

Reverse-Engineering in der Verpackungspolsterentwicklung
unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines
Doctor rerum politicarum

in der Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen
Fakultät
der Universität Dortmund

vorgelegt von
Dr.-Ing. Markus Donga
aus
Bottrop

Erster Gutachter: Prof. Dr. Egon Jehle
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rolf Jansen

Tag der Disputation: 11. Februar 2004

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Leiter der Entwicklung / Konstruktion bei der SiBO-Verpackungen Bernd Hesse GmbH & Co. KG in Olpe in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Logistik der Universität Dortmund.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Jansen, Leiter des Fachgebietes Logistik, für die großzügige Unterstützung und die vielfältigen Anregungen, die entscheidend zur erfolgreichen Durchführung dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. Egon Jehle, Leiter des Lehrstuhls Industriebetriebslehre der Universität Dortmund, danke ich für die Betreuung meiner Dissertation.

Bedanken möchte ich mich ebenso bei allen Mitarbeitern des Fachgebietes Logistik, hier insbesondere Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. A. Hirschberg und Frau Dipl.-Kff. V. Dzeik, für die stete Diskussions- und Hilfsbereitschaft.

Mein Dank gilt auch allen Industrieunternehmen, die mich bei der Durchführung dieser Arbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Bernd Hesse, SiBO-Verpackungen, Olpe.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Inhaltsverzeichnis | 1 |
| Abbildungsverzeichnis | 3 |
| Tabellenverzeichnis | 7 |
| 1. Einleitung | 11 |
| 2. Zielsetzung und Vorgehensweise | 19 |
| 3. Stand der Forschung bzw. Technik | 21 |
| 3.1. Stand der Technik für die Verwendung von Polstermitteln | 21 |
| 3.1.1. Die Funktion von Verpackungspolstern | 21 |
| 3.1.2. Packstoffbezogene Klassifizierung von Polstermitteln | 26 |
| 3.1.3. Entwicklung und Produktion von formgeschäumten Verpackungspolstern | 34 |
| 3.1.4. Transport-, umschlag- und lagerbelastungsbezogene Dimensionierung von Verpackungspolstern | 40 |
| 3.1.4.1. Dimensionierung einfacher Verpackungspolster | 41 |
| 3.1.4.2. Dimensionierung komplexer Verpackungspolster | 55 |
| 3.2. Flächenrückführung und Reverse-Engineering | 60 |
| 3.2.1. Sensorsysteme zur 3D-Digitalisierung | 61 |
| 3.2.1.1. Passive Aufnahmetechnik | 62 |
| 3.2.1.2. Aktive Aufnahmetechnik | 63 |
| 3.2.1.3. Zerstörende Aufnahmetechnik | 70 |
| 3.2.2. Verarbeitung von Punktwolken | 70 |
| 3.2.2.1. Datenformate im Reverse-Engineering-Prozess | 70 |
| 3.2.2.2. Klassische Vorgehensweise beim Reverse-Engineering | 78 |
| 3.2.2.3. Datenaustausch / Schnittstellen | 80 |
| 4. Entwicklung spezieller CAD-Funktionalitäten zur Automatisierung der Verpackungskonstruktion mittels 3D-CAD | 83 |
| 4.1. Umsetzung von Verpackungspolsterkonstruktionen in parametrische 3D-CAD- Modelle | 84 |
| 4.2. Variantenbibliothek von Komplett-Konstruktionen | 86 |
| 4.3. Variantenkonstruktion von geometrischen Polsterelementen | 96 |
| 5. Einsatz des Reverse-Engineerings bei der Entwicklung von Verpackungs-Formteilen | 101 |
| 5.1. Verpackungstechnische Rahmenbedingungen | 101 |
| 5.2. Auswahl eines geeigneten Sensorsystems | 105 |
| 5.2.1. Technische Anforderungen an das Sensorsystem | 107 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 5.2.2. | Anforderungen an das Produkt bzgl. Oberflächenbeschaffenheit und an die Umgebungsbedingungen | 117 |
| 5.3. | Von den Messwerten zur Punktwolke (pre-prozessing) | 118 |
| 5.3.1. | Merging | 118 |
| 5.3.2. | Datenreduktion | 125 |
| 5.4. | Von der Punktwolke zum 3D-CAD-Volumenmodell (surface fitting) | 127 |
| 5.4.1. | Arten von Problembereichen..... | 129 |
| 5.4.2. | Konstruktive Flächenrückführung | 134 |
| 5.4.2.1. | Der konstruktive Prozess der Flächenrückführung über feature-lines | 135 |
| 5.4.2.2. | Aufbereitung von Problembereichen | 137 |
| 5.4.3. | Halbautomatische Flächenrückführung | 140 |
| 5.4.3.1. | Aufbereitung von Problembereichen | 141 |
| 5.4.3.2. | Der halbautomatische Prozess der Flächenrückführung..... | 152 |
| 5.4.4. | Kombinierte Vorgehensweise | 155 |
| 5.5. | Manuelle oder softwaretechnische Aufbereitung von Problembereichen | 156 |
| 5.6. | Fazit zum Einsatz des Reverse-Engineering..... | 159 |
| 5.7. | Checkliste zum Aufbau einer Reverse-Engineering-Kette für die Entwicklung von Verpackungspolstern | 160 |
| 6. | Wirtschaftlichkeitsrechnung | 168 |
| 6.1. | Grundlagen | 168 |
| 6.1.1. | Statische Investitionsrechenverfahren | 169 |
| 6.1.2. | Dynamische Investitionsrechenverfahren | 174 |
| 6.2. | Kostenvergleichsrechnung | 179 |
| 6.2.1. | Herleitung der Kosten / Ermittlung anzusetzender Stundensätze | 180 |
| 6.2.1.1. | Verfahren „Traditionell“ | 182 |
| 6.2.1.2. | Verfahren „Computergestützt“ | 185 |
| 6.2.2. | Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeitsrechnung..... | 191 |
| 6.2.3. | Pilotprojekte im Kostenvergleich | 196 |
| 6.2.3.1. | Pilotprojekt: Flugzeug-Speiseofen | 198 |
| 6.2.3.2. | Pilotprojekt: HiFi-Verstärker | 209 |
| 6.2.3.3. | Pilotprojekt: Kfz-Radio/CD-Einheit | 218 |
| 6.2.3.4. | Pilotprojekt: Staubsauger..... | 226 |
| 6.2.4. | Erweiterungen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung..... | 237 |
| 6.3. | Fazit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung..... | 245 |
| 7. | Zusammenfassung..... | 247 |
| 8. | Literaturverzeichnis | 250 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------|--|----|
| Abb. 1: | Beispiele für komplexe Verpackungspolster | 11 |
| Abb. 2: | Prinzipdarstellung der parametrischen Konstruktionsweise /Don99/ | 13 |
| Abb. 3: | Parametrische Rippenkonstruktion /Don98a/, /Don99/ | 14 |
| Abb. 4: | Parametrische Polstervarianten | 15 |
| Abb. 5: | Digitaler Abformprozess im 3D-CAD /Don98a/, /Don99/ | 16 |
| Abb. 6: | Übersicht über die Funktionen einer Verpackung /Jan96/ | 22 |
| Abb. 7: | Schematische Darstellung der Verlängerung des Stoßimpulses durch Einsatz eines Verpackungspolsters /Hir01/ | 25 |
| Abb. 8: | Packstoffbezogene Einteilung von Polstermitteln /Hei96/ | 27 |
| Abb. 9: | Schematische Darstellung des Wirkverhaltens eines offenzelligen Schaumstoffes bei Belastung /Hir01/ | 28 |
| Abb. 10: | Schematische Darstellung des Wirkverhaltens eines geschlossenzelligen Schaumstoffes bei Belastung /Hir01/ | 29 |
| Abb. 11: | Größenverteilung von nicht- und geschäumten Styroporteilchen /NN90a/ | 35 |
| Abb. 12: | Geöffneter Formteilautomat /NN90a/ | 38 |
| Abb. 13: | Prototypherstellung durch Einsatz eines Heißdrahtes /NN90a/ | 40 |
| Abb. 14: | Prinzipskizze des physikalischen Modells zur Dimensionierung eines Verpackungspolsters /NN90a/ | 42 |
| Abb. 15: | Fallhammer zur Aufstellung verzögerungsstatischer Flächenbelastungs-Diagramme | 46 |
| Abb. 16: | h/d Polsterdiagramm für EPS 25 /Din85/ | 47 |
| Abb. 17: | C-e-Diagramm verschiedener Polstermaterialien /Pra80/ | 51 |
| Abb. 18: | Einfluss der Rohdichte von Schaumstoffen aus Styropor auf die C*-Werte /NN90b/ | 53 |
| Abb. 19: | Einfluss der Rohdichte von Schaumstoffen aus Styropor auf die e*-Werte /NN90b/ | 53 |
| Abb. 20: | Komplexe formgeschäumte Verpackungspolster | 55 |
| Abb. 21: | Schematische Darstellung einer Polsterrippe /NN92/ | 56 |
| Abb. 22: | Versuchseinrichtung zur Durchführung von Fallversuchen /Hir01/ | 60 |
| Abb. 23: | Verfahren der 3D-Digitalisierung (nach /Ber99/) | 62 |

