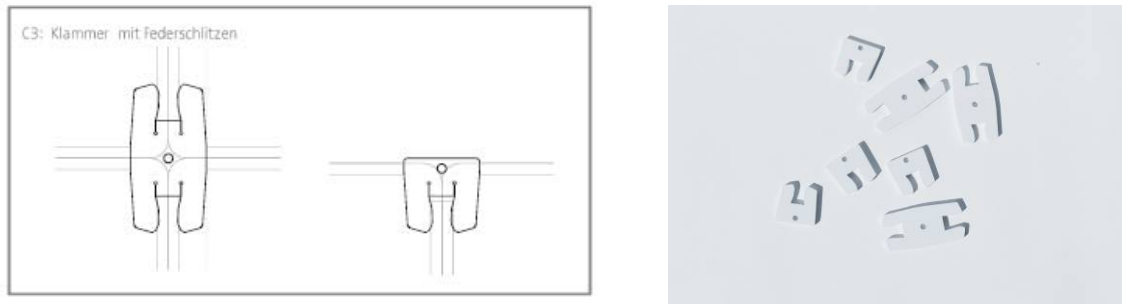


Abb. 123: H- und N-Verbinder bilden modulübergreifende Verbindungen

Eckradien ermöglichen Zugriff auf die Verbinder zur Demontage. Die Verbinder sind auf starke Klemmkraft ausgelegt. Schlitz ermöglichen, dass die Verbinder zur Montage etwas nachgeben und somit nicht so leicht Gefahr laufen zu brechen.



Abb. 124: Verbindervarianten; durch fehlenden Eckradius verdecktes Demontageloch

Die nahezu nicht einzuhaltende, toleranzfreie Fertigung macht es unmöglich, sämtliche Module mit derselben Klemmkraft auszustatten. Eine weitere Schwachstelle ist auch die fehlende, feste mechanische Verbindung in Form einer Verrastung o. ä. Bei hohen Modulwänden besteht dadurch die Gefahr, dass sich bei ungünstiger Belastung einzelne Module voneinander lösen und die Modulwände umfallen können.

Die Problematik bei einrastenden Verbindern liegt darin, dass diese nur schwer wieder lösbar sind, bei der Demontage evtl. abbrechen können und sich im Inneren der Module „ablagern“ können (hier käme ggf. der Vorteil der geclipsten Halbschalen zum Tragen).

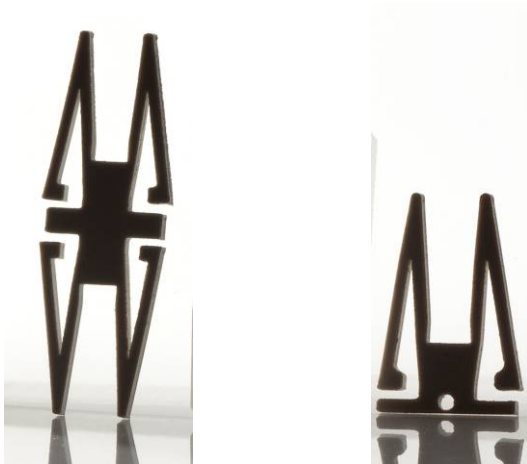
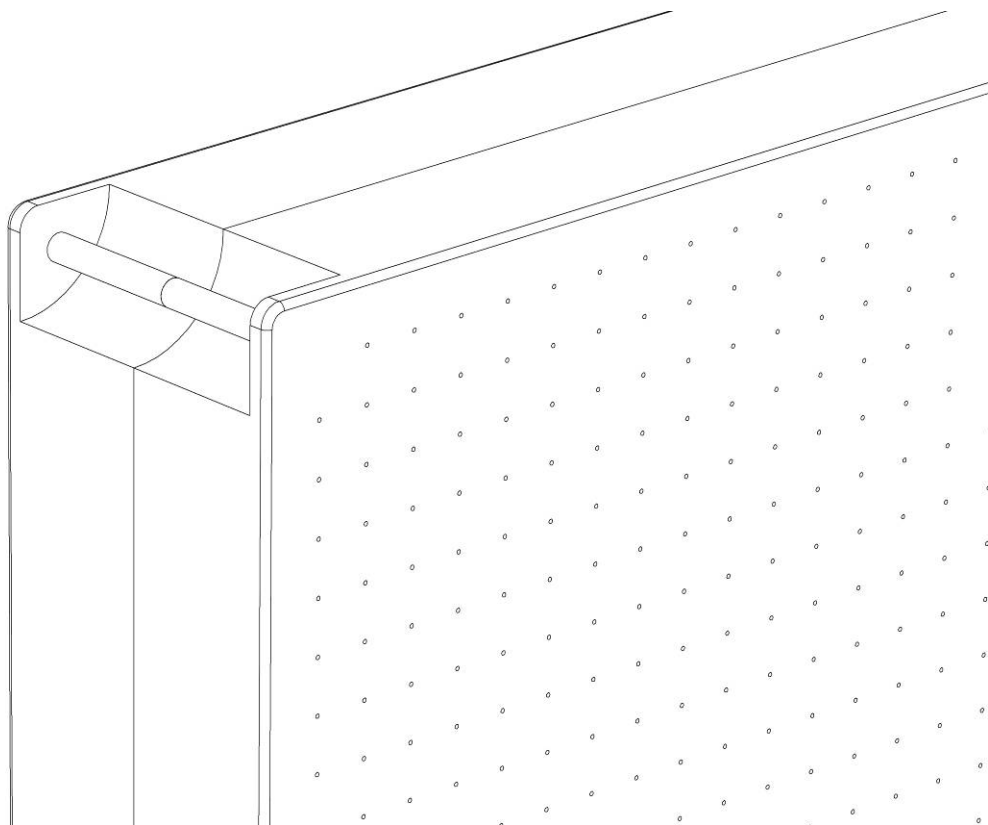


Abb. 125: Modellstudien: Beispiel für einrastende Verbinder (lasergeschnitten)

Die H- und N-Verbinder erwiesen sich als zu filigran und bruchempfindlich. Weitere Verbinderlösungen sahen daher größere Auflageflächen und Dimensionen vor, um Hebelkräfte besser kompensieren zu können. Zudem wurde versucht, das verrastende Element etwas stärker zu dimensionieren.

Es wurde in diesem Zuge auch darüber nachgedacht, die Funktion des Rastens evtl. mit der Funktion der Halbschalenverbindung zu kombinieren. Denkbar sind Stege, die einen Clip aufnehmen und gleichzeitig als Verbindungsdom ausgelegt sind.



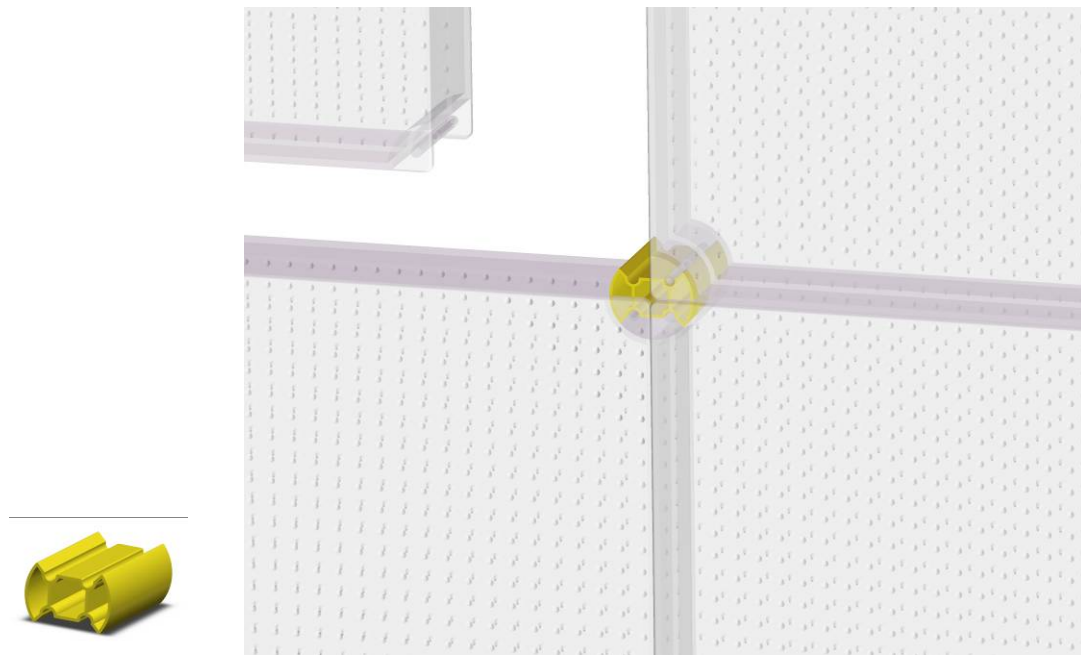


Abb. 126: Darstellung eines Funktionsprinzips einer Moduladdition mittels einrastenden Verbinderelementen

Der dargestellte Verbinder ist nur symbolisch und funktional nicht ausgearbeitet. Konstruktiv muss das optimale Klemmmoment noch ermittelt werden.

Beiden Lösungen ist gemein, dass zudem über ein separates Element nachgedacht werden muss, wenn auch die Möglichkeit einer Modulmontage über Eck erfolgen soll. Diese konzeptionelle Grundvoraussetzung bedeutet bei den vorangegangenen Lösungen entweder ein weiteres Eckmodul oder einen weiteren Eckverbinder.



Abb. 127: Separates Eckmodul

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse mit den Steckverbindern wurden im nächsten Schritt mechanische Verbindungen (Schraubverbinder, Excenter, Bajonettverschlüsse

o. ä.) untersucht. Eine mechanische Verbindung hat gegenüber der Steckverbindung konstruktive Vorteile. Die Module sind untereinander fest verbunden und lassen sich bei Bedarf mechanisch wieder voneinander lösen. Im montierten Zustand lassen sich i. d. R. höhere Kräfte aufnehmen als mit einem reinen Stecksystem. Ein Auseinanderfallen einer Modulwand kann dadurch verhindert werden. Fertigungstoleranzen lassen sich entweder besser ausgleichen oder haben nicht so große Auswirkung auf die Gesamtstabilität.

Erste Studien waren eher technisch funktional orientiert. Es zeichnete sich bereits ab, dass eine Montage von vier Modulen über die Sichtflächen erfolgen muss oder zumindest den Zugriff auf den Verbinder hierüber ermöglichen.



Abb. 128: CAD Studie Excenter-Verriegelung

Der Riegel liegt in geschlossenem Zustand flächenbündig an. Die Montage kann werkzeuglos erfolgen. Eine Bedienung / Verriegelung von einer Seite kann jedoch statisch problematisch sein. Für Eckverbindungen benötigt man einen zusätzlichen Verbinder.

Die Verbindung über Einlegeteile und Stifte stellt eine, die Verbindungssituation visuell weniger betonende Möglichkeit dar. Hier werden separate Verbinderelemente zwischen die Kuben gelegt und mit nägelartigen Stiften miteinander verbunden. Der Montageaufwand ist etwas höher als beim Drehverbinder. Drei Verbinderarten bedeuten einen etwas höheren Werkzeugaufwand.



Abb. 129: Verbindung mittels Einleger und Stiften

Ein Verschluss, der sich, ähnlich wie bei einem Bajonettverschluss, mittels 90° Drehung verriegeln lässt, stellt eine alternative, montagefreundliche Lösung dar. Der Vorteil liegt in der leichten Bedienbarkeit. Es wären hier zudem nur zwei Verbindertypen nötig.

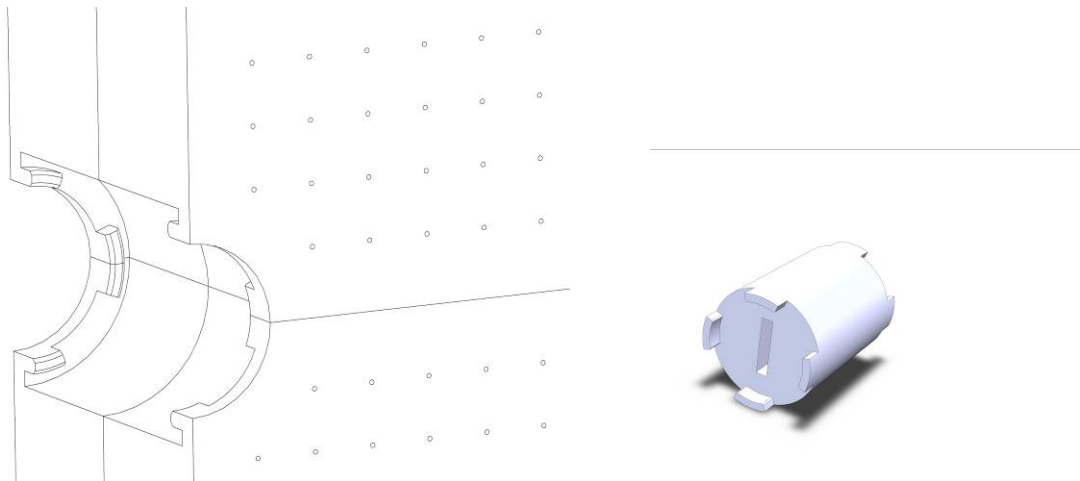


Abb. 130: Drehverbinder ähnlich dem Bajonettprinzip

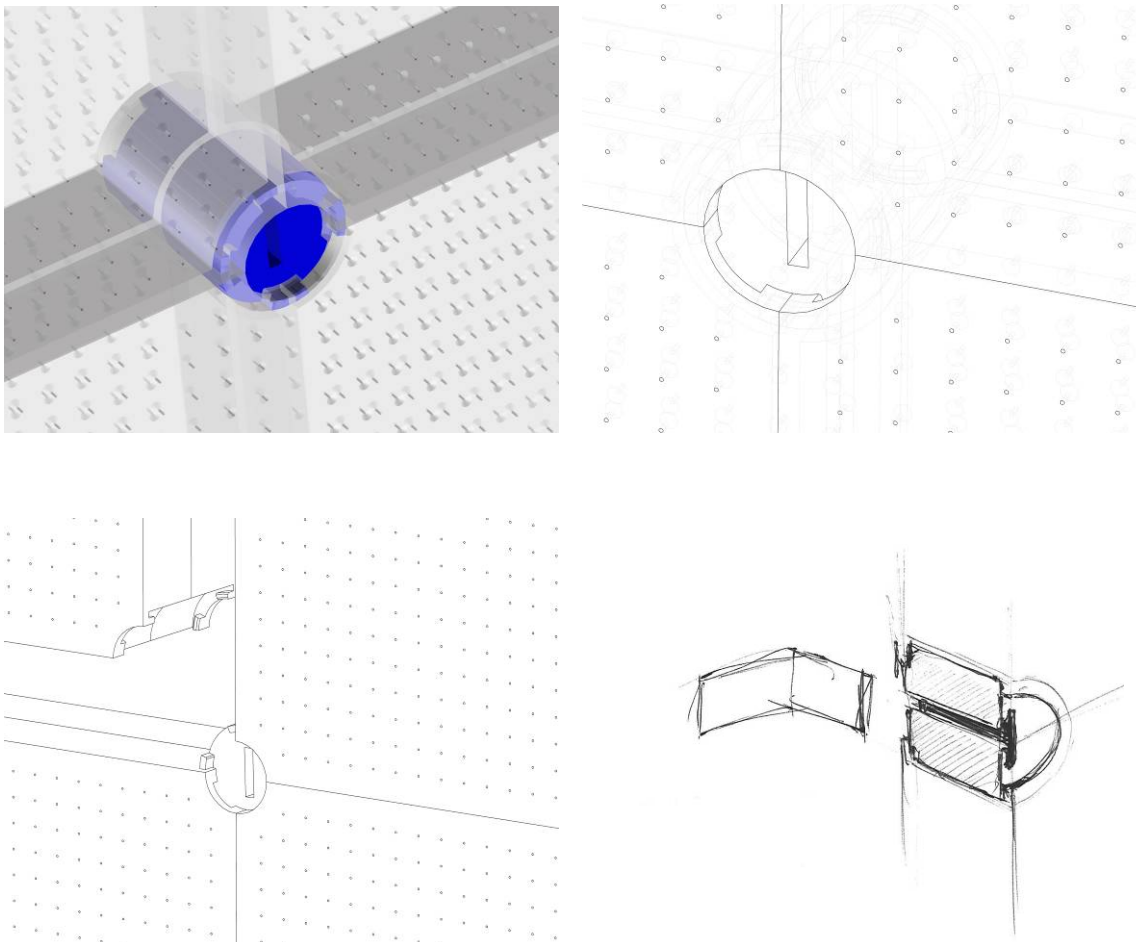


Abb. 131: CAD Darstellung des Drehverbinders und Skizze einer Eckverbindung

Formal ist dieses Element gestalterisch betont, um die Funktion des Verbindens zu visualisieren. Die Aufmerksamkeit wird auf den Verbindungspunkt gelenkt. Die Möglichkeit der Demontierbarkeit rückt als visuelle Botschaft dadurch etwas stärker in den Vordergrund.