| | | |
|----------|--|-----|
| Abb. 24: | Taktile Sensorsysteme zur 3D-Digitalisierung | 64 |
| Abb. 25: | Optische Sensorsysteme zur 3D-Digitalisierung | 67 |
| Abb. 26: | Prinzipdarstellung der Lasertriangulation (vgl. /Bra98/)..... | 69 |
| Abb. 27: | Darstellung einer komplexen Punktwolke am Beispiel eines Schwingschleifergehäuses | 71 |
| Abb. 28: | Schematische Darstellung einer NURBS-Fläche /Ker97/ | 73 |
| Abb. 29: | u- und v-Richtung einer Fläche /Ker97/ | 75 |
| Abb. 30: | Unterschied zwischen Flächen- und Volumenmodell | 76 |
| Abb. 31: | Geometrische Modelle und die zugehörige Verwaltung der Elemente /Spu97/ | 77 |
| Abb. 32: | Beispiel für ein Flächenmodell..... | 78 |
| Abb. 33: | Reihenfolge der Datenformate im Reverse-Engineering- Prozess | 79 |
| Abb. 34: | Einfachstes, aus verschiedenen Standardbauelementen zusammengesetztes Verpackungspolstermodell | 84 |
| Abb. 35: | Relevante Kenngrößen einer Standardrippe | 85 |
| Abb. 36: | Polster mit doppelter Halbrippe auf der Längsseite /Hir01/ | 88 |
| Abb. 37: | Universalpolster mit doppelter Umlaufrippe an Längsseite und dreifacher Umlaufrippe an Querseite /Hir01/ | 90 |
| Abb. 38: | Universalpolster mit doppelter Umlaufrippe an Längsseite und dreifacher Umlaufrippe an Querseite, Rahmen und Rundungen /Hir01/ | 91 |
| Abb. 39: | Ansicht des Fensters mit den 3D-CAD-Modellen von Verpackungspolstern /Hir01/ | 92 |
| Abb. 40: | Geöffnetes parametrisch aufgebautes Polstermodell /Hir01/ | 93 |
| Abb. 41: | Polstermodell mit Variantentabelle /Hir01/..... | 94 |
| Abb. 42: | Auswahl einer Variante des Polstermodells /Hir01/..... | 95 |
| Abb. 43: | Ansicht des Fensters mit den geometrischen Komponenten von Verpackungspolstern /Hir01/ | 96 |
| Abb. 44: | Grobes Positionieren der elementaren Komponenten /Hir01/ | 97 |
| Abb. 45: | Genaueres Positionieren der elementaren Komponenten /Hir01/..... | 98 |
| Abb. 46: | Modifizierung der geometrischen Komponenten /Hir01/..... | 99 |
| Abb. 47: | Systematische Gliederung von Sensorsystemen zur 3D- Digitalisierung nach /Ber99/..... | 107 |
| Abb. 48: | Prinzipdarstellung des Messvolumens eines optischen Sensorsystems..... | 109 |

| | | |
|----------|---|-----|
| Abb. 49: | Prinzipdarstellung der Messauflösung und Messgenauigkeit | 110 |
| Abb. 50: | Referenzobjekt: HiFi-Verstärker | 112 |
| Abb. 51: | 3D-CAD-Modell des Referenzobjektes unter Berücksichtigung verpackungstechnischer Rahmenbedingungen | 113 |
| Abb. 52: | Digitalisierung mit Sichtfeld 1100 mm x 1100 mm, Messauflösung: ca. 5,5 mm, Messgenauigkeit: ca. +/- 3 mm | 114 |
| Abb. 53: | Digitalisierung mit verschiedenen gröberen Messauflösungen und -genauigkeiten | 115 |
| Abb. 54: | Digitalisierung mit verschiedenen feineren Messauflösungen und -genauigkeiten | 116 |
| Abb. 55: | Kopplung von optischen Sensorsystemen mit positionsbestimmenden Maschinen..... | 119 |
| Abb. 56: | Software-merging | 122 |
| Abb. 57: | Referenzobjekte und Passmarken..... | 123 |
| Abb. 58: | Datenreduktion | 127 |
| Abb. 59: | Beispielmodell Monitor als reales Produkt und abstrahiertes 3D-CAD-Modell | 130 |
| Abb. 60: | Detektionslücken im digitalisierten Datensatz..... | 131 |
| Abb. 61: | Hinterschneidungen durch hervorstehende Bedienelemente | 132 |
| Abb. 62: | Überflüssige Details (Bohrlöcher etc.) | 133 |
| Abb. 63: | Überflüssige Kanten | 134 |
| Abb. 64: | Feature-lines auf Monitor..... | 136 |
| Abb. 65: | Von feature-lines über Flächendaten zum Volumenmodell | 136 |
| Abb. 66: | Konstruktive Behandlung von Lücken und überflüssigen Details | 138 |
| Abb. 67: | Bearbeitung mehrfach gekrümmter Löcher | 138 |
| Abb. 68: | Bearbeitung überflüssiger Kanten | 139 |
| Abb. 69: | Bearbeitung vorstehender Bedienelemente | 140 |
| Abb. 70: | Reparieren großer Löcher bzw. Beseitigung von Hinterschnitten..... | 143 |
| Abb. 71: | Löcher über mehrfach gekrümmten Bereichen..... | 145 |
| Abb. 72: | Loch eben geschlossen..... | 145 |
| Abb. 73: | Loch krümmungsstetig geschlossen..... | 146 |
| Abb. 74: | Loch geschlossen durch geschicktes Hinzufügen einzelner Dreiecke als Brücke..... | 147 |
| Abb. 75: | Überklebte Bohrungen und Lüftungsschlitze | 149 |

| | | |
|----------|---|-----|
| Abb. 76: | Schleifer: Problembereiche durch manuelle Vorbereitungen vermindert | 151 |
| Abb. 77: | Automatische Flächenpatcherzeugung | 153 |
| Abb. 78: | Ausgewählte Versuchsobjekte als reales Objekt und CAD-Datensatz | 157 |
| Abb. 79: | Krümmungsstetiges Entfernen von Details (Bsp. Staubsauger) | 158 |
| Abb. 80: | Bearbeiten großer Löcher (Bsp. Matrixdrucker) | 158 |
| Abb. 81: | Vielzahl von Bohrlöchern und Lüftungsschlitzen | 159 |
| Abb. 82: | Nicht-computergesteuerte Frässtation /Bor01/ | 182 |
| Abb. 83: | Mögliche Abläufe eines Entwicklungsprojektes | 197 |
| Abb. 84: | Flugzeug-Speiseofen..... | 198 |
| Abb. 85: | Darstellung der Nutzung des Distanzformteils..... | 199 |
| Abb. 86: | Pilotprojekt: HiFi-Verstärker..... | 209 |
| Abb. 87: | Pilotprojekt: Kfz-Radio/CD-Einheit..... | 218 |
| Abb. 88: | Pilotprojekt: Industriestaubsauger | 226 |
| Abb. 89: | Konstruktion der Heckpolsterung | 231 |
| Abb. 90: | Beispiele für Ladungsträger aus Schaumstoff..... | 240 |
| Abb. 91: | CD-Wechsler | 241 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----|
| Tab. 1: | Stoßempfindlichkeiten von Packgütern /Esc93/..... | 23 |
| Tab. 2: | Technologischer Vergleich geschäumter Formteile aus Polyethylen und Polypropylen /Hei96/ | 32 |
| Tab. 3: | Kenndaten verschiedener Polsterstoffe /NN90b/..... | 52 |
| Tab. 4: | Leistungsmerkmale optischer Systeme ohne Lasereinsatz nach /Bre99/ | 68 |
| Tab. 5: | Übersicht über entwickelte Grundpolstermodelle /Hir01/..... | 88 |
| Tab. 6: | Übersicht über weiter modifizierte Grundpolstermodelle /Hir01/ | 89 |
| Tab. 7: | Übersicht über vollkommen fertig konstruierte Polster /Hir01/ | 91 |
| Tab. 8: | Übersicht über elementare Komponenten der Verpackungspolster /Hir01/ | 99 |
| Tab. 9: | Checkliste „Sensorsystem“ | 161 |
| Tab. 10: | Checkliste „Bearbeitung / Manipulation der Digitalisierdaten“ | 163 |
| Tab. 11: | Checkliste „Erzeugung von Flächendaten“ | 165 |
| Tab. 12: | Berechnung der anzusetzenden Arbeitsstunden pro Jahr pro Mitarbeiter /Zwi02/ | 181 |
| Tab. 13: | Berechnung des Mitarbeiterstundensatzes (Verfahren „Traditionell“) /Zwi02/ | 183 |
| Tab. 14: | Berechnung des Maschinenstundensatzes für eine Frässtation (Verfahren „Traditionell“) | 184 |
| Tab. 15: | Arbeitsgänge und Stundensätze für das traditionelle Verfahren..... | 185 |
| Tab. 16: | Berechnung des Mitarbeiterstundensatzes (Verfahren „Computergestützt“) (nach /Zwi02/) | 186 |
| Tab. 17: | Berechnung der Stundensätze für die benötigten Hardwarekomponenten (Verfahren „Computergestützt“)..... | 187 |
| Tab. 18: | Berechnung der Stundensätze für die benötigten Softwarekomponenten (Verfahren „Computergestützt“) | 189 |
| Tab. 19: | Arbeitsgänge und Stundensätze für das computergestützte Verfahren..... | 191 |
| Tab. 20: | Gruppierung von Entwicklungsprojekten anhand des Schwierigkeitsgrades (= Szenarien) | 192 |
| Tab. 21: | K1 _T : Erstbemusterung, traditionell | 200 |