Für die Eckverbindung sind entweder stabile Metallwinkel zum Einschleiben und/oder mit dem Verbinder verschraubbare Winkel notwendig. Die „offene Ecke“ müsste ggf. mit einem separaten Profil geschlossen werden.

4.2.4 Oberflächenstrukturen, ornamentale Strukturen

„Ich würde die Fugen der Module überspielen durch ein kleinteiligeres Muster.“
(Stefan Behnisch)

Diese Einschätzung war Ausgangspunkt gestalterischer Überlegungen mit dem Ziel, die sichtbare Modularität der additiven Strukturen etwas zu überspielen. So können z. B. modulübergreifende Motive, Texturen und Oberflächenstrukturen von der Modularität ablenken.

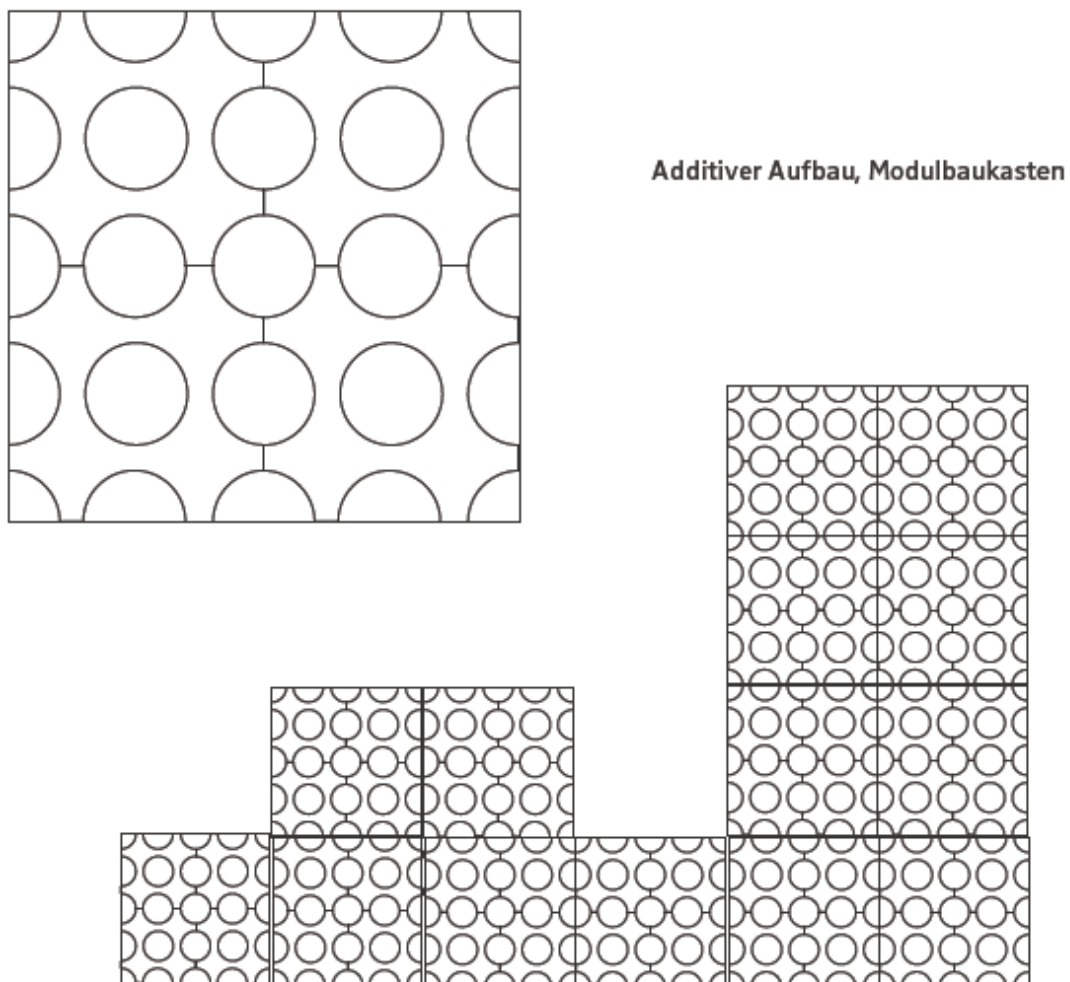


Abb. 132: Modulübergreifendes Motiv. Die Betonung liegt auf den Punkten. Die vertikale und horizontale Trennung rückt visuell etwas in den Hintergrund.

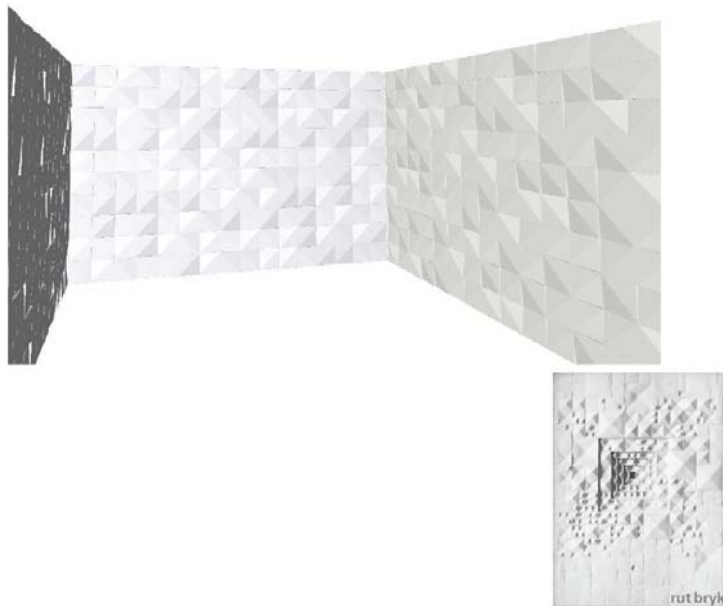


Abb. 133: Dimensionale Oberflächenverformung als Relief

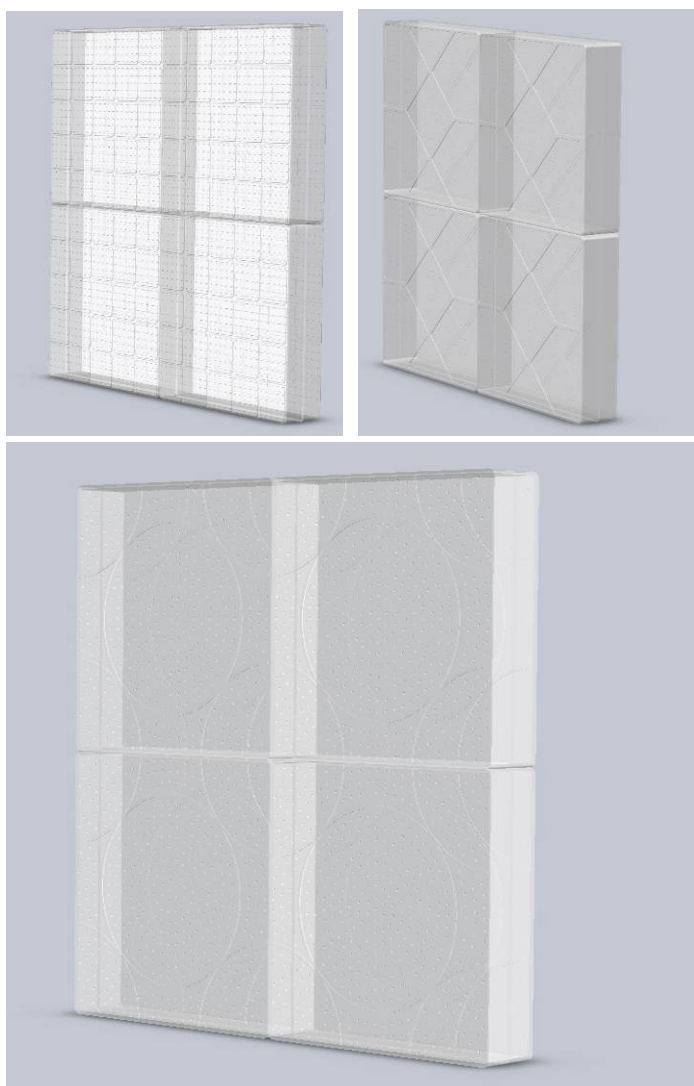
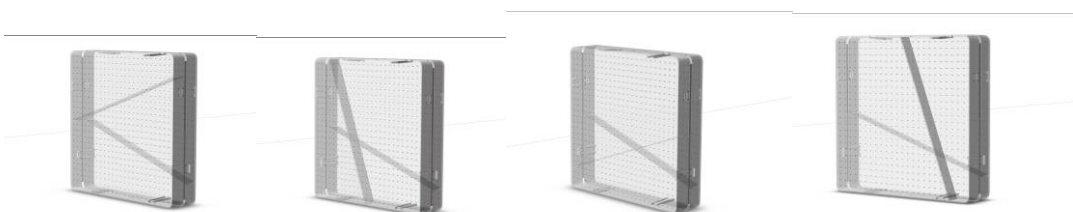
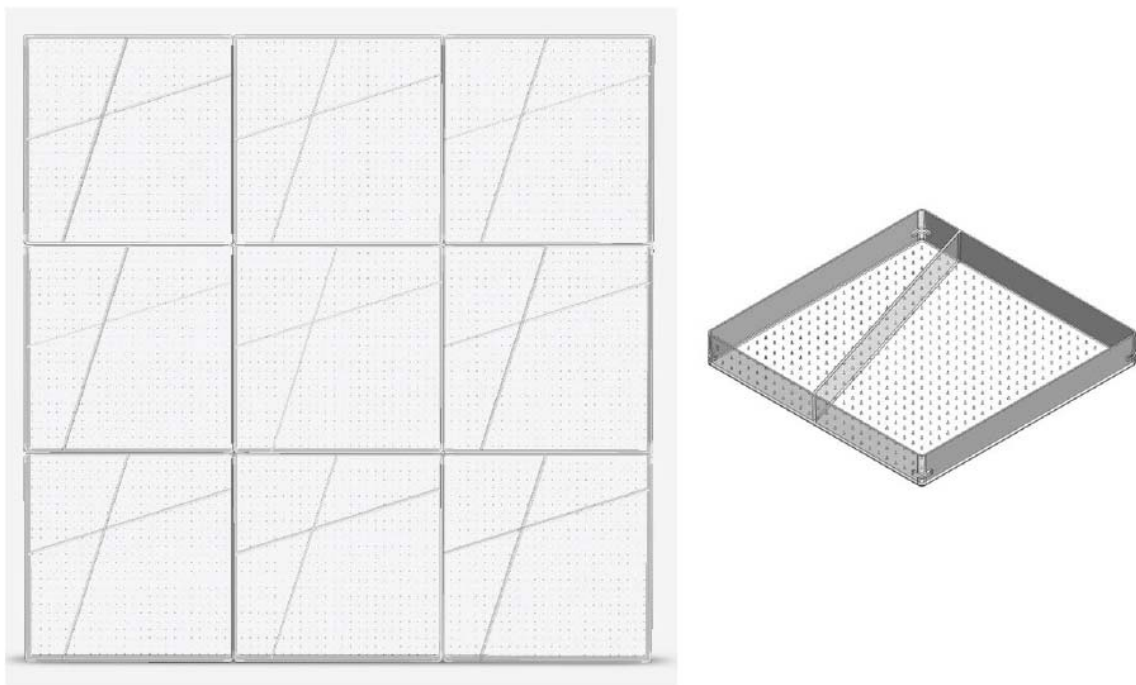


Abb. 134: Beispiele zu einfachen modulübergreifenden Linienstrukturen

Die modulübergreifenden Strukturen können sowohl plastisch dreidimensional auf der Oberfläche vorhanden sein, z. B. in Form von Stegen, Mustern oder Motiven, als auch als interne Struktur z. B. als Versteifungsstege, mit denen sich durch unterschiedliche Anordnung der Stege, unterschiedliche Muster generieren lassen.

Zum Teil wirken diese Strukturen gestalterisch sehr beliebig und „aufgesetzt“, teilweise ornamental. Gestaltungsansätze, die eine Struktur über eine dreidimensionale Verformung der Oberflächen (ähnlich Fassaden) erzeugen, sind aufgrund der zu integrierbaren Mikroperforation sehr aufwendig in der Umsetzung.

Texturen durch z. B. innenliegende Stege o. ä. sind fertigungstechnisch relativ leicht zu realisieren und können ggf. noch eine Funktion beinhalten, wie in nachfolgendem Beispiel, wo der Steg gleichzeitig eine aussteifende Funktion übernimmt.