| | | |
|----------|---|-----|
| Tab. 22: | K1 _{C,Neukonstruktion} : Erstbemusterung, computergestützt, Neukonstruktion | 201 |
| Tab. 23: | K1 _{C,Anpassungskonstruktion} : Erstbemusterung, computergestützt, Anpassungskonstruktion | 202 |
| Tab. 24: | K2 _T : Handmuster anfertigen, traditionell | 203 |
| Tab. 25: | K2 _{C,Handmuster} : Handmuster CNC-Fräsen, computergestützt | 204 |
| Tab. 26: | K2 _{C,CAD} : 3D-CAD-Datensatz überspielen, computergestützt | 204 |
| Tab. 27: | K3 _T : Zweitbemusterung, traditionell | 205 |
| Tab. 28: | K3 _C : Zweitbemusterung, computergestützt | 206 |
| Tab. 29: | K4 _T : Dokumentationszeichnung anfertigen, traditionell | 207 |
| Tab. 30: | K4 _C : Dokumentationszeichnung anfertigen, computergestützt | 207 |
| Tab. 31: | Fazit für Pilotprojekt „Flugzeug-Speiseofen“ | 208 |
| Tab. 32: | K1 _T : Erstbemusterung, traditionell | 210 |
| Tab. 33: | K1 _{C,Neukonstruktion} : Erstbemusterung, computergestützt, Neukonstruktion | 211 |
| Tab. 34: | K1 _{C,Anpassungskonstruktion} : Erstbemusterung, computergestützt, Anpassungskonstruktion | 211 |
| Tab. 35: | K2 _T : Handmuster anfertigen, traditionell | 212 |
| Tab. 36: | K2 _{C,Handmuster} : Handmuster CNC-Fräsen, computergestützt | 213 |
| Tab. 37: | K2 _{C,CAD} : 3D-CAD-Datensatz überspielen, computergestützt | 213 |
| Tab. 38: | K3 _T : Zweitbemusterung, traditionell | 214 |
| Tab. 39: | K3 _C : Zweitbemusterung, computergestützt | 215 |
| Tab. 40: | K4 _T : Dokumentationszeichnung anfertigen, traditionell | 215 |
| Tab. 41: | K4 _C : Dokumentationszeichnung anfertigen, computergestützt | 216 |
| Tab. 42: | Fazit für Pilotprojekt „HiFi-Verstärker“ | 216 |
| Tab. 43: | K1 _T : Erstbemusterung, traditionell | 219 |
| Tab. 44: | K1 _{C,Neukonstruktion} : Erstbemusterung, computergestützt, Neukonstruktion | 220 |
| Tab. 45: | K1 _{C,Anpassungskonstruktion} : Erstbemusterung, computergestützt, Anpassungskonstruktion | 220 |
| Tab. 46: | K2 _T : Handmuster anfertigen, traditionell | 221 |
| Tab. 47: | K2 _{C,Handmuster} : Handmuster CNC-Fräsen, computergestützt | 222 |
| Tab. 48: | K2 _{C,CAD} : 3D-CAD-Datensatz überspielen, computergestützt | 222 |
| Tab. 49: | K3 _T : Zweitbemusterung, traditionell | 223 |

| | | |
|----------|---|-----|
| Tab. 50: | K3 _C : Zweitbemusterung, computergestützt..... | 223 |
| Tab. 51: | K4 _T : Dokumentationszeichnung anfertigen, traditionell | 224 |
| Tab. 52: | K4 _C : Dokumentationszeichnung anfertigen, computergestützt | 224 |
| Tab. 53: | Fazit für Pilotprojekt „Kfz-Radio/CD-Wechsler“..... | 225 |
| Tab. 54: | K1 _T : Erstbemusterung, traditionell | 227 |
| Tab. 55: | K1 _{C,Neukonstruktion} : Erstbemusterung, computergestützt, Neukonstruktion..... | 228 |
| Tab. 56: | K1 _{C,Anpassungskonstruktion} : Erstbemusterung, computergestützt, Anpassungskonstruktion | 229 |
| Tab. 57: | K2 _T : Handmuster anfertigen, traditionell | 231 |
| Tab. 58: | K2 _{C,Handmuster} : Handmuster CNC-Fräsen, computergestützt..... | 232 |
| Tab. 59: | K2 _{C,CAD} : 3D-CAD-Datensatz überspielen, computergestützt | 233 |
| Tab. 60: | K3 _T : Zweitbemusterung, traditionell..... | 233 |
| Tab. 61: | K3 _C : Zweitbemusterung, computergestützt..... | 235 |
| Tab. 62: | K4 _T : Dokumentationszeichnung anfertigen, traditionell | 236 |
| Tab. 63: | K4 _C : Dokumentationszeichnung anfertigen, computergestützt | 236 |
| Tab. 64: | Fazit für Pilotprojekt „Staubsauger“ | 237 |

1. Einleitung

Zum Schutz mechanisch empfindlicher Produkte (Videorecorder, Fernseher usw.) vor Stoß- und Schwingungbelastungen werden komplexe Verpackungspolster – meistens aus EPS oder EPP – eingesetzt (s. Abb. 1).

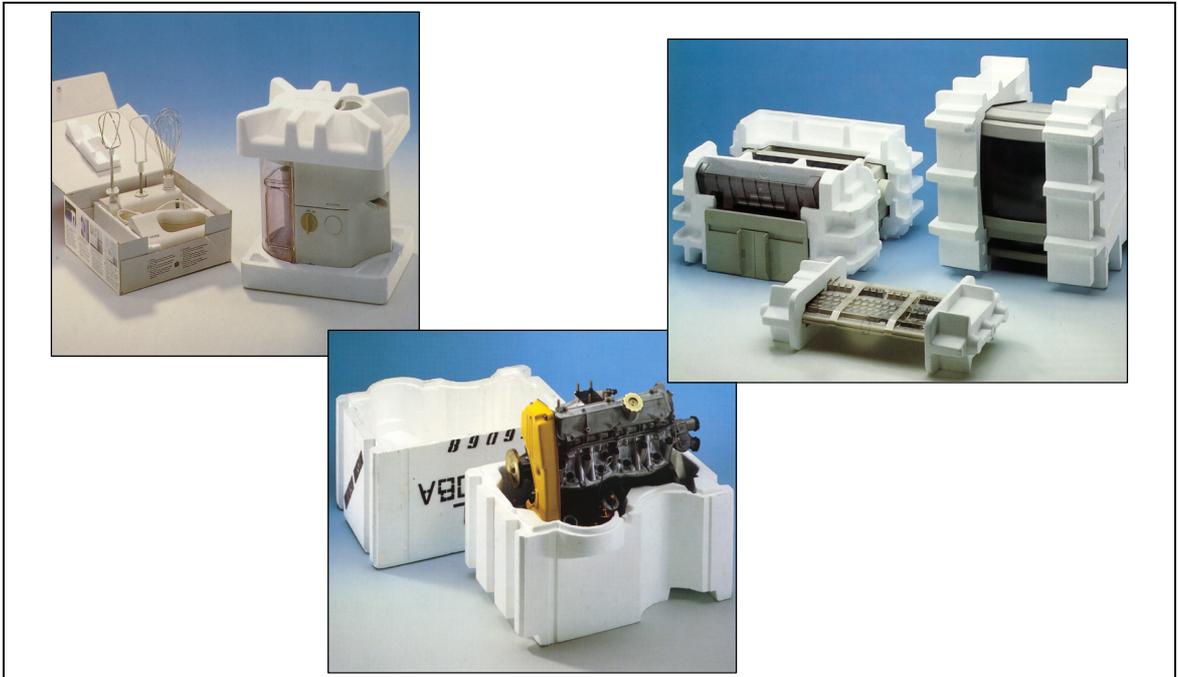


Abb. 1: Beispiele für komplexe Verpackungspolster

Die Entwicklung dieser komplexen Polster wird auch heute noch zum größten Teil in Handarbeit ausgeführt. Der Entwicklungsprozess von formgeschäumten Polstern gestaltet sich heutzutage so, dass der Produkthersteller dem Verpackungshersteller eine 2D-Zeichnung oder ein Muster eines zu verpackenden Produktes zur Verfügung stellt. Der Modellbauer entnimmt alle Maße der 2D-Zeichnung oder dem Produktprototypen und fertigt wiederum selber eine 2D-Zeichnung des Verpackungspolsters an. Anschließend wird mit Hilfe eines Messers und eines in eine Ständerbohrmaschine eingespannten Fräswerkzeuges ein Prototyp des Verpackungspolsters von Hand aus dem Vollen „herausmodelliert“. Dieser Prototyp wird zum Werkzeugbauer transportiert, welcher wiederum von Hand alle Maße davon abnimmt und einen modifizierten Polsterprototypen zur Herstellung einer Gussform zur Fertigung der Serienwerkzeuge modelliert. Der gesamte Vorgang von der Auftragserteilung durch

den Produkthersteller bis zur Anlieferung der Werkzeuge durch den Werkzeugmacher nimmt im günstigsten Fall 10 bis 12 Wochen in Anspruch. In Zeiten von Just-in-Time, kleineren Losgrößen, kürzerer Produktlebenszyklen und kürzeren Durchlaufzeiten sind diese Entwicklungszeiten unverträglich, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Nicht selten kommt es vor, dass durch den Werkzeugbauer Änderungen an einem konstruierten Verpackungspolster angeregt werden, weil fertigungstechnische Restriktionen dieses vorschreiben, oder dass der Produkthersteller Änderungen am Produkt vornimmt. Bisher muss in einem solchen Fall ein neuer Polsterprototyp entwickelt werden, mit dem ggf. wieder labortechnische Fallversuche durchgeführt werden müssen. Unter ökonomischen, logistischen sowie auch besonders unter ökologischen Gesichtspunkten ist ein solches Verfahren nicht zu vertreten. Unter diesen Gesichtspunkten ist deshalb eine Umstellung der Polsterentwicklung auf computerunterstützte Verfahren längst überfällig.

Ein weiterer Aspekt ist, dass Entwicklungsarbeiten zunehmend dokumentiert werden müssen. Da die Entwicklung eines Verpackungspolsters in allen Stufen in Handarbeit geschieht, müssen nachträglich Zeichnungen von handgefertigten Modellen angefertigt werden, und zwar von jeder entwickelnden Stelle einzeln, sei es von Seiten der Modellbauer oder der Werkzeugmacher.

Dem gegenüber hat jedoch innerhalb sehr weniger Jahre im Bereich der computerunterstützten Konstruktion (CAD) eine rasante Entwicklung stattgefunden, so dass bereits heute Hochleistungs-3D-CAD-Systeme (vorwiegend parametrische Volumenmodellierer) auf PC-Basis am Markt verfügbar sind, die auch vom Preis-/Leistungsverhältnis gerade für kleine und mittlere Unternehmen (kmU) interessant sind. Diese Systeme eignen sich hervorragend für den Einsatz bei der Konstruktion von Verpackungspolstern /Don97/, /Jan98/, /Don98a/.

Parametrische Volumenmodellierer, auch Solid Modelling Systems genannt (solid [engl.] ➤ fest, massiv, Körper), zeichnen sich dadurch aus, dass sie dreidimensionale physikalische Objekte der realen Welt auch rechnerintern als dreidimensionale, volumenhafte Gebilde repräsentieren. Der Anwender solcher

Systeme wird in die Lage versetzt, vollständige und eindeutige dreidimensionale Modelle von Festkörpern zu erzeugen, was bedeutet, dass es nicht möglich ist, Körper mit fehlenden Flächen oder Kanten zu definieren. Eine weitere charakteristische Eigenschaft von 3D-CAD-Volumenmodellen ist in der Konsistenz der Daten zu sehen. Im allgemeinen können nur physikalisch realistische Körper definiert und erzeugt werden, so dass Nonsense-Objekte oder sich selbst durchdringende Körper wie bei Draht- oder 3D-CAD-Flächenmodellen nicht entstehen können. Durch die komplexen Operationen wird sichergestellt, dass das Resultat immer wieder ein gültiger Körper ist.

Die meisten 3D-CAD-Volumenmodellierer arbeiten parametrisch, wobei parametrisch bedeutet, dass das System in der Lage ist, geometrische und/oder maßliche Zwangsbedingungen zwischen Geometrieelementen definieren zu können. Die parametrische Arbeitsweise dieser 3D-CAD-Systeme bietet die Möglichkeit, Änderungen quasi auf Knopfdruck durchzuführen (s. Abb. 2), was das nachträgliche Anpassen von Konstruktionsvarianten sehr leicht möglich macht /Bug98/, /Mut98/, /Sch98/.

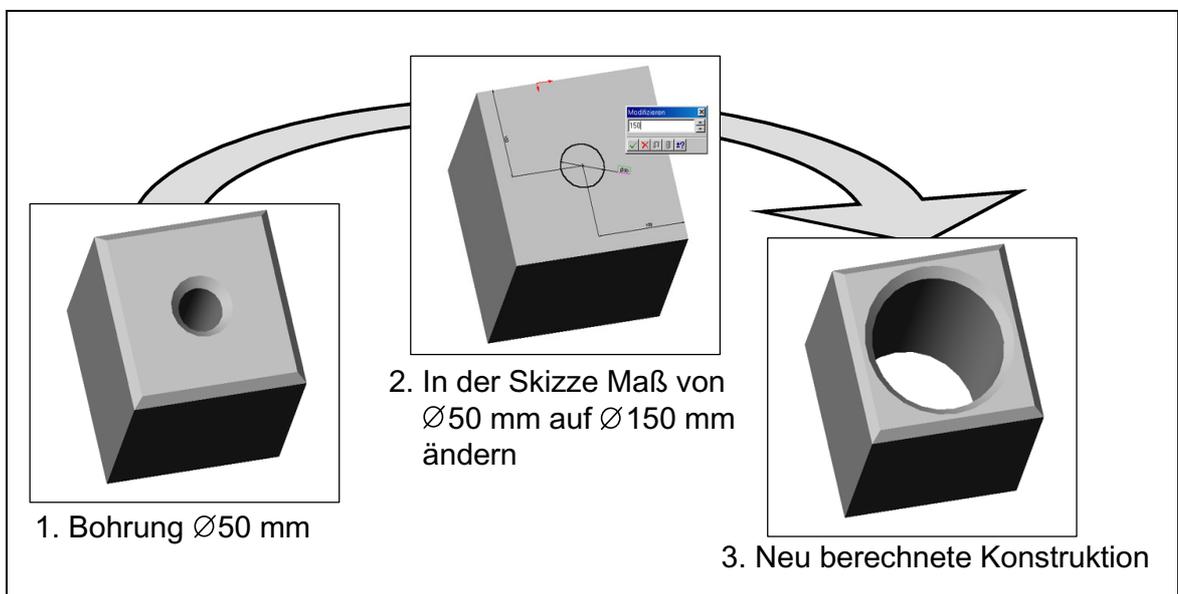


Abb. 2: Prinzipdarstellung der parametrischen Konstruktionsweise /Don99/

Da Verpackungspolster bezüglich ihrer Dämpfungseigenschaften speziell auf das zu polsternde Produkt ausgelegt und dimensioniert werden müssen, indem

Konstrukteur von Verpackungspolstern auf digitalem Weg große Zeitersparnisse bieten kann, denn die Abbildung der Außenkontur eines Produktes als Negativform im Verpackungspolster ist in Handarbeit nur sehr zeitaufwendig zu erreichen.

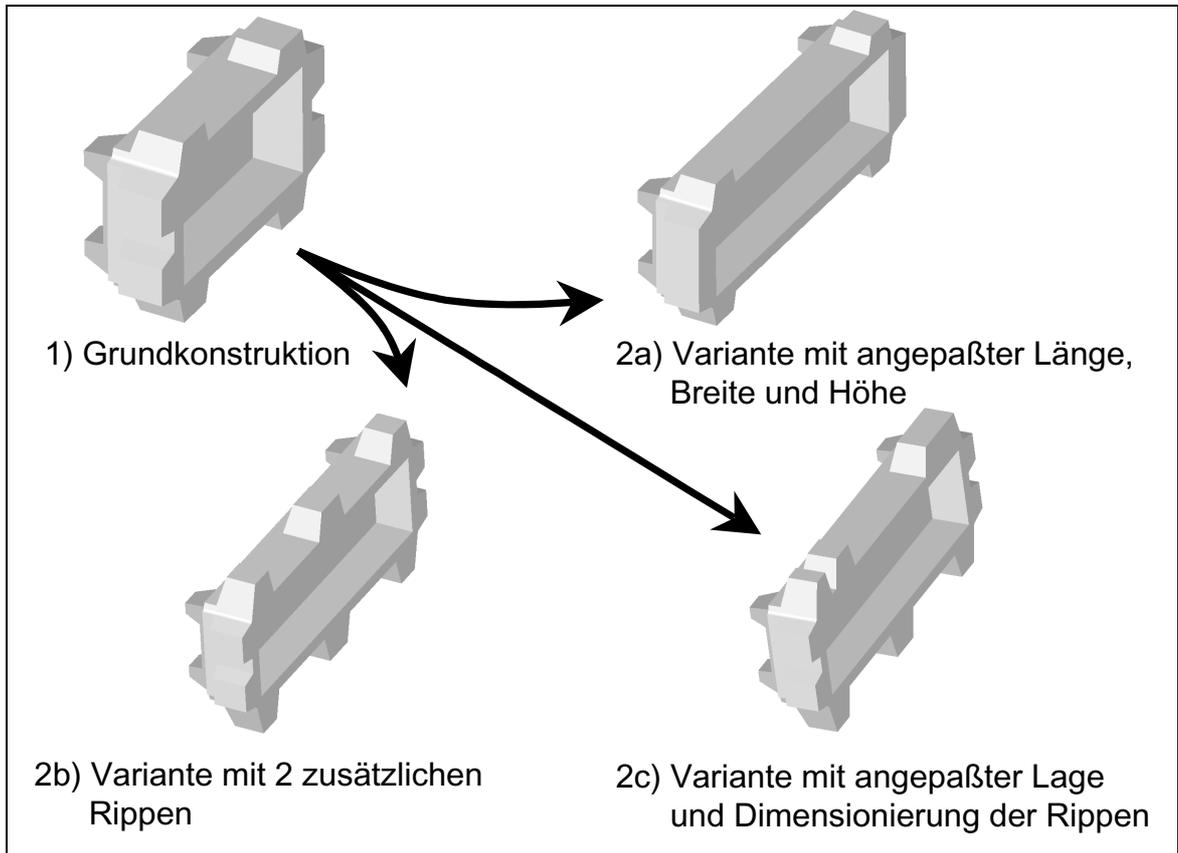


Abb. 4: Parametrische Polstervarianten

Wenn aber im CAD-System das Polster bereits konstruiert wurde, in seiner Rohform als digitaler Datensatz und zusätzlich auch das zu verpackende Produkt vorhanden ist, so muss nur ein einziger Befehl ausgeführt werden, der diese beiden 3D-CAD-Volumenkörper voneinander subtrahiert und somit einen „Abdruck“ des Produktes im Polster erzeugt /Don97/, /Jan98/, /Don98a/, /Don98b/. Abb. 5 verdeutlicht diesen Vorgang.

Anschließend bedarf es nur noch weniger Fein- und Optimierungsarbeiten, bis ein fertiges Verpackungspolster als 3-dimensionale Konstruktion in digitaler Form im Rechner vorhanden ist.