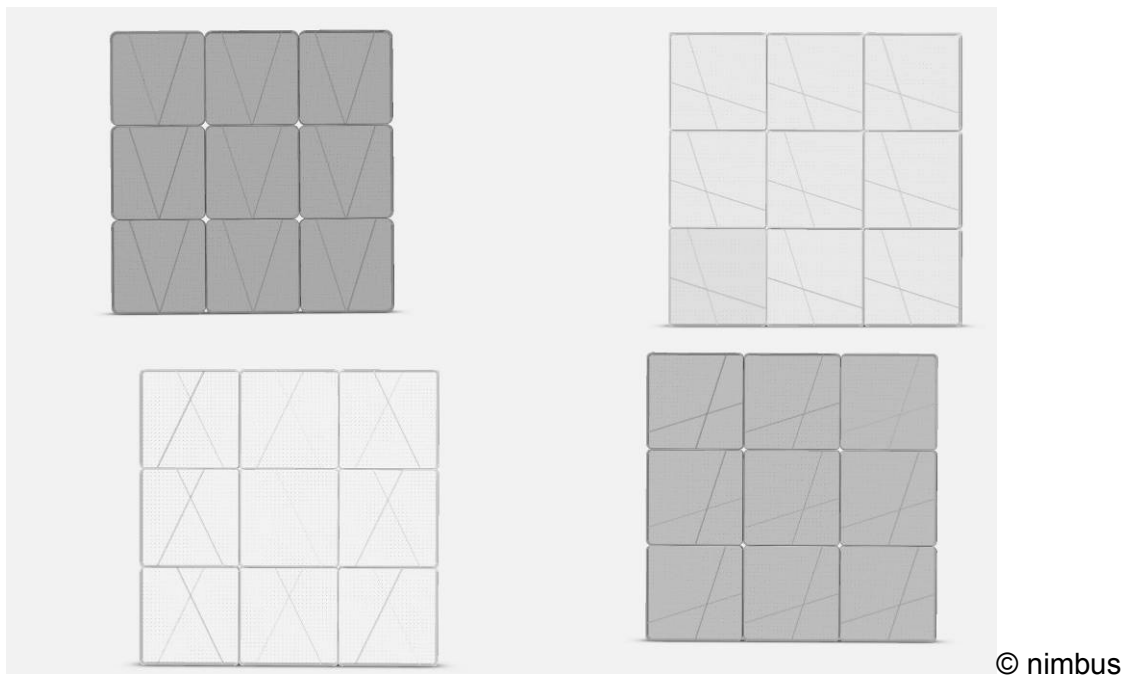
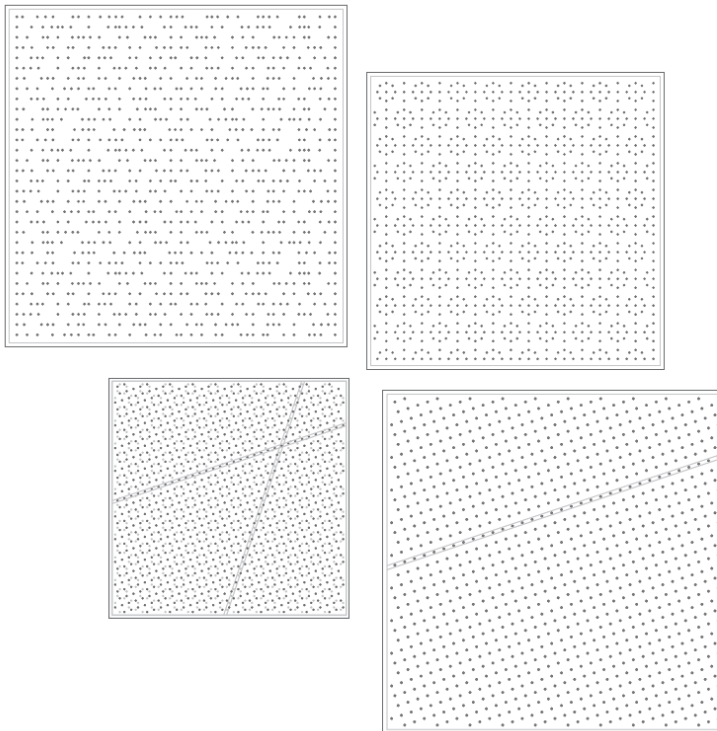


Abb. 135: Variation der Flächenwirkung über ein Halbschalenmodul, das bei der Montage durch Verdrehen um 90° vier verschiedene Motive in einem Modul erzeugen kann.

In Addition ergibt sich dadurch eine große Anzahl an Variationsmöglichkeiten.

Eine weitere Möglichkeit der Oberflächenvariation und der modulübergreifenden Motivzusammenführung wäre die Variation der Mikroperforation. Aus fertigungstechnischen Gründen und Gründen des Werkzeugbaus (der Pinabstand sollte nicht < 8 mm sein), ist man hier sehr eingeschränkt. Gestaltungsmöglichkeiten hätte man hier nur über eine Vergrößerung der Lochabstände, was unter akustischen Gesichtspunkten eine Verschlechterung der Performance nach sich ziehen würde.

Einfache Varianten, wie zum Beispiel eine Schrägstellung der Lochreihung können ohne eine akustische Einbuße realisiert werden.



© nimbus



Abb. 136: Perforationsmuster Bild: ITKE © M. Damböck

4.2.5 Fazit zu technische und formale Ausarbeitung

Für die Gestaltung des Akustikmoduls lassen sich zusammengefasst drei der wichtigsten, formgebenden Faktoren hervorheben:

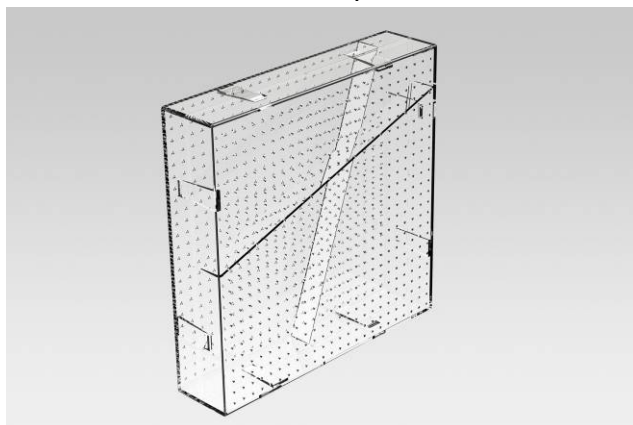
- Akustik
- Fertigungstechnik
- Verbindungsmöglichkeit

Unter akustischen Gesichtspunkten sind möglichst viele Löcher in der Oberfläche wünschenswert. Die fertigungstechnischen Vorgaben des Werkzeugbaus erlauben einen Minimalabstand der Löcher von 8 mm sowohl in horizontaler, als auch vertikaler Richtung. Eine Verkleinerung der Lochabstände ist aus o. g. Gründen nicht möglich. Ein konsequentes, quadratisches Raster stellt daher die unter technischen Gesichtspunkten beste Lösung dar. Formal ergibt sich als Konsequenz hieraus ein gleichmäßiges Lochbild.

Als fertigungstechnisch betrachtet einzige Methode, die sämtliche Fertigungsschritte in sich vereinen kann, ist das Spritzgussverfahren. Eine Halbschale mit 250 x 250 mm Außenmaß stellt das ausgewogenste Verhältnis zwischen Werkzeug- und Produktionskosten dar. Das Maß ist architekturkompatibel und ermöglicht flexible, modulare Anwendungen.

Die Verbindung der Module soll räumliche Anordnungen in horizontaler und vertikaler Richtung ermöglichen, als auch räumliche Anordnung über Eck ermöglichen. Ein entsprechend dimensionierter und funktional gut bedienbarer Verbinder ist hierfür Voraussetzung. Die formale Abwägung war zwischen einem möglichst unsichtbaren und einem bewusst gestalteten, optisch wahrnehmbarem Verbinder zu suchen. Aus den vorangegangenen Studien resultierte jedoch die Erkenntnis, dass es gestalterisch nicht möglich ist einen Verbinder nahezu unsichtbar zu gestalten, ohne Kompromisse hinsichtlich Stabilität und/oder Bedienbarkeit einzugehen.

Bereits die ersten Studien wiesen eine formale Reduktion und Strenge auf. Dennoch waren diese Studien z. T. formal stark von technischen Detaillösungen geprägt, die in einem Widerspruch zu einer reduzierten Produktsprache standen. Details, wie z. B. die in die Halbschalen integrierten Schnappverbinder sind bei der angestrebten transluzenten Materialität visuell sehr präsent.



© nimbus

Abb. 137: Rendering Akustikmodul



Abb. 138: Modellstudie (im 3D Sinterverfahren hergestellt) Bild: ITKE © M. Damböck

Da aufgrund der Beschränkung auf eine Halbschale auch eine Symmetrie um die Mittelachse nicht gegeben ist, wirkt das formale Erscheinungsbild unausgewogen und unruhig. Eine lineare Trennung, ohne aus der Form herausstehende Elemente, unterstreicht die formale Reduktion des Moduls. In der Addition der Module resultiert hieraus eine ruhige, neutrale Gesamterscheinung mit möglichst wenig (störenden) visuellen Reizen. Die Verklebung/Verschweißung der Halbschalen löst diese formale Anforderung am konsequentesten.

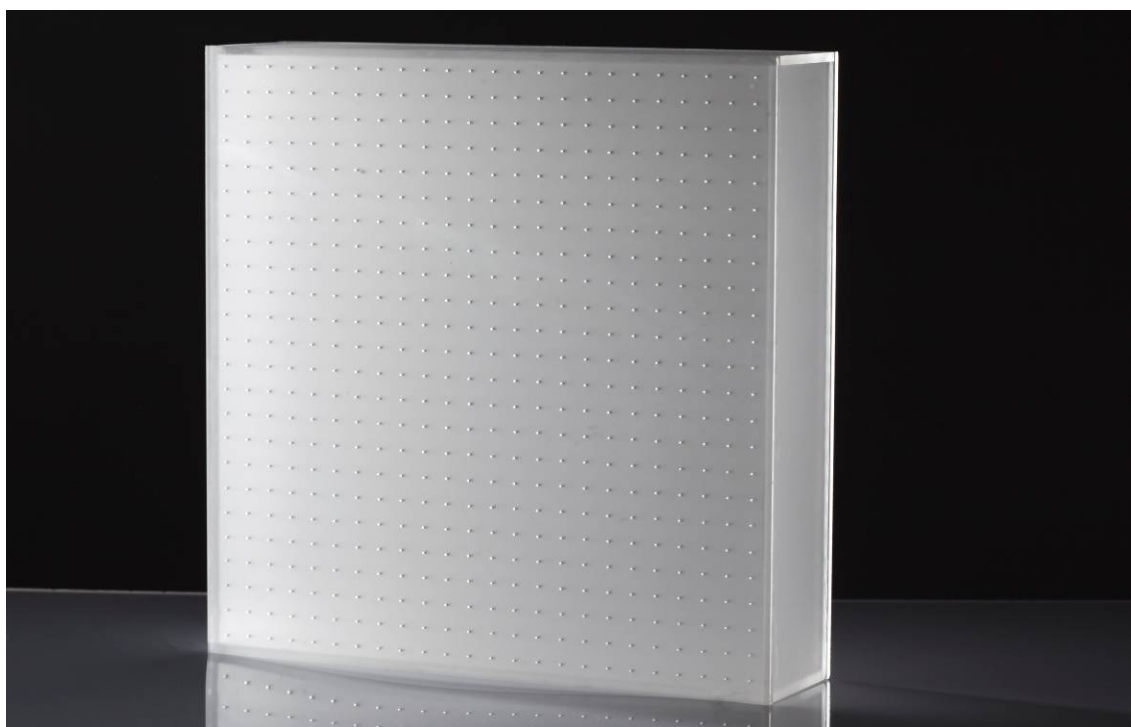


Abb. 139: Modellstudie: konsequente, formale Reduktion und hochwertige Materialästhetik als Gestaltungsziel Bild: ITKE © M. Damböck

Die angestrebte formale Reduktion fußt in der Designsprache der nimbus group bzw. von rosso Produkten. „Typische“ rosso Produkte zeichnet eine sehr reduzierte und fein formulierte Produktsprache aus. Folienbehänge und CP30 weisen i. d. R. eine sehr feine Transluzenz mit sehr feiner Oberflächenstruktur auf. Die Gestaltung unterstreicht die hochwertige und präzise Verarbeitung, ohne gestalterischen Selbstzweck und mit Verzicht auf jegliche dekorative Elemente. Durch die reduzierte Formensprache werden die sorgfältige Materialauswahl und die hochwertigen Oberflächen visuell unterstrichen.

Bei den Biocomposite-Modulen ist eine Ästhetik, die aus der Materialität des Kunststoffes und der Oberfläche resultiert, daher das primäre Gestaltungsmerkmal. Je weniger die Form von der Materialität ablenken kann, desto wichtiger ist das Material und seine Oberfläche. Eine sorgfältige Auswahl der Oberflächennarbung sowie des Transluzenzgrades und der „Farbe“ des Kunststoffes müssen ein stimmiges Gesamtbild ergeben. Gestaltungsziel ist eine (Material-)Ästhetik, die mit den rosso Produkten gut korrespondiert.



Abb. 140: CP 30 frost (links); simulierter Transluzenzgrad des Akustikmoduls (rechts); Bilder © nimbus group

4.3 Akustik

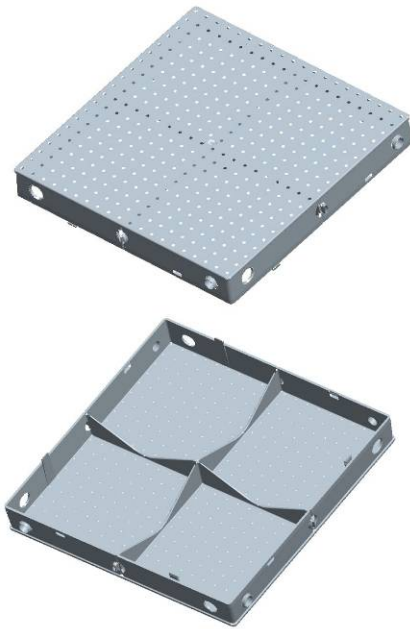
4.3.1 Einfluss der Parameter auf die Akustik

Aus den Messungen der ersten Demonstratoren wurden die Erkenntnisse gewonnen, dass sowohl die Gesamtdicke des Moduls, als auch die Luftdurchlässigkeit des Kerns die Absorptionsgrade beeinflussen.

Anhand eines digitalen Modells des Biocomposites Moduls wurden nun die Einflüsse weiterer Faktoren rechnerisch ermittelt. Berechnet wurde die Absorptionswirkung des Moduls in Abhängigkeit der Faktoren Lochabstand, Lochdurchmesser, Schichtdicke und Abstand zwischen beiden Schichten, sprich Gesamtdicke. Alle Berechnungen

wurden mit einer angenommenen Luftschichtdicke (also Wandabstand) von 100 mm ausgeführt, unter der Annahme von senkrechtem Schalleinfall.

Biocomposites Modul: Ein spritzgegossenes Modul, das aus zwei identischen Halbschalen aufgebaut ist. Die Halbschalen sind mit Aussteifungsrippen versehen, die das Modul in vier Felder unterteilen.



Abmessungen: 20 cm x 20 cm

Abmessungen der Felder zwischen Aussteifungsrippen: 10 cm x 10 cm

Lochabstand: variabel

Lochdurchmesser: variabel

Schichtdicke: variabel

Gesamtdicke: variabel

Abb. 141: Digitales Modell Biocomposites Modul

Lochabstand

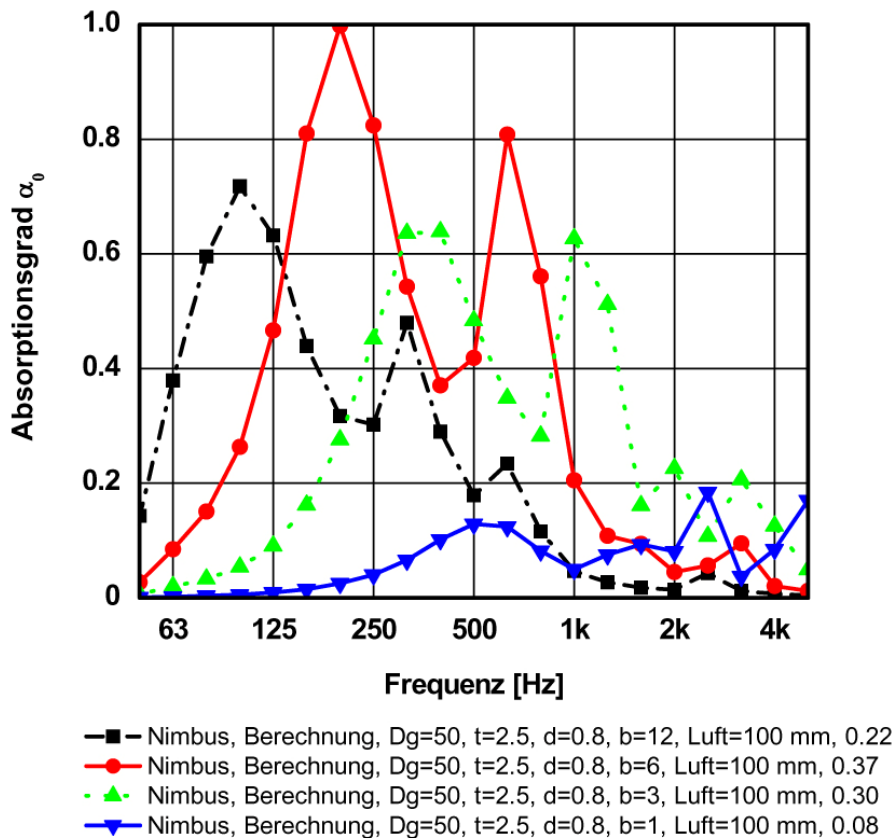


Abb. 142: Berechnung Absorptionsgrade bei veränderten Lochabständen

Das Modul, das diesen Berechnungen zugrunde liegt hat eine Gesamtdicke von 50 mm, eine Schichtdicke von 2,5 mm und einen Lochabstand von 8 mm. Berechnet wurde die Absorption bei Lochabständen von 12 mm, 6 mm, 3 mm und 1 mm.

Die beste durchschnittliche Absorption liegt mit einem Wert von 0,37 bei einem Lochabstand von 6 mm.

Je größer die Lochabstände sind, desto besser werden tiefere Frequenzen absorbiert. Bei der mikroperforierten Oberfläche sind sowohl das Verhältnis von offener zu geschlossener Fläche wichtig, als auch eine möglichst gleichmäßige Verteilung.

Lochdurchmesser

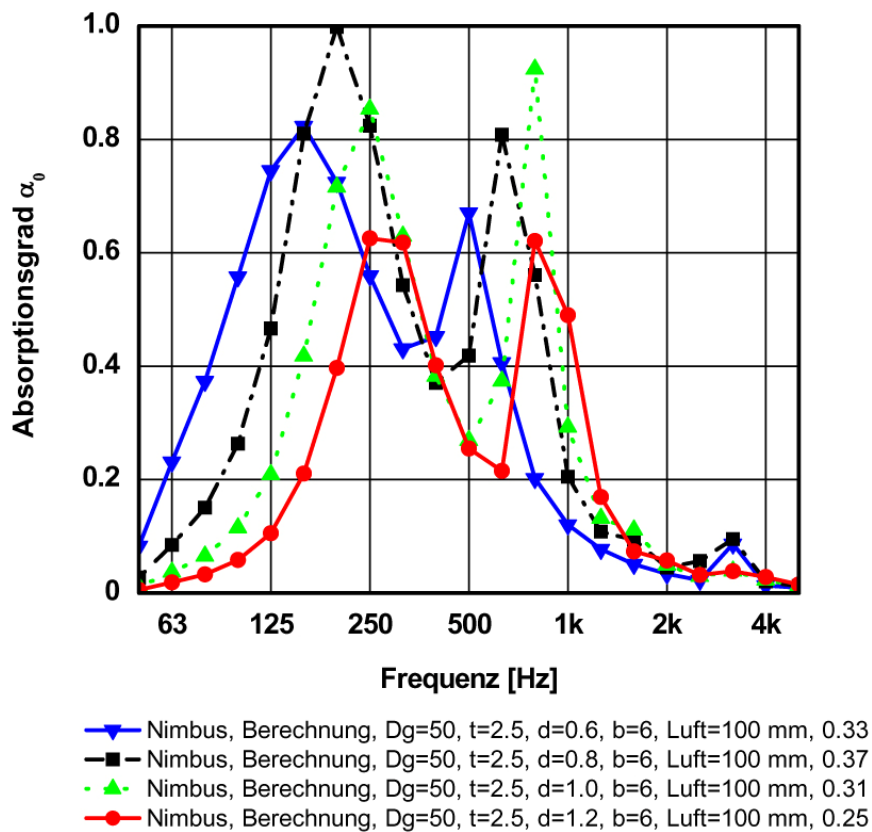


Abb. 143: Berechnete Absorptionsgrade bei veränderten Lochdurchmessern

Hier wurde ein Modul berechnet mit 50 mm Gesamtdicke, 2,5 mm Schichtdicke, 6 mm Lochabstand und Lochdurchmessern von 0,6 mm, 0,8 mm, 1 mm und 1,2 mm.

Die beste durchschnittliche Absorption liegt mit einem Wert von 0,37 bei einem Lochdurchmesser von 0,8 mm. Auch der Lochdurchmesser von 0,6 mm erzielt mit einer durchschnittlichen Absorption von 0,33 gute Ergebnisse. Beim Lochdurchmesser von 1,2 mm entsteht keine Reibung an der Lochoberfläche und damit keine Umwandlung des Schalls in Wärme.

Je geringer der Lochdurchmesser, desto besser werden tiefere Frequenzen absorbiert.

Schichtdicke

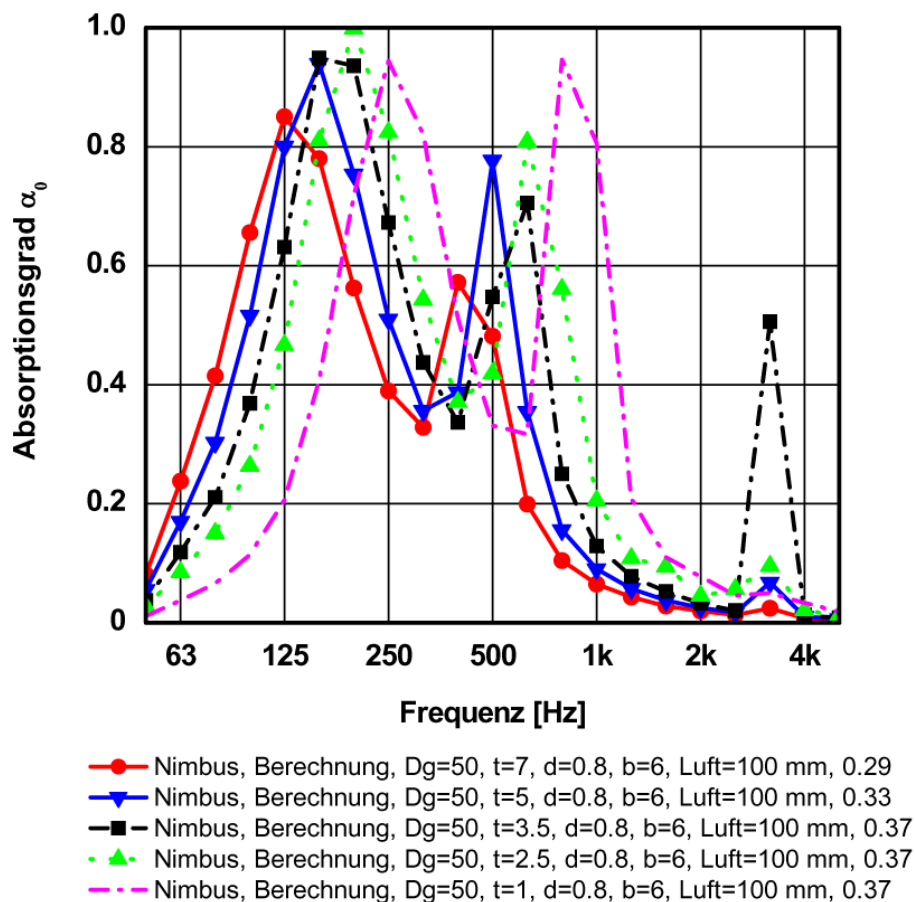


Abb. 144: Berechnete Absorptionsgrade bei veränderten Schichtdicken

Den Berechnungen liegt ein Modul zugrunde mit 50 mm Gesamtstärke, 0,8 mm Lochdurchmesser und 6 mm Lochabstand. Die Absorption wurde für die Schichtdicken 7 mm, 5 mm, 3,5 mm, 2,5 mm und 1 mm berechnet.

Gute durchschnittliche Absorptionswerte von 0,37 erreichten die Module mit den Schichtdicken 3,5 mm, 2,5 mm und 1 mm.

Je stärker die Schichten, desto mehr werden hohe Frequenzen reflektiert. Bei geringer Schichtdicke wird das Material durch den Schall in Eigenschwingung versetzt, die die Absorptionwirkung der Mikroperforation teilweise aufhebt. Dieser Eigenschwingung bei geringen Schichtdicken kann durch Aussteifungsstege begegnet werden. Je dicker die Schichten, desto besser werden tiefe Frequenzen absorbiert.

Gesamtdicke

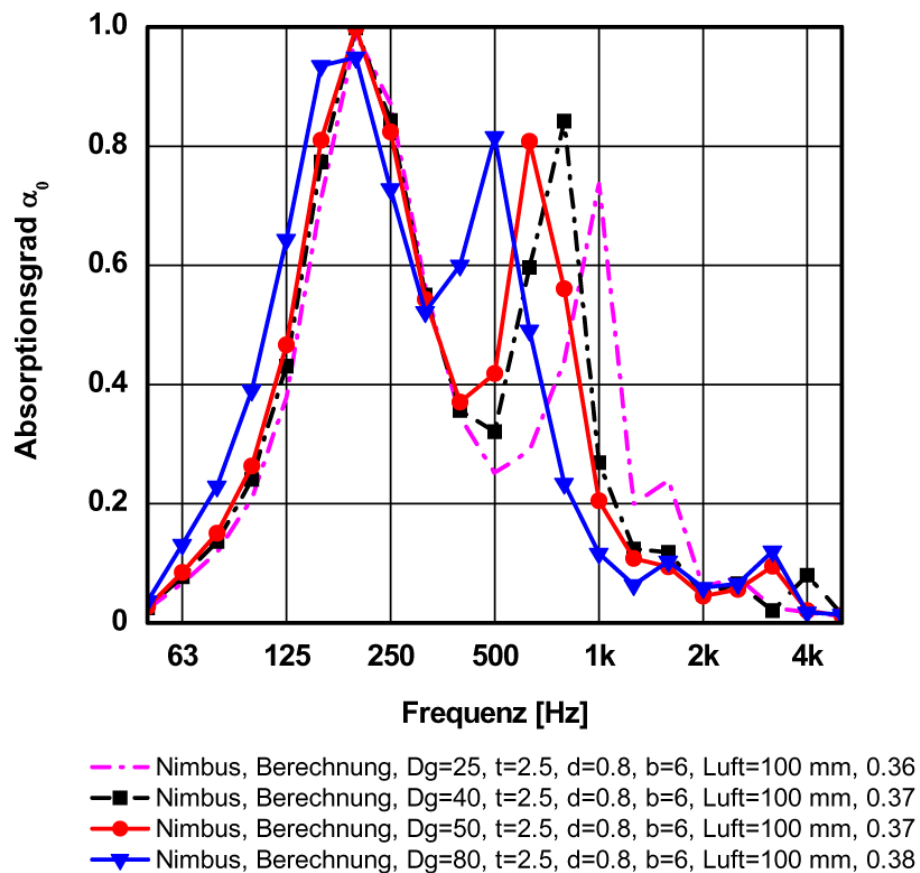


Abb. 145: Berechnete Absorptionsgrade bei veränderten Gesamtdicken

Das Modul, das hier berechnet wurde hat eine Schichtdicke von 2,5 mm, einen Lochdurchmesser von 0,8 mm und einen Lochabstand von 6 mm. Die Absorption wurde für die Gesamtdicken 25 mm, 40 mm, 50 mm und 80 mm berechnet.

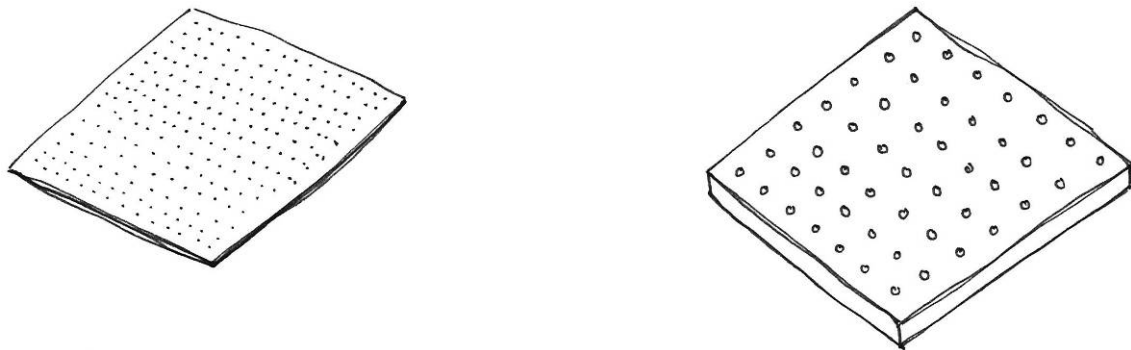
Alle Gesamtdicken erreichen gute durchschnittliche Absorptionswerte von 0,36 bis 0,38. Neben einer guten durchschnittlichen Absorption zeichnet sich ein guter Absorber durch eine möglichst gleichmäßige Absorptionsverteilung über einen breiten Frequenzbereich aus. Bei den beiden Gesamtdicken 25 mm und 40 mm sind die Einbrüche bei ca. 500Hz zu groß.

Je größer die Gesamtdicke, desto kleiner sind die Abstände zwischen den Absorptionsmaxima und desto ausgeglichener ist die Absorptionskurve. Das beste Absorptionsverhalten haben also die Module mit den Gesamtstärken 50 mm und 80 mm. Je größer die Gesamtdicke, desto besser werden tiefere Frequenzen absorbiert.

4.3.2 Fazit

Das beste Absorptionsverhalten wird von einem Modul erreicht, das einen Lochabstand von 6 mm hat, einen Lochdurchmesser von 0,8 mm, eine Schichtdicke von 2,5 mm und eine Gesamtdicke von 50 mm oder 80 mm.