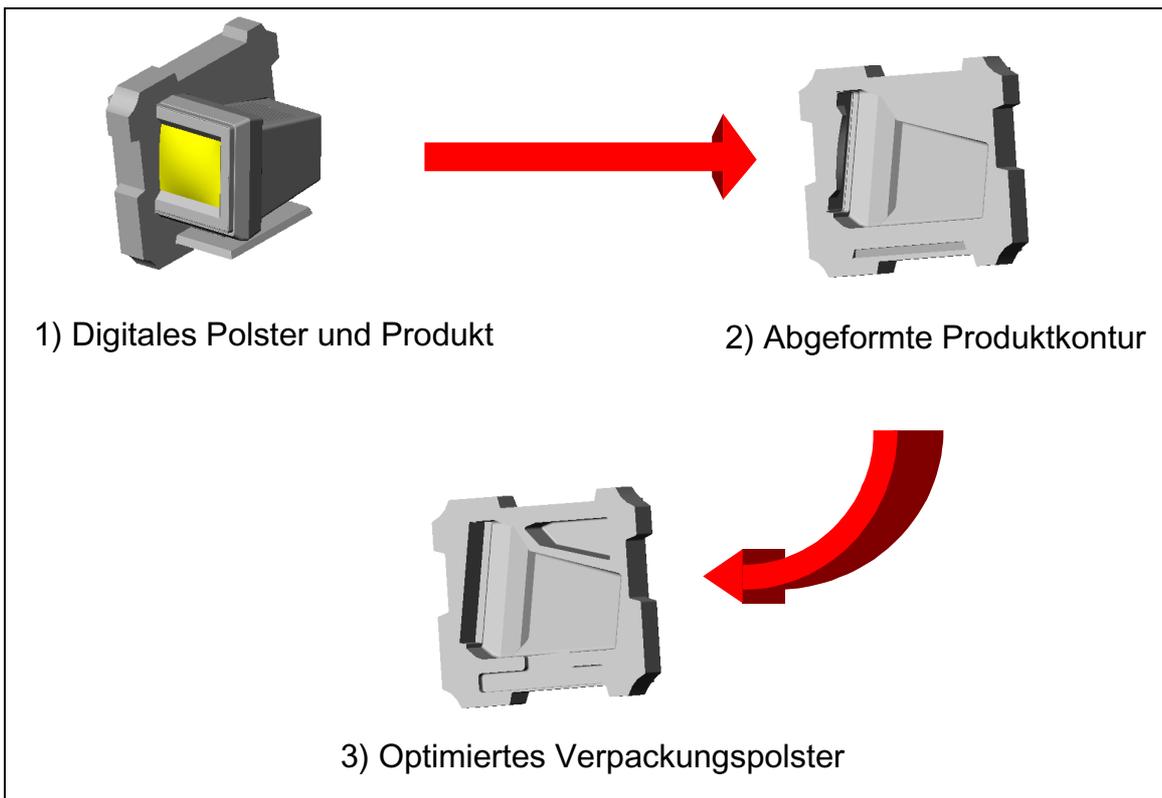


Abb. 5: Digitaler Abformprozess im 3D-CAD /Don98a/, /Don99/

Von diesem digitalen Modell des Polsters kann anschließend automatisch ein NC-Programm abgeleitet werden, so dass damit eine CNC-gesteuerte Fräsmaschine direkt angesteuert werden kann, die dann aus der digitalen Konstruktion einen realen Prototypen erzeugt. Die Zeitersparnis durch diese computer-gestützte Vorgehensweise ist groß und erhält einen um so höheren Stellenwert bei ständig vorzunehmenden Änderungsarbeiten und Variantenkonstruktionen /Don97/, /Jan98/, /Don98a/, /Don98b/, /Sch99b/, /Bre95/, /Don99/.

Problemstellung

Die wissenschaftliche Problemstellung, die im Rahmen dieser Arbeit gelöst werden soll, ist folgende: Um die beträchtlichen Rationalisierungspotenziale, die sich durch den Einsatz eines 3D-CAD-Systems in Form eines parametrischen 3D-CAD-Volumenmodellierers im Rahmen der Formteil-Verpackungsentwicklung ergäben, ausschöpfen zu können – hierzu zählen zentral die Funktionalitäten, wie sie in Abb. 2 bis Abb. 5 dargestellt sind – , ist es unabdingbar,

dass auch das zu verpackende Produkt als digitaler CAD-Datensatz in Form eines 3D-CAD-Solids vorliegt. Es sei bereits an dieser Stelle deutlich darauf hingewiesen, dass die Betonung hier auf 3D-CAD-Solid = 3D-CAD-Volumenmodell liegt; die Unterscheidung zwischen 3D-CAD-Solid und anderen digitalen Datenformaten (Punktwolke, 3D-CAD-Flächenmodell) ist für diese Arbeit von zentraler Bedeutung, da der in Abb. 5 gezeigte Abformprozess nur mit 3D-CAD-Solids möglich ist.

In der Verpackungsentwicklung ist es jedoch so, dass der Verpackungshersteller das zu verpackende Produkt eben nicht als 3D-CAD-Datensatz in Form eines 3D-CAD-Solids erhält, sondern als materiellen Prototypen, d. h. als realen Gegenstand. Das liegt u. a. daran, dass gerade Gegenstände aus dem Konsumgüterbereich vorwiegend durch das Design geprägt sind und somit auch heute noch zunächst handwerklich als (bspw. Ton-)Modell erstellt werden. Desweiteren muss davon ausgegangen werden, dass es eine Vielzahl von Produkten gibt und auch immer geben wird, die nicht mit modernsten digitalen Konstruktionsverfahren entwickelt werden. Auch diese Produkte bedürfen einer Verpackung.

Um den in Abb. 5 gezeigten Abformprozess durchführen zu können, ist es unabdingbar, diesen materiellen Prototypen zuvor in ein 3D-CAD-Solid zu überführen. Hier sei noch einmal betont: Es muss ein 3D-CAD-Solid sein, kein 3D-CAD-Flächenmodell und noch weniger eine Punktwolke. Bezogen auf das in Abb. 5 gezeigte Beispiel heißt das, dass neben dem konstruierten Verpackungspolster auch der Monitor als digitales 3D-CAD-Solid zur Verfügung stehen muss. Ist dieses nicht der Fall, so ist die gesamte zuvor beschriebene computergestützte Kette einer digitalen Verpackungs(polster)entwicklung unterbrochen, was automatisch auch eine Nutzung von 3D-CAD-Systemen in Frage stellen muss. Was nutzt ein in Rekordzeit konstruiertes und gefrästes Verpackungspolster, wenn anschließend die Kontur des Produktes wieder von Hand herausmodelliert werden muss? Aus diesem Grund ist die Einführung von modernen 3D-CAD-gestützten Verpackungsentwicklungsverfahren untrennbar

mit der Aufgabe verbunden, materielle Prototypen in ein 3D-CAD-Solid rückwandeln zu können.

Bisher existiert zu dieser Problematik kein Lösungsansatz. Weder in der Literatur noch in der industriellen Praxis der Verpackungsentwicklung ist eine Konstruktionssystematik bekannt, die eine Vorgehensweise zur Lösung dieses Problem beschreibt. Neben der Erforschung der rein technischen Realisierbarkeit spielt die Betrachtung der zu erwartenden Ergebnisse unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine wichtige Rolle.

2. Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist es, eine konstruktive und computergestützte Vorgehensweise zu erarbeiten, mit der es möglich ist, Produktprototypen bzw. existierende Gegenstände zu digitalisieren und in ein Datenformat zu überführen, welches von einem marktgängigen 3D-CAD-System verarbeitet werden kann. Bei dem Datenformat muss es sich um ein 3D-Volumenmodell (= SOLID) handeln, so dass die Rationalisierungspotenziale, die sich aus dem Einsatz von 3D-CAD-Systemen in der Verpackungsentwicklung ergeben, ausgenutzt werden können. Der so gewonnene Datensatz soll anschließend zur digitalen und 3D-CAD-gestützten Erstellung von Innenkonturen für komplexe Verpackungspolster genutzt werden, wobei mit dieser Zielstellung die Beachtung von verpackungstechnischen Randbedingungen verbunden ist, die sich wiederum auf eine konstruktive Vorgehensweise auswirken.

Neben der Fragestellung der rein technischen Realisierbarkeit wird die Zielsetzung ebenfalls unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet. Da mit der Lösung dieser Aufgabe direkt die Verbreitung von computergestützten Konstruktions- und Entwicklungswerkzeugen in der Verpackungstechnik verbunden ist, hat das Ergebnis dieser Arbeit direkten Einfluss auf einen komplexen Umdenkprozess in der gesamten mittelständischen Industrie weg von der konstruktionsbegleitenden 2D-Zeichnungserstellung hin zum computergestützten Entwickeln und Fertigen von Produkten und Verpackungen auf Basis modernster 3D-Plattformen.

Ausgehend vom Stand der Technik wird im Rahmen dieser Arbeit zunächst ein Überblick über die Verwendung von Polstermitteln im Rahmen der Verpackungstechnik gegeben. Es folgt eine Darstellung über die CAD-gestützten Möglichkeiten zur computergesteuerten Entwicklung dieser Verpackungspolster und aufbauend darauf eine Darstellung über die Einbindung der Techniken der Flächenrückführung bzw. des Reverse-Engineering.

Zur Ausschöpfung der Rationalisierungspotenziale, die sich aus dem Einsatz von 3D-CAD in der Verpackungspolsterentwicklung ergeben, werden zunächst

spezielle CAD-Funktionalitäten zur Automatisierung der Verpackungskonstruktion im Bereich der Grund- bzw. Außengestaltung entwickelt. Für die Gestaltung der Innenkonturen bzw. Formnester innerhalb eines Verpackungspolsters wird die Möglichkeit zum Einsatz der Technik des Reverse-Engineering untersucht. Auf Basis von erarbeiteten verpackungstechnischen Rahmenbedingungen werden Kriterien zur Auswahl eines geeigneten Sensorsystems vorgestellt, um im folgenden auf die Verarbeitung der Daten eines Sensorsystems einzugehen, angefangen bei den Messdaten über Punktwolken bis hin zum 3D-SOLID.

Anhand von Praxisbeispielen werden die Variationsmöglichkeiten bzgl. der Vorgehensweise innerhalb der aufgestellten computergestützten Entwicklungskette unter zeitlichen Gesichtspunkten betrachtet, um anschließend im Rahmen von Pilotanwendungen die durchgehend computergestützte Verpackungspolsterentwicklung gegen die herkömmliche manuelle Vorgehensweise abzugleichen.

Die Anwendbarkeit der gefundenen Ergebnisse wird abschließend unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet.

3. Stand der Forschung bzw. Technik

3.1. Stand der Technik für die Verwendung von Polstermitteln

3.1.1. Die Funktion von Verpackungspolstern

Die Aufgabe von Verpackungspolstern wird aus den allgemeinen Funktionen der Verpackung abgeleitet. Diese Funktionen werden klassisch in Schutz- und Qualitätserhaltungs-, Verkaufs-, Umweltschutz-, Lager- und Transport-, Identifikations-/Informations-, Verwendungs- sowie Unternehmensimagefunktionen untergliedert (vgl. Abb. 6). Diese sieben Funktionen beeinflussen sich zum Teil erheblich untereinander. Einige Eigenschaften der Verpackungen können direkt einer Funktion zugeordnet werden. Zum Beispiel sind die Eigenschaften Staubbefreiheit, Witterungsunabhängigkeit, Dichtheit und Temperaturbeständigkeit nur der Schutz- und Qualitätserhaltungsfunktion zuzuordnen. Dahingegen sind die Eigenschaften der Stoßfestigkeit, der Druckfestigkeit und der Stoßdämpfung sowohl zu der Schutz- und Qualitätserhaltungsfunktion als auch zu der Lager- und Transportfunktion der Verpackungen zu zählen.

Im Rahmen dieser Arbeit liegt aufgrund der Zielstellung das besondere Interesse an Verpackungseigenschaften, die sowohl den Schutz- und Qualitätserhaltungs- als auch den Lager- und Transportfunktionen zuzuordnen sind. Konkret wird hier die Entwicklung von Verpackungspolsterprototypen behandelt, deren Einsatz einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Verpackung bei Stoß- und Schwingungsbelastungen sowie auf die Lagefixierung des Produktes in einer Verpackung hat.

Das Ausmaß der notwendigen stoßdämpfenden Schutzfunktion einer Verpackung hängt besonders von den zwei Faktoren

- Belastungen durch Transport, Umschlag und Lagerung (TUL) und
- Produktempfindlichkeit

ab.

| | | |
|--|--|---|
| Schutz- und Qualitätserhaltungsfunktion | | staubfrei witterungsunabhängig dicht mengenerhaltend schwer entflammbar temperaturbeständig korrosionsbeständig chemisch neutral |
| | Lager- und Transportfunktion | stoßfest druckfest stauchfest reißfest formstabil stoßdämpfend |
| stapelbar rutschsicher handhabbar mechanisierbar automatisierbar unterfahrbar einheitenbildend genormt modular/ integrierbar | | |
| raumsparend flächensparend | | |
| Verkaufsfunktion | | kostengünstig ökonomisch market.- mix stimmig |
| | Identifikations-/ Informationsfunktion | informationstragend identifizierbar unterscheidbar |
| | Verwendungsfunktion | leicht zu öffnen wiederverschließbar umweltfreundlich |
| automatisch zu verpacken entsorgungsfreundlich wieder-,weiterverwendbar hygienisch | | |
| Umweltschutzfunktion | | |
| Unternehmensimagefunktion | | |

Abb. 6: Übersicht über die Funktionen einer Verpackung /Jan96/

Vor dem Hintergrund zunehmender Globalisierung ist ein wachsender Materialstrom von Produktionsfaktoren, Halbzeugen und Produkten zwischen Produktionsorten, Handelsunternehmen und Konsumenten erforderlich. Dabei ist es nicht nur ausreichend, dass die Güter an den gewünschten Zielorten rechtzeitig eintreffen, sondern insbesondere, dass die Qualität der Güter nicht durch beim Transport zwangsläufig auftretende Belastungen beeinträchtigt wird.

Tab. 1: Stoßempfindlichkeiten von Packgütern /Esc93/

| G-Wert | Stoßempfindlichkeit | Packgutzuzuordnung |
|-------------|------------------------|---|
| bis 20g | extrem empfindlich | Präzisionsmesseinrichtung mit empfindlicher mechanischer Lagerung, z. B. Schleifengalvanometer, Kreiselkompass |
| 20g - 40g | sehr empfindlich | Instrumente und elektronische Ausrüstungen, die in eine steife Rahmenkonstruktion eingebaut sind, spitzengelagerte elektrische Messinstrumente, Navigationsgeräte, Großröhren, Lampen |
| 40g - 60g | empfindlich | elektro-feinmechanische Geräte, z. B. elektrische Schreibmaschinen, Registrierkassen, elektrische Schaltanlagen, Kühlanlagen |
| 60g-85g | mäßig empfindlich | Rundfunk- und Fernsehgeräte, optische Geräte (Filmvorführgeräte u. a.), allgemeine elektrische Ausrüstungen und Messgeräte, elektrische Haushaltsgeräte, robuste Röhren |
| 85g- 110g | ziemlich unempfindlich | Glas- und Porzellanwaren, Wärmetauscher, Akkumulatoren |
| 110g - 200g | unempfindlich | Maschinen, Motoren, Transformatoren, Glasflaschen |

Die Verpackung und insbesondere verwendete Verpackungspolster sollen gewährleisten, dass von der Gesamtheit der auf die Verpackung einwirkenden

Belastungen nur ein für das Produkt unkritischer Anteil übertragen wird. Als Maß der Belastung wird die Beschleunigung herangezogen, wobei die Höhe der Belastung als ein Vielfaches der Erdbeschleunigung ausgedrückt wird. Zur groben Abschätzung der Produktempfindlichkeit, d. h. der unkritischen Maximalbelastung für ein Produkt, wird oft eine Tabelle zur Hilfe herangezogen, in der bestimmte Produktgruppen entsprechend unkritischen Beschleunigungsintervallen zugeordnet werden (vgl. Tab. 1.).

Bedingt durch die sich verkürzenden Produktlebenszyklen einer modernen Industriegesellschaft können diese Tabellenwerte jedoch lediglich zur groben Abschätzung der Empfindlichkeit eines Packgutes Verwendung finden und ersetzen nicht die Notwendigkeit einer labortechnischen Überprüfung. Außerdem sind diese Überprüfungen erforderlich, da viele Produkte in verschiedensten Qualitäten und Werkstoffen hergestellt werden, so dass ihre Reaktionen auf Stöße bzw. ihre Produktempfindlichkeit nicht pauschal abgeschätzt werden können.

Die Verpackung und insbesondere die Verpackungspolster müssen die über die Produktempfindlichkeit übertreffende Belastung bzw. Belastungsspitzen aufnehmen. Dies erfolgt bei einem Stoß durch eine zeitliche Verlängerung des Stoßimpulses, d. h. die Geschwindigkeitsdifferenz vor und nach einem Stoß wird am Produkt aufgrund des polsterspezifischen Übertragungsverhaltens in einem größeren Zeitintervall erfolgen. Somit wirkt auf das Packgut eine verminderte Beschleunigungsspitze ein (vgl. Abb. 7).

Die auf das Packgut einwirkende Beschleunigung ist hierbei sowohl von dem Verformungsweg als auch von der Verformungsgeschwindigkeit abhängig und beinhaltet Beschleunigungsspitzen im Verlauf der Stoßübertragung. Die gesamte Verformungsarbeit eines Polstermittels ist demzufolge die Summe infinitesimaler Arbeitsanteile entlang des Verformungsweges und dissipativer Energieanteile in Form von Wärme- und Strömungsenergie aus der Änderung der kinetischen Packgutenergie im Verlauf der Stoßübertragung. In Abb. 7

kann die Höhe der jeweiligen Stoßübertragungsenergie anhand der gekennzeichneten Flächen A_1 und A_2 unter den dargestellten Stoßverläufen abgelesen werden. Die mechanischen Zusammenhänge werden in Kap. 3.1.4 auf Seite 40 näher beschrieben.

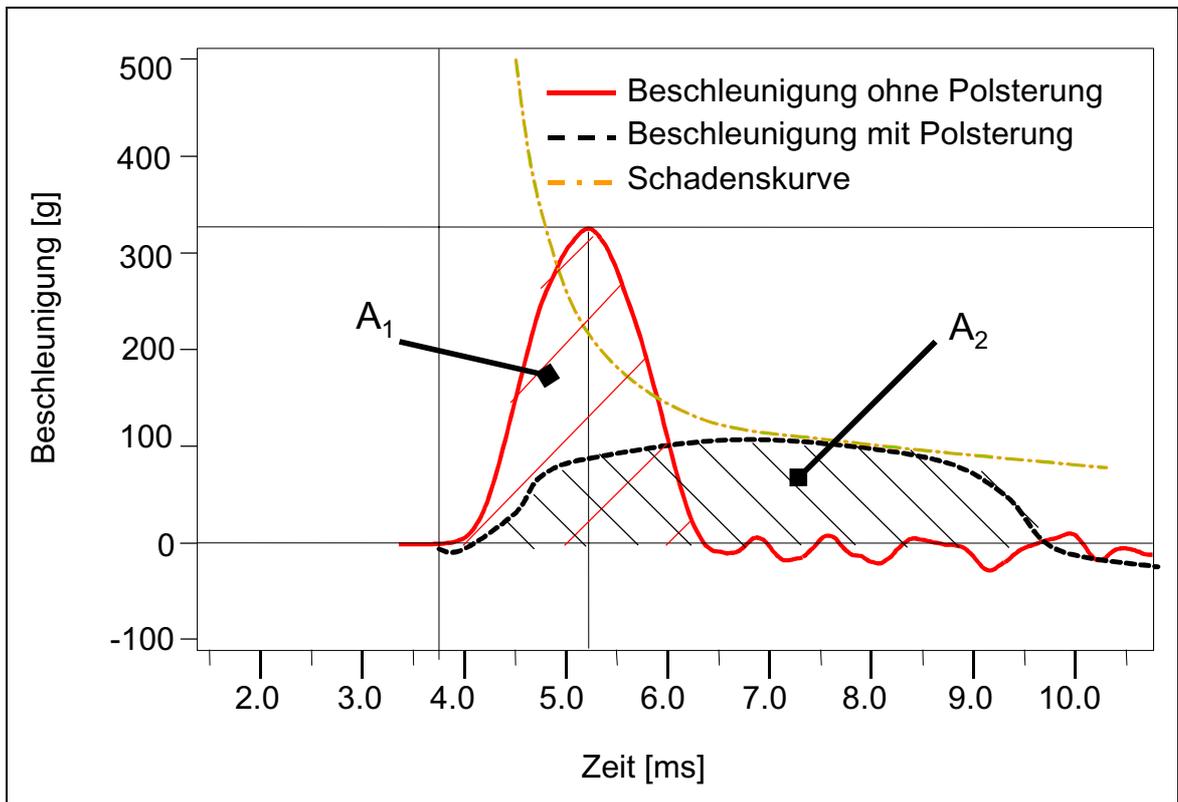


Abb. 7: Schematische Darstellung der Verlängerung des Stoßimpulses durch Einsatz eines Verpackungspolsters /Hir01/