Die Faktoren Lochabstand, Lochdurchmesser und Schichtdicke bedingen sich gegenseitig. Bei größerem Lochabstand müssen auch Lochdurchmesser und Schichtdicke vergrößert werden. Bei größerem Lochdurchmesser muss auch die Schichtdicke erhöht werden. Umgekehrt bedeutet eine größere Schichtdicke auch größere Lochdurchmesser.



Geringer Lochabstand, geringer Lochdurchmesser, geringe Schichtdicke

Größerer Lochabstand, größerer Lochdurchmesser, größere Schichtdicke

Abb.146: Skizze zu den Abhängigkeiten Schichtdicke, Lochabstand und Lochdurchmesser

Eine bessere Absorption von tieferen Frequenzen kann durch größere Lochdurchmesser, größere Schichtdicke und eine größere Gesamtdicke des Moduls erreicht werden.

4.4 Kalkulation

4.4.1 Preise

Mit dem Biocomposites-Modul wollte man ein Produkt entwickeln, das zum einen aus Biokunststoffen mit möglichst hohem Bioanteil besteht und das zudem etwa 30% günstiger ist als das System CP30. Neben der Nachhaltigkeit wollte die Firma Nimbus über den Preisvorteil einen weiteren Kaufanreiz bieten. Die Herausforderung war also, die vermutlich höheren Rohstoffpreise durch Herstellung und Design so auszugleichen, dass das entwickelte Produkt im Verkauf dennoch günstiger ist. Die Entscheidung für die Herstellung mittels Spritzguß war ein wichtiger Schritt zum Erreichen dieser hoch angesetzten Ziele. Die maximalen Herstellungskosten je Quadratmeter wurden mit 85,- € angesetzt.

In der Entscheidung der Modulabmessungen spielten die Herstellungskosten eine große Rolle.

Herstellungskosten bei einem Modul der Seitenlänge 20 cm

Die Kosten für eine spritzgegossene Halbschale der Abmessungen 20 cm auf 20 cm auf 2,5 cm mit einer Wandstärke von 2 mm betragen 1,485 €. Zur Herstellung eines Quadratmeters gebauter Fläche werden 50 dieser Halbschalen benötigt. (Zwei Halbschalen ergeben ein Modul, fünf mal fünf, also 25 Module werden für einen Quadratmeter benötigt.) Damit ergeben sich Herstellungskosten von 74,25 € je Quadratmeter. Um innerhalb der Richtkosten von 85,-€ je zu bleiben, ergibt sich ein freies Budget von 10,75 € für Flächenverbinder und Eckverbinder.

Herstellungskosten bei einem Modul der Seitenlänge 25 cm

Die Kosten für eine Halbschale der Abmessungen 25 cm auf 25 cm auf 2,5 cm mit Wandstärke 2 mm liegt zwar mit 1,57 € höher als die Kosten für die 20er Halbschale, im Flächenverbund ergeben sich allerdings geringere Herstellungskosten je Quadratmeter. Zur Herstellung einer quadratmetergroßen Fläche benötigt man statt 50 Modulen hier nur 32. Die Herstellungskosten je Quadratmeter liegen demnach bei 50,24 €. Damit ergibt sich ein freies Budget von 34,76 € für Verbindungsteile.

Die größeren 25er Module sind im Flächenverbund um etwa ein Drittel günstiger als die 20er Module.

4.4.2 Gewicht

Neben den Herstellungskosten war auch das Gewicht ein ausschlaggebender Faktor in der Entscheidung für die 25er Module.

Gewicht bei einem Modul der Seitenlänge 20 cm

Das Gewicht einer spritzgegossenen Halbschale mit Seitenlänge 20 cm und einer Tiefe von 2,5 cm bei einer Wandstärke von 2 mm wurde mit etwa 200 g angenommen. Bei einer Anzahl von 50 Halbschalen je Quadratmeter ergibt das ein Gewicht von etwa 5 kg. Eine Größe von etwa 1,44 m², was einem Standard-Paneel der CP30 entspricht, wiegt demnach etwa 7,2 kg. Das CP30 Standard-Paneel (Abmessungen 90 cm x 160 cm) wiegt inklusive Klemmfüße 4,3 kg.

Gewicht bei einem Modul der Seitenlänge 25 cm

Das Gewicht einer Halbschale mit 25 cm Seitenlänge und einer Tiefe von 2,5 cm wiegt bei einer Wandstärke von 2 mm etwa 290 g. Daraus ergibt sich ein Gewicht von etwa 4,6 kg je gebauter Quadratmeter. Eine Fläche der Größe eines CP30 Standard-Paneels wiegt demnach etwa 6,6 kg.

Die größeren 25er Module sind im Flächenverbund um etwa 10% leichter als die 20er Module.

4.4.3 Preisveränderungen mit längeren Taktzeiten

Die Taktzeiten beim Spritzguss der Halbschale mit Seitenlänge 25 cm betragen etwa 20 Sekunden. Um aber die gewünschte Wärmeformbeständigkeit im Produkt zu erreichen muss die Verweildauer des Kunststoffes im Formwerkzeug drei bis fünf Minuten betragen. Siehe hierzu auch **5.3.4 Wärmeformbeständigkeit (HDT-B) nach erhöhter Werkzeugtemperatur und längeren Kühlzeiten.**

Die Werkzeugtemperatur beträgt hierbei 100°C. Die ökonomischen Taktzeiten von 20 Sekunden verlängern sich daher auf 180-300 Sekunden.

Bei einer Taktzeit von drei Minuten betragen die Herstellungskosten einer 25er Halbschale 3,45 € statt wie bei der Taktzeit von 20 Sekunden 1,57 €. Im Flächenverbund bedeutet das Herstellungskosten von 110,40 € je Quadratmeter. Damit liegt man schon ohne Einbeziehen der Verbindungen 25,40 € oder knapp 30% über dem Richtkosten. Bei einer Taktzeit von vier Minuten betragen die Herstellungskosten je Halbschale 3,80 € und je gebautem Quadratmeter 121,60 € - 43% über den Zielkosten. Bei fünf Minuten liegt die Halbschale bei 4,50 € und der Quadratmeter bei 144,00 €. Damit liegen die Herstellungskosten schon 70% über den Richtkosten.

Mit einer Überschreitung der Zielkosten um mindestens 30% exklusive der nötigen Verbindungen sind die längeren Taktzeiten in der Produktion nicht realisierbar.

5 Modifikation biobasierter Kunststoffe zur Herstellung des Akustikmoduls

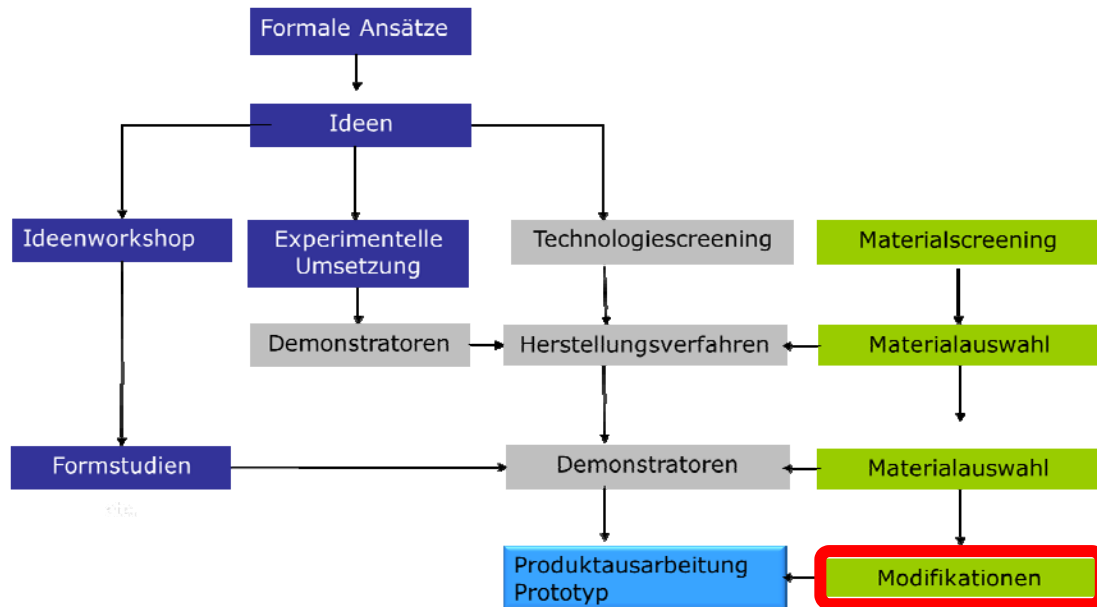
Nachdem die Entscheidung zur Entwicklung eines Akustikmoduls mittels Spritzguss feststand, wurde klar, dass keine auf dem Markt verfügbaren Biokunststoffe für die Anwendung geeignet waren.

Der nach unserer Erkenntnis einzig verfügbare, Flammenschutz behandelte Polylactid-Granulat für Spritzgussanwendungen, dessen Wärmeformbeständigkeit bei 134°C liegt, ist SUPLA C1003 der Firma SUPLA Materials Technology Co., LTD aus Taiwan. Bei einer testweisen Verarbeitung am Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart stellten wir fest, dass die Schmelze für die Anwendung zu zähflüssig ist. Des Weiteren ist der Werkstoff bei einer Plattenstärke von 2,5 mm völlig opak und weist somit nicht die vom Projektpartner gewünschte Lichtdurchlässigkeit bzw. Transluzenz auf. Negativ waren des Weiteren die hohen Frachtkosten, da in Europa bisher kein Vertrieb existiert. Die bei Polylactid übliche Gelbstichigkeit des Materials war außerdem noch vorhanden.



Abb. 147: Produkte aus SUPLA®

Daher wurde zunächst nach geeigneten thermoplastischen Biokunststoffen gesucht, die sich hinsichtlich der in 5.1. und 3.7.1. genannten Anforderungen modifizieren lassen.



5.1 Zusammenfassung: Anforderungen an den Werkstoff

Da die Perforation in den Deckschichten mittels Spritzguss hergestellt werden soll, bedarf es einer möglichst dünnflüssigen Schmelze (mindestens vergleichbar mit Polycarbonat), die das Umfließen der Pins ermöglicht. Da die Schmelze an jedem Stahlstift abgebremst wird, muss das Material in der Lage sein, einen möglichst langen Fließweg zurückzulegen.

5.2 Vorauswahl biobasierter Kunststoffe für Spritzgussanwendungen

Da biobasierte Polyamide bereits ohne Flammschutz einen Kilogrammpreis von 7-11 € aufweisen, scheiden diese sofort aus.

Bei der Herstellung von Spritzguss-Formteilen wird der Kg-Preis des Biokunststoffes noch relevanter: Bei Sandwichplatten aus Folien, verwendet man Folienstärken von 0,15 bis maximal 0,5 mm. Die Spritzgussmodule werden aus Stabilitätsgründen eine Wandstärke von 1,8 - 3 mm aufweisen.

Polyactid ist um den Faktor 3-4 billiger als Celluloseacetat und weist zudem einen 20-50% höheren Anteil nachwachsender Rohstoffe auf.

Im Fokus der ab 5.3. beschriebenen Compoundierversuche liegt daher Polylactid. Cellulosediacetat wird zudem in die Versuchsreihen aufgenommen, da die Wärmeformbeständigkeit bereits ausreichend ist. Bei Polylactid muss die Wärmeformbeständigkeit sowie das Brandverhalten verbessert werden.

5.3 Versuche: Compoundierung

Es wurde ein Cellulosediacetat der Firma Mazzucchelli 1848 SpA mit einem Weichmacheranteil von 22% DEP (Diethyl phthalate) sowie eine niedrigviskose Polylactidtype (ingeo 3251D) der Firma NatureWorks LLC eingesetzt.

5.3.1 Zugabe von Flammhemmern unter Berücksichtigung der Lichtdurchlässigkeit

Da sowohl Cellulosediacetat, als auch Polylactid brennend abtropfen und leicht entzündlich sind, müssen beide hinsichtlich des Brandverhaltens verbessert werden.

Phosphorhaltige Flammschutzmittel:

Zunächst wurde mikroverkapseltes Ammoniumpolyphosphat eingesetzt. Da das APP in Nanometergröße vorlag, hatte man die Hoffnung, dass die Lichtdurchlässigkeit nicht beeinträchtigt wird. Die hergestellten Prüfstäbe sind bei einer Zugabe des APP von 10 Gewichtsprozenten vollständig opak (siehe Abb. 150, 5341 V1). Zur Entfaltung der Wirksamkeit wird eine Zugabe von mindestens 10, besser 15-20wt% empfohlen. Die Versuche mit APP wurden daher abgebrochen.

Die Zugabe des Flammhemmers Triphenylphosphat (TPP), der vornehmlich zur Verbesserung des Brandverhaltens bei Celluloseacetaten eingesetzt wird, zu Polylactid, verändert dessen Lichtdurchlässigkeit nicht. Siehe Abbildung 150. CK00 stellt dabei Polylactid ohne Zusätze dar. CK09 verkörpert ein Compound aus Polylactid, Nukleierungsmittel, optischen Aufheller und TPP (5-15 wt%).

Aromatisches Sulfonatsalz

Kalium-Diphenyl-Sulfon-Sulfonat wird als Flammhemmer bei transparenten Polycarbonatanwendungen verwendet. Eine Zugabe von 0,1-1Gewichtsprozenten wird hierbei empfohlen.

Die Zugabe eines Anti-Dripping-Mittels wie z.B. Phenyl Methyl Siloxan (PMS) wird hierbei von der Firma Arichem empfohlen. Bei den Compoundierversuchen am Fraunhofer Institut Chemische Technologie (ICT) entscheiden wir uns jedoch für die Zugabe von Nanoclay, das sind Magnesium-Aluminiumsilikat-Plättchen in Nanoskalierung, die ebenso als Anti-Dripping-Mittel fungieren. Sie erhöhen zudem die Festigkeit und Fließfähigkeit, ohne andere Eigenschaften zu beeinflussen. Die Zugabe erfolgt zu 1-3 Gewichtsprozent. Die aus dieser Versuchsreihe resultierenden Prüfstäbe sind in der Abbildung 150 ersichtlich: Die Prüfkörper CK07, CK06 und CK05 sind opak.

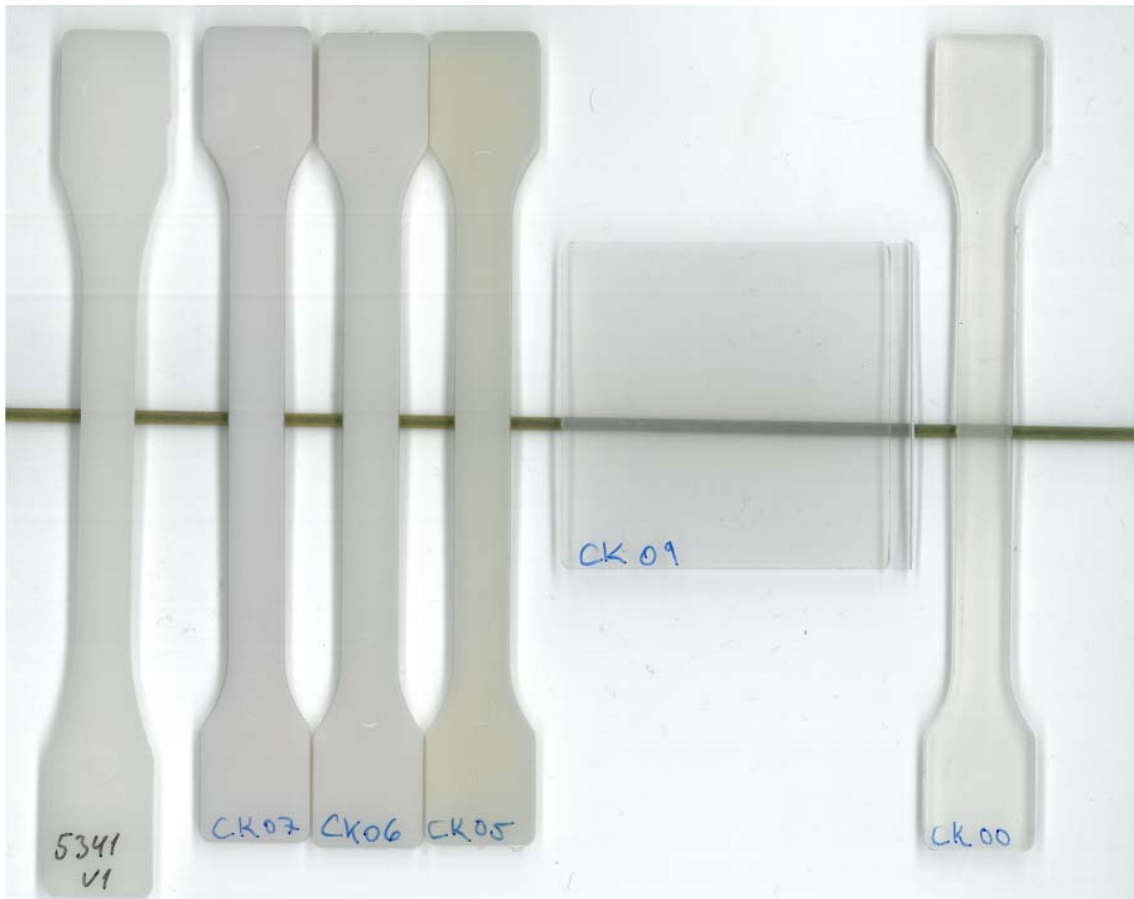


Abb. 148: Darstellung unterschiedlicher Transparenzgrade: mit Flammschutzmitteln modifiziertes Polylactid

5.3.2 Brandverhalten nach Zugabe der Flammhemmer

Da bei der Ermittlung der Baustoffklasse nach DIN 4201 oder DIN EN 13501 stets das gesamte Bauteil untersucht werden muss, erfolgt eine erste Einschätzung des Brandverhaltens mit Hilfe der Brennbarkeitsprüfung nach der UL 94 –VB.

Die vertikal in einem Halter befestigten Probekörper werden von unten in einem Winkel von 45° für 10 Sekunden beflammt (Flamme 20 mm). Nach dem ersten Verlöschen erfolgt eine weitere Beflammung der Probe für 10 Sekunden. Unterhalb der Probe wird im Abstand von 30 cm Watte angeordnet. Es wird während der Prüfung beobachtet, ob die Watte durch brennend abtropfendes Probenmaterial entzündet wird.

Geprüft werden 2x 10 Probekörper mit den Maßen 125 x 13 x >13 mm.

Die geprüften Prüfstäbe weisen eine Länge von 15 cm, eine Dicke von 4 mm sowie eine Breite von 2 cm (in der Mitte 1 cm) auf.

Es gelten folgende Brennbarkeitsklassen:

	V0	V1	V2
Anzahl der Probekörper	5	5	5
Zulässige Nachbrennzeit je Probe – eine Beflammung	<10s	<30s	<30s
Zulässige Gesamt-Nachbrennzeit bei 5 Proben und 2 Beflammungen	<50s	<250s	<250s
Bildung brennender Tropfen/ Entzündung der Watte zulässig	nein	nein	ja
Vergleichbar nach DIN 4102	B1	B2	B3

Tabelle 5: Brennbarkeitsklassen UL 94-Vertical Burning (VB)

- **Brandverhalten Polylactid (Nullprobe CK00)**

Die Nullprobe tropft brennend ab und entzündet sofort die darunter platzierte Watte.

Beitrag zum Brand: V2 nach UL94-VB (Euroklasse F oder B3)

- **Brandverhalten Cellulosediacetat (Plastiloid22) und das Brandschutzmittel TPP (Zugabe 10wt%)**

Die Flamme erlischt nach der ersten Beflammung nicht. Es entsteht schwarzer Rauch. Nach 10 Sekunden entstehen brennende Tropfen, die die platzierte Watte entzünden.

Beitrag zum Brand: V2 nach UL94-VB



Abb. 149: Prüfstäbe nach dem Brandtest, mark. Stab: Cellulosediacetat + 10wt% TPP

- **Brandverhalten Polylactid (ingeo 3251 D) und das Brandschutzmittel TPP (Zugabe 7-12 wt%), Nukleierungsmittel, optischer Aufheller**

Die Flamme erlischt immer sofort (nach 1s) nach Wegnahme der Flamme, teilweise sogar noch beim Beflammen. Erst bei der 2. Beflammung entstehen Tropfen, die jedoch nicht brennen und die die im Abstand von 30 cm platzierte Watte nicht entzünden.

Hier wurde auch eine größere Flamme gewählt (4 cm). Eine Beflammung erfolgt auch länger als 2x 10 Sekunden. Das Ergebnis war vergleichbar.

Kein Beitrag zum Brand: V0 nach UL94-VB

Der Brandversuch wurde mit Prüfstäben unterschiedlicher TPP-Dosierungen (5 unterschiedliche Dosierungen) durchgeführt und mehrfach (je 4x10) wiederholt.

- **Brandverhalten Polylactid (ingeo 3251 D) und das Brandschutzmittel TPP (Zugabe 6 wt%), Nukleierungsmittel, optischer Aufheller**

Erlischt nach Wegnahme der Flamme beim 1. Mal. Bei der zweiten Beflammung entstehen nach ca. 2-3 Sekunden brennende Tropfen, die die platzierte Watte entzünden.

Beitrag zum Brand: V2 nach UL94-VB

- **Brandverhalten Poly lactid (Ingeo 3251 D) und das Brandschutzmittel aromatisches Sulfonatsalz (Zugabe 1-3 wt%), Nanoclay, Nukleierungsmittel, optischer Aufheller**

Brennt nach Wegnahme der Flamme (nach 10 Sekunden) weiter. Es wird daher kein 2. Mal entzündet. Es entstehen große brennende Tropfen. Der Stab brennt schnell ab. Die Watte wird entzündet.

Beitrag zum Brand: V2 nach UL94-VB

Fazit

Die Kombination Poly lactid, Nukleierungsmittel, optischer Aufheller und das Flamm-schutzmittel TPP (>6wt%) kristallisierte sich als selbstverlöschend heraus und bestand mehrfach die Prüfung nach UL 94-VB mit V0.

Vorteilhaft ist zudem, dass das Triphenylphosphat (TPP) die optischen Eigenschaften des Poly lactid nicht verändert.

5.3.3 Wärmeformbeständigkeit (HDT-B)

Die Wärmeformbeständigkeit wurde nach der Norm DIN EN ISO 75 ermittelt.

Die Prüfung fand unter folgenden Bedingungen statt:

Rampe 120.00 °C/h, Starttemperatur 26°C, Vorheizzeit : 300 s, Belastung 0.450 MPa

Probe	°C	Messstation 1 [°C]	Messstation 2 [°C]	Messstation 3 [°C]
CK-00	51,7	51,40	51,60	52,10
CK-01	51,5	51,35	51,40	51,80
CK-02	51,9	51,55	52,00	52,00
CK-03	51,4	51,03	51,30	51,80
CK-04	51,2	51,00	51,10	51,50
CK-08	45,6	45,50	45,50	45,90
CK-11	46,9	46,70	46,80	47,10
CK-12	47,0	46,70	47,00	47,30
CK-V3-	37,0	37,00	37,10	36,90

Tabelle 6: Durchschnittliche Wärmeformbeständigkeit Ergebnisse der Messstationen; © ITKE nach Vorlage der Prüfberichte vom Fraunhofer ICT und IKT/ Uni Stuttgart

Die grau markierten Ergebnisse (CK-01 bis CK-04) der Tabelle 5 zeigen, dass die Zugabe des optischen Aufhellers (z.B. von Sukano) und die Zugabe des Nukleierungsmittels

tels in unterschiedlichen Dosierungen die Wärmeformbeständigkeit nicht, bzw. nur unwesentlich beeinflussen. CK-00 stellt die Nullprobe dar (100% ingeo 3251D).

Die hellblau markierten Zeilen zeigen die Wärmeformbeständigkeiten (HDT-B) nach zusätzlicher Zugabe des Flammschermers Triphenylphosphat (TPP) in unterschiedlichen Dosierungen. Das TPP weist eine zusätzlich weich machende Wirkung auf und wird auch als Weichmacher eingesetzt. Dadurch wird auch der Erweichungspunkt herabgesetzt.

Es konnte zwar das Brandverhalten deutlich verbessert werden, jedoch geschieht dies zu Lasten der Wärmeformbeständigkeit, die sich durch das TPP noch verschlechtert hat.

Die Zeilen CK-01 bis CK-04 (grau) der **Tabelle 5** zeigen Ergebnisse von Prüfkörpern, die bereits Nukleierungsmittel in unterschiedlichen Dosierungen enthalten. Zur Erzielung einer höheren Wärmeformbeständigkeit muss das Polylactid kristallisieren. Nukleierungsmittel helfen dabei. Allerdings läuft die Kristallisation erst bei höheren Temperaturen.

Die Prüfstäbe werden bei einer Werkzeugtemperatur von ca. 25°C im Sekundentakt spritzgegossen. Hierbei kann das Polylactid auch mit Nukleierungsmitteln nicht kristallisieren.

Daher werden in einer weiteren Versuchsreihe vorhandene Spritzguss-Compounds, die aus unterschiedlichen Dosierungen von Polylactid, Nukleierungsmitteln und dem Flammscherm TPP zusammengesetzt sind, nochmals zu Prüfstäben spritzgegossen.

Diesmal wird die Werkzeugtemperatur von 25 auf 100°C erhöht, die Kühlzeit ebenfalls auf (120-240 Sekunden).

5.3.4 Wärmeformbeständigkeit (HDT-B) nach erhöhter Werkzeugtemperatur und längeren Kühlzeiten

Wie die Tabelle 7 zeigt, verbessert sich die Wärmeformbeständigkeit bei einer Werkzeugtemperatur von 100°C und einer längeren Kühlzeit.

Dies wird beispielsweise bei der Versuchsreihe CK-09 (hellblaue Markierungen) erreicht. Bei einer Werkzeugtemperatur von 25°C und einer konventionellen Herstellung des Prüfstabes im Sekundentakt wird eine HDT-B von durchschnittlich 44,4°C erzielt.

Wird die Werkzeugtemperatur auf 100°C und die Kühlzeit auf 180 Sekunden erhöht, so resultiert eine durchschnittliche HDT-B von ca. 90°C. Die Werte schwanken stark, da die Kristallisation des PLA nicht abgeschlossen ist. Eine Nachbehandlung durch Wärme (Tempern) würde diese Schwankungen minimieren.

Die Kühlzeit beginnt mit der volumetrischen Formfüllung und endet mit dem Öffnen des Werkzeugs. Sie dient dazu, das Formteil in der Kavität bis zu einer ausreichenden Stabilität abzukühlen.²⁰

Eine Kühlzeit bei CK-09 (hellblaue Markierung, Tabelle 7) von 120 Sekunden ist zu gering, um eine ausreichende Kristallisation des PLA zu ermöglichen.

Die durchschnittliche HDT-B beträgt 52°C.

Ähnliches ist auch bei CK-10 zu verzeichnen. Hier ist der Anteil des Flammhemmers TPP etwas geringer, als bei CK-09. Bei einer Werkzeugtemperatur von 25°C und einer produktionsüblichen Kühlzeit, wird eine Wärmeformbeständigkeitstemperatur von 46,7°C erreicht. Wird das gleiche Granulat/ Compound mit einer Werkzeugtemperatur von 100°C und einer Kühlzeit von 180 Sekunden zu Prüfstäben spritzgegossen, so verbessert sich die HDT-B auf durchschnittliche 88,5°C.

Probe	Messstation 1	Messstation 2	Messstation 3	Mittelwert
CK-00	51,40	51,60	52,10	51,7
CK-01	51,35	51,40	51,80	51,5
CK-02	51,55	52,00	52,00	51,9
CK-03	51,03	51,30	51,80	51,4
CK-04	51,00	51,10	51,50	51,2
CK-09_25°C	44,00	44,50	44,70	44,4
CK-09_100°C_180s	102,50	77,10	120,40	100,0
CK-09_100°C_180s_2	62,10	101,10	82,20	81,8
CK-09_100°C_120s	50,90	53,50	51,80	52,1
CK-10	46,48	46,70	47,00	46,7
CK-10_100°C_180s	82,10	101,10	82,20	88,5
CK-08	45,50	45,50	45,90	45,6
CK-18_240s	80,50	84,10	75,20	79,90
CK-19_180s	57,40	55,10	51,30	54,60
CK-19_240s	81,40	79,70	65,80	75,60
CK-20_180s	63,40	Messung n.i.C	60,40	61,90
CK-21_180s	63,60	66,10	Messung n.i.C	64,90
CK-21_240s	71,70	61,20	63,10	65,30
CK-22_180s	73,20	61,10	61,20	65,20
CK-22_240s	73,70	71,70	66,90	70,80
CK-23_240s	88,00	84,00	66,40	79,50

Tabelle 7: HDT-B und Varianz der Herstellungsbedingungen gleicher Compounds, © ITKE nach Vorlage der Prüfberichte vom Fraunhofer ICT



Abb. 150: (Modifiziertes) Polylactid: Darstellung unterschiedlicher Transparenzgrade

Mit der Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit durch einen höheren Kristallisationsgrad, sinkt das Maß der Lichtdurchlässigkeit. Herausforderung war es, einen ausreichend wärmeformbeständigen Werkstoff zu erzielen, der jedoch möglichst tranluzent bis transparent ist. Die in der Abb. 150 markierten Platten verfügen über die gleiche Rezeptur. Sie wurden jedoch konventionell erzeugt (CK-08) und bei einer erhöhten Werkzeugtemperatur (CK-19 180s und CK-19 240s) sowie einer Kühlzeit von 180 und 240 Sekunden (ganz rechts).



Abb. 151: Modifiziertes Polylactid: Darstellung unterschiedlicher Transparenzgrade

Die zur Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit notwendige längere Kühlzeit von mindestens 180 Sekunden senkt die erreichbare Stückzahl pro Tag drastisch. Die Maschinenstunde verteuert sich und somit der Teilepreis. Siehe auch **4.4.3 Preisveränderungen mit längeren Taktzeiten.**

Erhöht man die Werkzeugtemperatur um 10 °C, verlängert sich die Kühlzeit um bis zu 30%. Generell bewirkt eine zu lange Kühlzeit eine unnötig lange Zykluszeit und somit erhöhte Kosten. Eine zu kurze Kühlzeit zeigt sich hingegen im Verzug des Bauteils, Verformungen beim Entformen, Auswerfermarkierungen auf der Bauteiloberfläche oder erhöhter Nachschwindung. Hinsichtlich dieser genannten Aspekte wirkt eine längere Kühlzeit vorteilhaft.