Ergänzend zur Schutzwirkung vor Stößen wird der Einsatz eines Polstermittels durch das zu Grunde liegende Übertragungsverhalten bei einwirkender Schwingungsbelastung bestimmt. Insbesondere bei Packgütern mit schwingfähigen Bauteilen begründen Resonanzerscheinungen vielfach die Hauptursache auftretender Transportschäden, so dass sich im Hinblick auf die anforderungsgerechte Bemessung der Transportschutzfunktion eines Polstermittels die Forderung einer schwingtechnischen Analyse ableitet. Eine Resonanzerscheinung tritt dann auf, wenn ein Packgut einer Erregerschwingung bedingt durch Transportvorgänge ausgesetzt ist, die der Eigenfrequenz

entspricht. Dies hat zur Folge, dass die sich einstellende Schwingung eine Amplitude aufweist, die einem Vielfachen der Amplitude der Erregungsschwingung entspricht. In dieser Situation wirken auf das Packgut sehr hohe Kräfte mit schädigender Wirkung. Folglich kann hier mit der gezielten Auswahl des Verpackungsmaterials das Verschieben der Resonanzfrequenz des gesamten Packstücks aus dem Bereich der häufig auftretenden Schwingungen bei Transportvorgängen erreicht werden. In diesem Fall entspricht also die Eigenfrequenz des Packstücks, bestehend aus Polster und Packgut, nicht mehr den Schwingungsfrequenzen, die beim Transportprozess auftreten.

Gleichzeitig zu den mechanischen Schutzfunktionen liegt eine wesentliche Funktion der Verpackungspolster in der Fixierung der Lage des Produktes innerhalb einer standardisierten Außenverpackung (z. B. Kartonage oder Behältnis), so dass durch Ausfüllen von Hohlräumen durch den Einsatz von Polstermitteln eine eindeutige Positionierung und Orientierung während des Transportvorganges aufrechterhalten bleibt.

3.1.2. Packstoffbezogene Klassifizierung von Polstermitteln

Bezug nehmend auf den Packstoffeinsatz können die für industrielle Abpackvorgänge eingesetzten Polstermittel einer grundlegenden Einteilung unterzogen werden, die unter Berücksichtigung der rohstofflichen Verfügbarkeiten den Einsatz metallischer, fossiler und nachwachsender Rohstoffe zur Packstoffverarbeitung unterscheidet (Abb. 8). Während der Polstermitteleinsatz mit metallischer Rohstoffzugehörigkeit lediglich auf ausgewählte Anwendungsbereiche (z. B. Automobilzulieferindustrie) beschränkt ist, eröffnet sich demgegenüber für Polstermittel auf Basis petrochemischer Polymere sowie aus nativer Zellulose und Stärke ein weitreichendes industrielles Nutzungspotenzial.

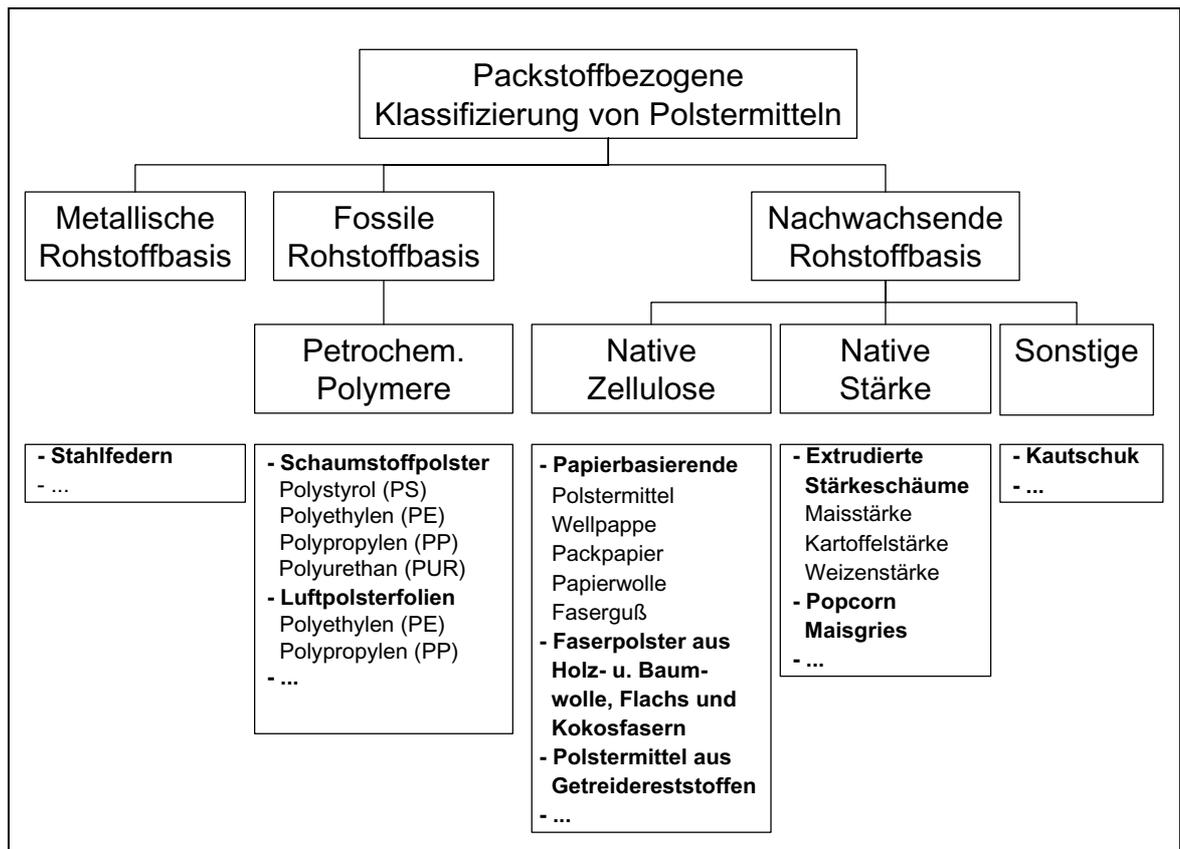


Abb. 8: Packstoffbezogene Einteilung von Polstermitteln /Hei96/

In der Praxis haben sich vor allem Polstermittel aus petrochemischen Polymeren in Form geschäumter Formteile aufgrund hervorragender Dämpfungs¹- und Verarbeitungseigenschaften bewährt. Nach DIN 7726 /Din82a/ werden Schaumstoffe hierbei als Werkstoffe mit über die gesamte Masse verteilten Zellen und einer Rohdichte, die niedriger ist als die Dichte der Gerüstsubstanz, definiert.

Entsprechend der Zellenart werden offenzellige, geschlossenzellige und gemischtzellige Schaumstoffe unterschieden, deren polstermittelspezifisches Absorptionsverhalten² ergänzend zur Verformungsarbeit des Zellgerüsts durch

¹ Unter Dämpfungseigenschaften wird die Eigenschaft eines Objektes bezeichnet, Schwingungs- und Impulsamplituden zu vermindern.

² Unter Absorptionsverhalten wird die Aufnahmemöglichkeit eines Körpers von einem Fluid oder Aerosols, d. h. eines Gas-Partikel-Gemisches verstanden.

das Wirkverhalten der in den Zellen befindlichen Luft bestimmt wird. Als Folge einer äußeren Lasteinwirkung führt die Stauchung eines offenzelligen Schaumstoffs an dieser Stelle zu einer Luftverdrängung aus den Zellen des tragenden Gerüsts, die im Anschluss der Belastung von einer Rückströmung verdrängter Luft begleitet wird (vgl. Abb. 9).

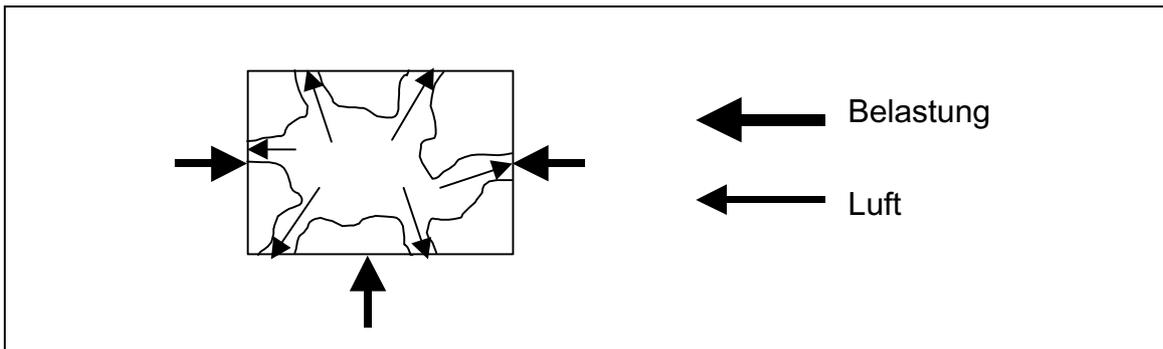


Abb. 9: Schematische Darstellung des Wirkverhaltens eines offenzelligen Schaumstoffes bei Belastung /Hir01/

Bei geschlossenzelligen Schaumstoffen ist die Luft innerhalb der Zellwände aneinander gereiht und miteinander verbundener Zellen demgegenüber eingeschlossen, so dass das polstermittelspezifische Wirkverhalten vornehmlich auf den Kompressions- und Expansionseigenschaften des Mediums Luft beruht (vgl. Abb. 10).