5.3.5 Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit durch anschließendes Tempern?

Da die erhöhte Werkzeugtemperatur und die notwendige Zeit zur Kristallisierung unökonomische Auswirkungen auf die Kühlzeit haben und die Wärmeformbeständigkeitswerte stark schwanken, kam man auf die Idee des Temperns.

Prüfstäbe, die bei normaler Kühlzeit und einer Werkzeugtemperatur von 25°C hergestellt wurden, wurden anschließend mit Wärme von 60-80°C einige Minuten bis Stunden nachbehandelt.

Auch auf diesem Wege konnte die Wärmeformbeständigkeit um ca. 40-55°C verbessert werden.

Nachteilig erscheint jedoch, dass sich die Spritzgussteile verziehen und ihre Form nicht beibehalten.

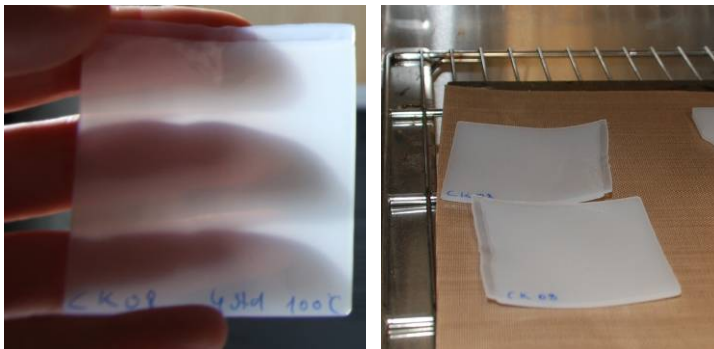


Abb. 152: Verzug der Formteile während des Temperns (ohne Lagerung in einem Werkzeug)

5.3.6 Neutralisierung der Gelbstichigkeit

Mithilfe eines optischen Aufhellers wurde der Gelbstich des Polylactid neutralisiert. Mittels Zugabe unterschiedlicher Mengen des Farbstoffes als Masterbatch in einer Versuchsreihe, wurde 'farbloses' Compound generiert.



Abb. 153: Ergebnisse nach Zugabe unterschiedlicher Mengen eines optischen Aufhellers (blaues Granulat)

5.3.7 UV-Beständigkeit

Das mit Triphenylphosphat und Nukleierungsmitteln modifizierte Polylactid wurde hinsichtlich seiner UV-Beständigkeit in Innenräumen, an der Materialprüfanstalt (MPA) der Universität Stuttgart nach der DIN EN ISO 4892-3, Verfahren B, Zyklus 5, über eine Dauer von 1024 Stunden getestet.

Die Transmission ultravioletter Strahlung von Fensterglas hängt von mehreren Faktoren, wie der Zusammensetzung, der Reinheit und Dicke des Glases ab. Allgemein kann jedoch gesagt werden, dass Fensterglas für die langwellige UV-A (400-320 nm) fast komplett durchlässig ist. Der Großteil der kurzwelligeren UV-B (320-280 nm) wird jedoch absorbiert.

Als Bewitterungsgerät wurde ein Global-UV-Testgerät der Firma Weiß verwendet.

Die Prüfbedingungen waren wie folgt:

Beanspruchungsperiode	Lampentyp	Bestrahlungsstärke	Schwarzstandtemperatur	Relative Luftfeuchte
24h trocken	Typ 1B UV-A-351	0,76 W/(m ² nm) bei 340 nm	50±3 °C	Nicht geregelt

Nach Aussagen der MPA Stuttgart wäre die Wiederholung der Bewitterung hinter Fensterglas bei einer kürzeren Versuchsdauer sinnvoll. Üblicherweise wird eine Prüfdauer von ca. 340 Stunden, statt der gewählten 1024 Stunden gewählt.

In der **DIN EN ISO 4892-1 - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten - Teil 1: Allgemeine Anleitung** - wird die Übertragung der Ergebnisse von künstlicher Bewitterung auf das tatsächliche Verhalten unter eine Reihe von Vorbehalten gestellt (vgl. Punkt 4.1 dieser Norm).

„Bei der Beanspruchung in Prüfgeräten mit Laborlichtquellen ist es von großer Bedeutung zu berücksichtigen, wie gut die Bedingungen der zeitraffenden Prüfung die Umgebungsbedingungen simulieren, denen der zu prüfende Kunststoff beim praktischen Gebrauch ausgesetzt ist. Außerdem ist es notwendig, die Wirkungen der bei der zeitraffenden Prüfung, wie auch bei der praktischen Beanspruchung auftretenden Schwankungen, sowohl bei der Versuchsplanung als auch bei der Auswertung der Ergebnisse der zeitraffenden Beanspruchung zu berücksichtigen. Keine künstliche Beanspruchungsprüfung kann als vollständige Simulation der Praxisbedingungen bezeichnet werden. Die bei den zeitraffenden Beanspruchungsbedingungen erhaltenen Ergebnisse, können nur dann als repräsentativ für die Beanspruchung beim praktischen Gebrauch angesehen werden, wenn der Grad der Rangkorrelation für die jeweiligen geprüften Materialien ermittelt wurde und wenn Art und Verlauf der Alterung gleich sind. Die relative Beständigkeit von Materialien kann unter Praxisbedingungen an verschiedenen Orten aufgrund der Abweichungen von UV-Strahlung, Benässungsdauer, relativer Luftfeuchte, Temperatur, Luftschadstoffen und anderen Faktoren sehr unterschiedlich sein. Deshalb kann sogar dann, wenn die Ergebnisse einer speziellen nach DIN EN ISO 4892 durchgeführten Beanspruchungsprüfung für geeignet befunden werden, nicht davon ausgegangen werden, dass sie auch für die Bestimmung der relativen Beständigkeit der gleichen Materialien in einer anderen Umgebung geeignet sind.“

Obwohl es sehr verlockend ist, einen Zeitraffungsfaktor durch Vergleich von „x“ Stunden oder MJ/m² Bestrahlung bei einer künstlichen Beanspruchungsprüfung mit „y“ Monaten oder Jahren Freibewitterung zu berechnen, ist dies nicht zu empfehlen. Derartige Zeitraffungsfaktoren besitzen aus verschiedenen Gründen keine Gültigkeit.

- a) Zeitraffungsfaktoren sind materialabhängig und können für jedes Material und für verschiedene Rezepturen des gleichen Materials unterschiedlich sein.
- b) Die Schwankungsbreite der Alterungsgeschwindigkeit unter den Bedingungen des praktischen Einsatzes und bei den zeitraffenden Beanspruchungsbedingungen, können einen großen Einfluss auf den berechneten Zeitraffungsfaktor haben.
- c) Zeitraffungsfaktoren, die auf der Grundlage des Verhältnisses der Bestrahlung bei einer Laborlichtquelle und dem Tageslicht (im gleichen Spektralbereich) berechnet

werden, berücksichtigen nicht den Einfluss der Temperatur, der Benässung und Unterschiede der Spektralverteilung zwischen Laborlichtquelle und dem Tageslicht.²¹

Aus soeben genannten Gründen ist die Schätzung der simulierten Alterung nicht üblich. Um dennoch eine grobe Aussage zu wagen, entspricht nach Rücksprache mit Fachleuten und Berechnungen (Strahlungsstärke, etc.) unter Berücksichtigung der in Stuttgart vorhandenen Bedingungen, die künstliche Alterung durch UV-A-Strahlen ungefähr einer Alterung von 10-13 Jahren, wenn das Material mit ca. 2-4 m Abstand vom Fenster positioniert wird sowie eine Alterung von ca. 5-6,5 Jahren, wenn das modifizierte Polylactid/ Akustikmodul unmittelbar am Fenster aufgestellt wird.

Es sei zudem zu beachten, dass der gewählte Flammhemmer die verminderte UV-Beständigkeit verursacht.

In Abb. 155 sind rechts mit der Bezeichnung CK03 und CK00 Prüfstäbe abgelichtet, die nur aus Polylactid und aus Polylactid mit Nukleierungsmittel und optischem Aufheller hergestellt wurden. Beide Prüfstäbe waren nach der Alterung aus optischer Sicht nahezu unverändert. Lediglich der Glanz lässt etwas nach. Die Proben, die Triphenylphosphat enthalten, sind nach einer Alterungssimulation von 1024 Stunden gelblich und zerfallen bei leichtem Druck in kleine Stücke.

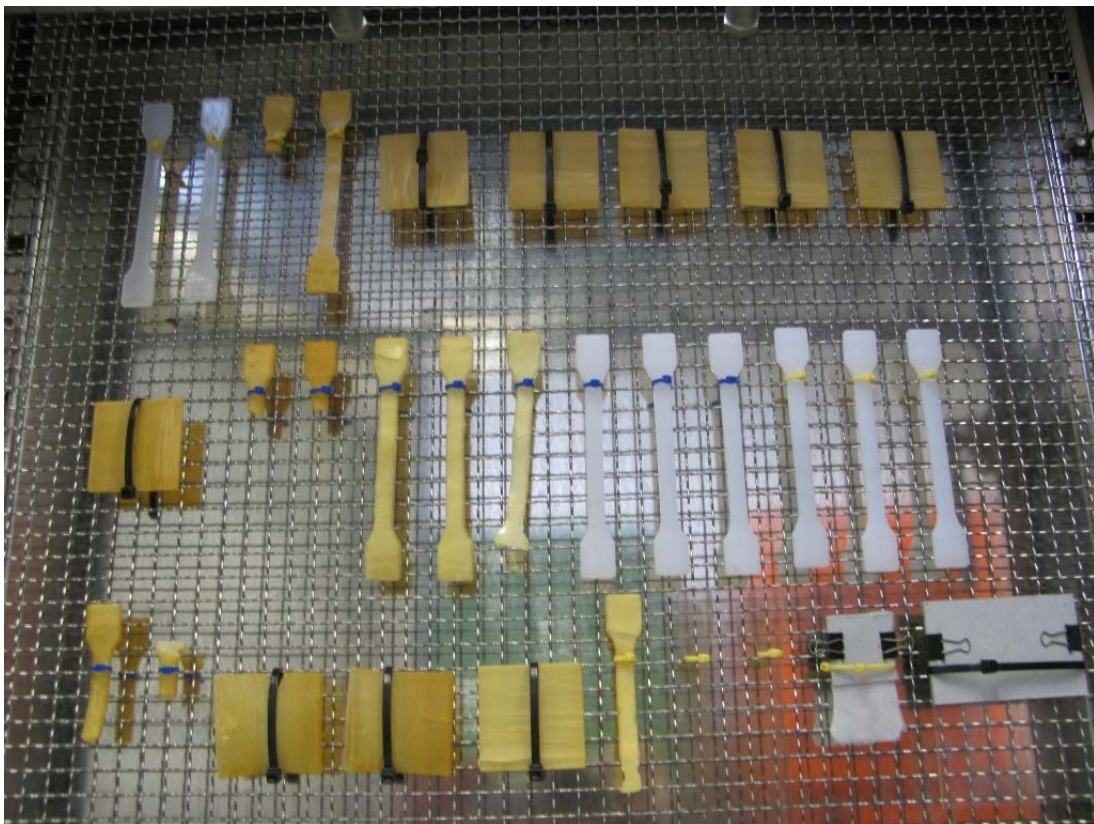


Abb. 154: Proben nach Überprüfung der UV-Beständigkeit hinter Fensterglas (DIN EN ISO 4892-3)

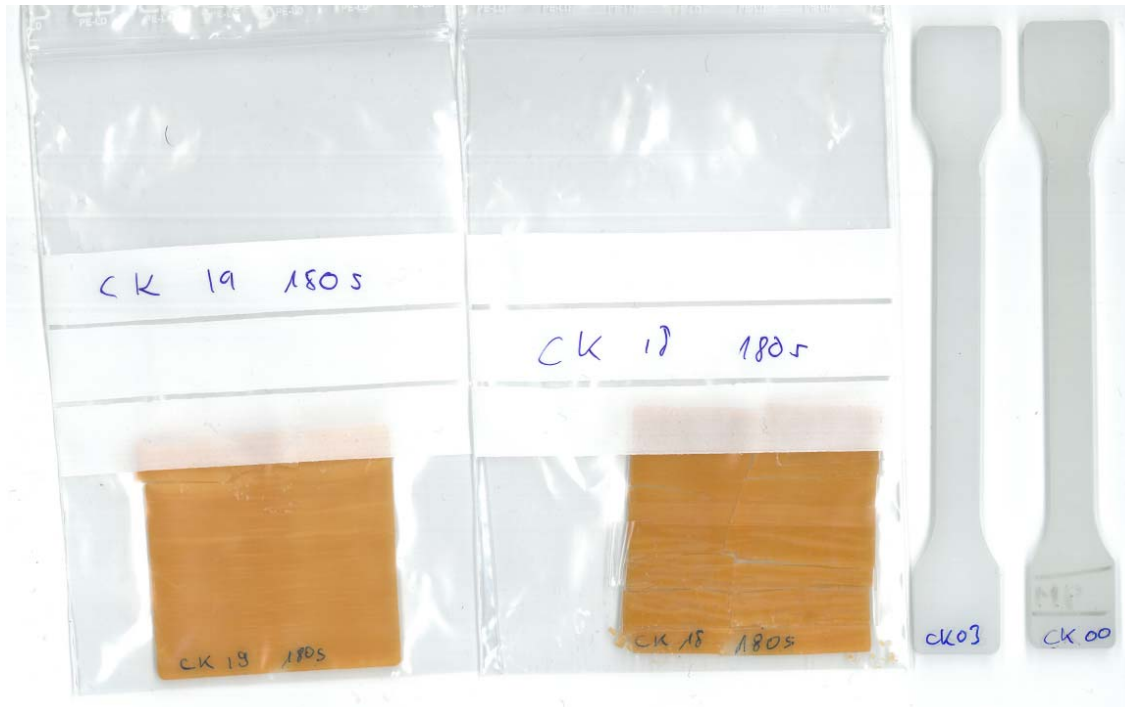


Abb. 155: Proben nach Überprüfung der UV-Beständigkeit hinter Fensterglas (DIN EN ISO 4892-3)

5.4 Anteil nachwachsender Rohstoffe im modifizierten PLA-Compound

Der Anteil nachwachsender Rohstoffe im Polylactid-Compound beträgt ca. 92,5%. Dies ist ein rechnerischer Wert, der sich aus den Bioanteilen der Einzelkomponenten zusammensetzt. Der rechnerische Anteil nachwachsender Rohstoffe des Nukleierungsmittels und des optischen Aufhellers der Firma Sukano beträgt je 85%. Das Flammenschutzmittel ist nicht biobasiert.

5.5 Biosiegel: Kennzeichnung der Biobasiertheit

Aufgrund der Materialität des gewählten Werkstoffes wird die Biobasiertheit des Produktes optisch nicht wahrnehmbar. Auf Unternehmerseite bestand daher der Wunsch, die Nachhaltigkeit der Akustikmodule mit Hilfe eines Siegels oder Ähnlichem zu kennzeichnen. Hierbei ergeben sich folgende Möglichkeiten:

5.5.1 Zertifizierung Biobasierter Produkte durch den TÜV Rheinland DIN CERTO

Das Siegel zeigt den Anteil biobasierter Kohlenstoffe an. Folgende Prüfungen werden von DIN CERTCO gefordert

- Bestimmung des gesamtorganischen Kohlenstoffs.

- Bestimmung des Anteils an ^{14}C

Die ^{14}C -Methode ist ein bekanntes Verfahren zur Altersbestimmung von kohlenstoffhaltigen Materialien.

Alle tierischen und pflanzlichen Stoffe enthalten organische Verbindungen. Die Unterscheidung zwischen fossilem und biobasiertem Material erfolgt über das Verhältnis der Kohlenstoffisotope ^{14}C und ^{12}C . Das sind Kohlenstoffatome mit unterschiedlichen Massenzahlen. Lebende Biomasse nimmt ^{14}C (Radiokohlenstoff) beim Verstoffwechseln aus der Erdatmosphäre auf. Diese Aufnahme stoppt, wenn der Stoffwechsel eingestellt wird, also die Biomasse abstirbt. Der in der Biomasse enthaltene Radiokohlenstoff beginnt von diesem Zeitpunkt an zu zerfallen. Der Gehalt an ^{14}C nimmt dadurch stetig ab.

Abhängig vom Alter des Materials besteht folglich ein bestimmtes Verhältnis der Isotope ^{14}C und ^{12}C . In fossilen Produkten, wie z. B. Erdölen, wird ein sehr hoher Anteil an ^{12}C -Isotopen gemessen. Durch das hohe Alter ist bereits ein Großteil des Radiokohlenstoffs zerfallen. Biomasse aus schnell nachwachsenden Rohstoffen hingegen, weist einen höheren Anteil an ^{14}C -Isotopen auf. Da das Verhältnis der Kohlenstoffisotope noch nach dem Produktionsprozess bestimmt werden kann, ist eine eindeutige, nachvollziehbare und unabhängig prüfbare Unterscheidung zwischen fossiler und biogener Biomasse möglich.²²




Biogener Kohlenstoff-Anteil	Zertifizierungszeichen
20 bis 50 %	
50 bis 85 %	
> 85 %	

Abb. 156: Zertifizierung der Biobasiertheit durch den TÜV Rheinland DIN CERTO

5.5.2 Umweltkonformitätszeichen VINCOTTE „ok biobased“

VINCOTTE in Belgien vergibt zur Zertifizierung von kompostierbaren Werkstoffen sowie Produkten aus biologisch abbaubaren Werkstoffen nach EN 13432 sowie EN 14995 das „OK compost“-Zeichen.

Zur Zertifizierung des biobasierten Kohlenstoffanteils vergibt VINCOTTE das „OK bio-based“-Zeichen nach ASTM D6866, wobei der biobasierte Kohlenstoffanteil mittels einer Sternekategorie (1 bis max. 4 Sterne) dargestellt wird.





1 Stern	2 Sterne	3 Sterne	4 Sterne
			
Between 20 and 40 % Biobased	Between 40 and 60 % Biobased	Between 60 and 80 % Biobased	More than 80 % Biobased

Abb. 157 Zertifizierung OK bio-based durch VINCOTTE/ Belgien

Einige biobasierte Produkte aus aller Welt werden bereits mit dem Siegel gekennzeichnet.²³



6 Fazit

- **geringe Lichtdurchlässigkeit des Werkstoffes**

Die Transluzenz betreffend wurden die Vorstellungen der Nimbus Group vom entwickelten Werkstoff nicht erfüllt. Dennoch sei zu erwähnen, dass es gelang, die Wärmeformbeständigkeit des modifizierten Polylactid um 25 bis 50°C (je nach Rezeptur und Kühlzeit) zu erhöhen und gleichzeitig noch ein hohes Maß an Lichtdurchlässigkeit zu ermöglichen. Der bei Biokunststoffen häufig vorzufindende Gelbstich wurde mittels Farbstoffen zu einem „farblosen“ Werkstoff neutralisiert.



Abb. 158: Durchschnittliche Wärmeformbeständigkeit (HDT-B) der markierten Platten (Stärke 2 mm): 45,6°C (grün) und 79,9°C (orange)

- **zu hohe Fertigungskosten**

Bei einer Taktzeit von drei Minuten betragen die Herstellungskosten einer 25er Halbschale 3,45 € statt wie bei der Taktzeit von 20 Sekunden 1,57 €. Im Flächenverbund bedeutet das, Herstellungskosten von 110,40 € je Quadratmeter. Damit liegt man schon ohne Einbeziehen der Verbindungen 25,40 € oder knapp 30% über den Richtkosten. Bei einer Taktzeit von vier Minuten betragen die Herstellungskosten je Halbschale 3,80 € und je gebautem Quadratmeter 121,60 € - 43% über den Zielkosten. Bei fünf Minuten liegt die Halbschale bei 4,50 € und der Quadratmeter bei 144,00 €. Damit liegen die Herstellungskosten schon 70% über den Richtkosten.

Mit einer Überschreitung der Zielkosten um mindesten 30% exklusive der nötigen Verbindungen, sind die längeren Taktzeiten in der Produktion nicht realisierbar.

Zur Verbesserung der Wärmeformbeständigkeit wird die erhöhte Kühlzeit von 3-4 Minuten zur Kristallisation und Abkühlung des modifizierten Polylactid notwendig. Die Werkzeugtemperatur wurde zur Initiierung der Kristallisation von 25°C auf 100°C erhöht.

Siehe auch die **Kapitel 4.4.3.** und **5.3.4.**

- **UV-Beständigkeit des modifizierten Polylactid ist nicht zufriedenstellend**

Das mit Triphenylphosphat (TPP) und Nukleierungsmitteln modifizierte Polylactid (PLA) wurde hinsichtlich seiner UV-Beständigkeit in Innenräumen nach der DIN EN ISO 4892-3, Verfahren B, Zyklus 5, über eine Dauer von 1024 Stunden getestet. Hierbei wurde die UV-Beständigkeit hinter Fensterglas mit Hilfe von UV-A-Strahlen simuliert. Nach Aussagen der MPA Stuttgart wurde eine zu lange Prüfdauer gewählt. Üblich ist eine Bestrahlung von 304 Stunden. Nach 1024 Stunden direkter UV-A-Strahlung sind die Prüfplatten aus mit TPP modifizierter PLA gelb und zerbröseln bei leichtem Druck. Die Prüfplatten ohne TPP (die PLA Platten enthalten nur Nukleierungsmittel und optische Aufheller) verlieren nach gleicher Bestrahlungsdauer lediglich an Glanz, die Farbe verändert sich nicht.

Zusätzliche Additive zur Verbesserung der UV-Beständigkeit müssten zugegeben werden.

- **akzeptabler Preis des modifizierten Polylactid**

Inklusive der Additive (Nukleierungsmittel, Flammhemmer, optischer Aufheller) ergeben sich beim modifizierten Polylactid-Compound folgende Endpreise (Grobkalkulation; je nach Abnahmemenge; Preis ab Werk)

- 1.000 kg: 3,90 EUR/kg
- 2.000 kg: 3,70 EUR/kg
- 5.000 kg: 3,55 EUR/kg
- 10.000 kg: 3,50 EUR/kg
- ab 20.000 kg: 3,45 EUR/kg

- **die Wärmeformbeständigkeit des modifizierten PLA konnte erhöht werden**

Die Wärmeformbeständigkeit des modifizierten Polylactid konnte mit Hilfe längerer Kühlzeiten und erhöhter Werkzeugtemperatur oder durch das Tempern um durchschnittlich 25 bis 50°C erhöht werden – je nach Rezeptur, Werkzeugtemperatur und Kühlzeit.

- **Positives Brandverhalten erreicht**

Das Brandverhalten konnte verbessert werden. Nicht modifiziertes Polylactid schmilzt im Brandfall sofort. Brennende Tropfen entzündeten die im Abstand von 30 cm platzierte Watte. Bei der Feststellung der Brennbarkeitsklasse nach der UL94-VB erreicht Polylactid die Klasse V2. Nach Zugabe des Flammenschutzmittels Triphenylphosphat wurde unter gleichen Prüfbedingungen nach der UL 94-VB, V0 erreicht. Nach Wegnahme der Flamme bei der ersten und zweiten Beflammung erlischt die Flamme am Prüfstab nach je 1-2 Sekunden. Nach der zweiten Beflammung entstehen nicht brennende Tropfen, die die platzierte Watte nicht entzündeten.

Die zusätzlich weichmachende Wirkung des Brandschutzmittels Triphenylphosphat senkt die Viskosität der bereits dünnflüssigen Polylactidtype Ingeo 3251 D zu Naturworks zusätzlich.

Literaturverzeichnis

- ¹ Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V.
- ² Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie Wien; Nachwachsende Rohstoffe für die chemische Industrie ; Berichte aus Energie- und Umweltforschung, S. Wagner, N. Graf, H. Böchzelt, H. Schnitzer (Januar 2007)
- ³ <http://www.baulinks.de/webplugin/2008/1206.php>
- ⁴ <http://nimbus-group.com/rosso/products/rossoacoustic-cp30>
- ⁵ EMW Filtertechnik: http://www.emw.de/produktseiten/s_retikulieren.htm
- ⁶ <http://www.filterschaum.de/reticulation.htm>
- ⁷ Kontakt mit Ivica Duzic , Anwendungstechnik Colbond; März 2010
- ⁸ <http://www.hombach-kunststofftechnik.de/>
- ⁹ Design Composite/ A, <http://www.design-composite.at/clear-PEP-R.21.0.html>, Zugriff 01.11.2011
- ¹⁰ Text: Michael Jahnz, nimbus group/ Stuttgart
- ¹¹ Text: Michael Jahnz, nimbus group/ Stuttgart
- ¹² Foldcore GmbH: <http://www.foldcore.de/>
- ¹³ Foldcore GmbH: <http://www.foldcore.de/>
- ¹⁴ Nimbus Group, Stuttgart
- ¹⁵ Nimbus Group, Stuttgart
- ¹⁶ Text Katharina Schmidt, nimbus group, 2011
- ¹⁷ Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates, L 88/5
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:088:0005:0043:DE:PDF>
- ¹⁸ Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates, L 88/5
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:088:0005:0043:DE:PDF>
- ¹⁹ Clarifoil® /Celanese;
<http://www.clarifoil.de/content.asp?ContentId=8&Page=Manufacturing&lan=german>

²⁰ Marco Jungmeier <http://kunststoff-know-how.de/index.php?/K%C3%BChlzeit.html>

²¹ Dr. Gerhard Volland, MPA Stuttgart; E-Mail 23.08.2011

²² TÜV Rheinland DIN Certo:

http://www.dincertco.de/de/din_geprueft_biobasiert_fuer_mehr_nachhaltigkeit.html

²³ <http://www.okcompost.be/data/pdf-document/okr-mate.pdf>

Bildverweis

Hinweise zur Herkunft der Bilder sind bereits teilweise bei den Abbildungen selbst und daher dem Abbildungsverzeichnis zu entnehmen.

Im Auftrag des ITKE wurden einige der abgebildeten Fotos hergestellt von:
Michael Damböck, digitale fotografie, 70188 Stuttgart, www.pixelcatcher.de

Weitere Bildhinweise

Bilder zur Bionik

Radiolarie: André Kramer:

http://www.mygall.net/images/product_images/popup_images/187129_0.jpg

Oberschenkelknochen: http://gina.ikmfbs.ing.tu-bs.de/eKatPortal/Upload/bionik/stuetzen_tragen/15

Spinnennetz: http://www.planet-wissen.de/natur_technik/forschungszweige/bionik/img/bionik_spinnennetz_inter_g.jpg

Ideen Schaum: Prada Shop New York: Rem Kohlhaas/ OMA
http://s3files.core77.com/gallery/images/materialvision_tradefair_28.jpg

Faltung

Blatt

http://thumbs.dreamstime.com/thumblarge_52/1144551674DJt8R1.jpg

Papierfaltungen:

<http://www.notizbuchblog.de/images/faltung.jpg>

Raumteiler: Vitra, Charles and Ray Eames
http://static1.bonluxat.com/cmsense/data/uploads/orig/Charles_and_Ray_Eames_Eames_Folding_Screen_3fy.jpg

Tiefziehen:

http://www.handte-fertigungsgesellschaft.de/Tiefziehen/Tiefziehen_1/tiefziehen_1.html

Voronoi:

<http://awalinnabila.blogspot.com/2008/10/voronoi-diagram.html>

http://matsysdesign.com/2009/06/19/c_wall/

Filterschaum

<http://www.filterschaum.de/>

Tabellenverweis

Quelle Tabelle Wärmeformbeständigkeit:

Quelle	
1	http://www.ktec.at/pdf/PETG_allgem_Materialinformation_ktec.pdf
2	http://www.arthur-krueger.de/html/img/pool/Axpet.pdf?sid=67f6239de236414752d4ce33a300df8
3	http://www.fapa-gmbh.de/technikcenter/PC.pdf
4	http://www.acrylglastechnik.at/Datenblatt/Db_PMMA.pdf
5	
6	http://www.huettig.de/cgi-bin/riweta.cgi?nr=1411&lng=1
7	http://www.kern.de/cgi-bin/riweta.cgi?nr=2690&lng=1
8	http://www.huettig.de/cgi-bin/riweta.cgi?nr=1601&lng=1
9	http://www.ensinger-online.com/modules/public/sheet/indexpdf.php?ID=00351
10	http://www.polymerservice-merseburg.de/index.php?id=270&lex%5Buid%5D=202&no_cache=1

Quelle: Tabelle 4

Literaturverzeichnis

1)	Projections of markets and environmental impacts related to the large-scale production of bio-based polymers in Europe	Martin Patel und Manuela Crank	Utrecht University, Department of Science, Technology and Society (STS) / Copernicus Institute, Utrecht, Netherlands	April 2004	Datei	
2)	Environmental assessment of bio-based polymers and natural fibres	Dr. Martin Patel*), Dr. Catia Bastioli**), Dr. Luigi Marini**), Dipl.-Geökol. Eduard Würdinger***)	*) Utrecht University, Department of Science, Technology and Society (STS); **) Novamont; ***) BIFA (Bavarian Institute of Applied Environmental Research and Technology)		Datei	
3)	Klimapotenzziale von Kunststoffen und Biokunststoffen	Andreas Windsperger, Maria Thurner / Roland Fehringer, Harald Pilz, Bernd Brandt	Institut für Industrielle Ökologie / Denkstatt GmbH	03.11. 2009	Datei	
4)	Eco-profiles of the European Plastics Industry, Polycarbonate		Plastics Europe	März 20	Datei	
5)	Eco-profiles of the European Plastics Industry, Polystyrene		Plastics Europe	Juni 20	Datei	
6)		natureworks llc			http://www.natureworkslc.com/the-ingeo-journey/Eco-Profile-and-LCA/E	
7)					http://www.wecobis.de/jahia/Jahia/Home/Grundstoffe/Kunststoffe_GS/P	
8)					http://corporate.evonik.com/de/presse/pressemitteilungen/pages/news-c	