Bedingt durch das zu Grunde liegende Wirkprinzip zeigen offen- und geschlossenzellige Schaumstoffe unterschiedliche Verformungseigenschaften, wobei mit zunehmendem Anteil der offenen Zellen eines gemischtzelligen Schaumstoffs der Verformungswiderstand abnimmt, da die Luft aus den offenzelligen Schaumstoffen bei Belastung nur entweicht und nicht wie bei geschlossenzelligen Schaumstoffen komprimiert wird. Diese Kompression führt zum Druckaufbau in den Zellen und somit zur Erhöhung des Verformungswiderstandes /Hei96/.

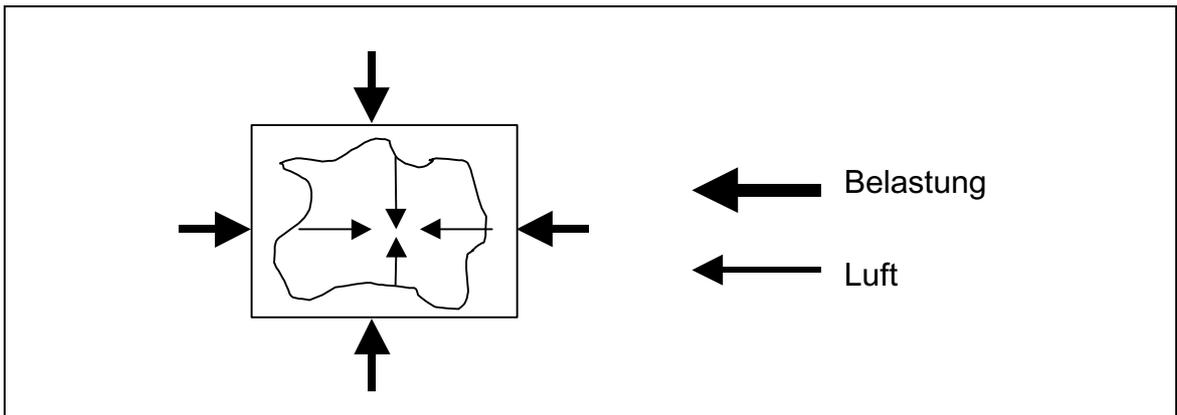


Abb. 10: Schematische Darstellung des Wirkverhaltens eines geschlossenzelligen Schaumstoffes bei Belastung /Hir01/

Hinsichtlich des bei reiner Druckbelastung auftretenden Verformungswiderstandes lassen sich harte, halbharte und weiche Schaumstoffe unterscheiden. Die mechanischen Eigenschaften sind hierbei sowohl von der Polymerverwendung als auch von der Zellstruktur abhängig und unterliegen einer gezielten verfahrenstechnischen Ausbildung. Somit werden einheitliche und reproduzierbare Qualitätsstandards von Schaumstoffen ermöglicht und auf der Grundlage definierter Festigkeitseigenschaften wird eine anforderungsgerechte Dimensionierung von Schaumstoffverpackungen sichergestellt.

Bei einwirkenden Belastungen in Form von Feuchtigkeit sind geschlossenzellige Schaumstoffe durch verminderte hygroscopische Eigenschaften gekennzeichnet und begründen eine lediglich durch die Polymereigenschaften bestimmte Feuchtigkeitsabhängigkeit der polstermittelspezifischen Transportschutzwirkung. Folglich sind die Änderungen der polstermittelspezifischen Transportschutzwirkung bei diesem Schaumstoff geringfügig. Offenzellige Schaumstoffe zeigen demgegenüber ein ausgeprägtes Feuchtigkeitsaufnahmevermögen mit einer Beeinträchtigung des mechanischen Übertragungsverhaltens, da bei zunehmender Einlagerung von Wasser nicht, wie zuvor beschrieben, das Strömungsverhalten von Luft aus den Zellen heraus die Polstereigenschaften bestimmt, sondern das Strömungsverhalten von Wasser,

welches durch die unterschiedliche Viskosität der Flüssigkeit deutlich unterschiedlich ausgeprägt ist.

Bezug nehmend auf den Packstoffeinsatz konzentrieren sich die polsterspezifischen Ausführungsformen im Bereich petrochemischer Polymere auf die Verwendung thermoplastischer Kunststoffe. In geschlossenzelliger Schaumstruktur ist der Polymerwerkstoff **Polystyrol** an dieser Stelle durch den größten Verbreitungsgrad gekennzeichnet. Unterschieden werden hierbei die Form- und Schüttpolsteranwendung, wobei die kostenintensive Schaumwerkzeugherstellung den Einsatz formgeschäumter Polystyrol-Polstermittel weitestgehend auf den Bereich der Massen- und Großserienfertigung beschränkt. Im Rahmen einer Halbzeugverarbeitung können Polystyrol-Schaumstoffe durch spanende und thermische Fertigungsverfahren einer formgebenden Konfektionierung unterzogen werden, so dass insbesondere im Bereich der Muster- und Prototypenerstellung eine kostenintensive Werkzeugfertigung vermieden wird.

Die mechanischen Polstereigenschaften von Polystyrol-Schaumstoffen sind im wesentlichen durch die Rohdichte der Formteile bestimmt, die sich verfahrenstechnisch mit engen Rohdichtetoleranzen herstellen lassen und somit die Voraussetzungen einer anforderungsgerechten Dimensionierung schaffen. Denn nur bei einer engen Rohdichtetoleranz können die mechanischen Polstereigenschaften im Vorfeld abgeschätzt werden.

Unter Berücksichtigung des Rohdichteeinflusses auf das polstermittelspezifische Übertragungsverhalten erfolgt der Einsatz von Polystyrol-Schaumstoffen für Verpackungspolster zur Stoßabsorption in der Regel im Rohdichtebereich von 20 kg/m^3 bis 30 kg/m^3 , da sich zeigte, dass sich in diesem Bereich der beste Kompromiss zwischen der notwendigen Polsterdicke und den Stoßabsorptionseigenschaften ergibt. Die diesbezüglichen Packstoffeigenschaften und Lieferbedingungen sind in Form der Norm DIN 55471 - Teil 2 /Din85/ einem allgemeingültigen Qualitätsstandard unterzogen.

Für Kleinserien mit individuellen Packgutanforderungen finden Polystyrol-Polstermittel in Form ungeschäumter bzw. teilgeschäumter Partikel (Loose-Fills) mit Endschüttdichten von 4 kg/m^3 bis 8 kg/m^3 Verwendung. Über pneumatische Fördersysteme können hierbei die vielfach in Silobehältern zentral gelagerten Polstermittel rationell am dezentralen Abpackplatz bereitgestellt werden, so dass sich hieraus verminderte innerbetriebliche Lager- und Transportkosten ableiten.

Polyolefin-Schaumstoffe aus **Polyethylen (PE)** und **Polypropylen (PP)** finden in unterschiedlichen Ausführungsformen zum Verpacken mechanisch empfindlicher Packgüter mit erhöhten Transportschutzanforderungen (z. B. Präzisionsmessinstrumente) Verwendung. Die polsterspezifischen Übertragungseigenschaften eröffnen industrielle Einsatzfelder im Anwendungsbereich außerhalb harter Schaumstoffe aus expandiertem Polystyrol und weichelastischen Schaumstoffen auf Polyurethanbasis. Als grundlegende Formgebungsverfahren zur anwendungsbezogenen Polstermittelherstellung werden die Konfektionierung von Standardhalbzeugen (z. B. Schaumstoffplatten) durch fertigungstechnische Füge- und Trennverfahren sowie in selteneren Anwendungsfällen die Formteilschäumung unterschieden. Hinsichtlich der Zellstruktur zeigen PE- und PP-Schaumstoffe einen geschlossenzelligen Aufbau mit im Vergleich zu offenzelligen Schaumstoffen verbesserten Energieabsorptionseigenschaften. Ebenso begründet das weichelastische Zellgerüst ein das Leistungsvermögen von Polystyrol-Schaumstoffen übersteigendes Rückstellverhalten, so dass bei wiederholter Lasteinwirkung in Form von Stößen und Schwingungen eine verbesserte Transportschutzwirkung aufrechterhalten bleibt.

Bedingt durch die frühzeitige Markteinführung und die sich einstellende Marktbedeutung wurden die technologischen Anforderungen an PE-Schaumstoffe für Verpackungszwecke in der Norm DIN 55481 - Teil 2 /Din87/ beschrieben. Ein vergleichbarer Standard für PP-Schaumstoffe fehlt jedoch bis heute.

Bezug nehmend auf den polstermittelspezifischen Anwendungsvergleich geschäumter Formteile auf Basis der synthetischen Polymere Polyethylen und Polypropylen, sind kennzeichnende Eigenschaftsmerkmale in Tab. 2 aufgeführt, wobei die technologischen Einsatzvorteile der kostenintensiveren Polypropylen-Schaumstoffe hierbei insbesondere durch erhöhte Druckfestigkeiten, verbesserte Absorptionseigenschaften von Stoßenergien sowie eine höhere Wärmeformbeständigkeit und verminderte hygroskopische Eigenschaften beschrieben sind.

Tab. 2: *Technologischer Vergleich geschäumter Formteile aus Polyethylen und Polypropylen /Hei96/*

| Eigenschaften (Mittelwerte) | Einheit | Polyethylen geschäumte Formteile | Polypropylen geschäumte Formteile |
|---|-------------------|---|--|
| Rohdichte | g/l | 35 | 28 |
| Zugfestigkeit | N/mm ² | 0,320 | 0,430 |
| Dehnung | % | 60 | 15 |
| Stoßelastizität | % | 60 | 35 |
| Druckspannung | | | |
| Verformung 25 % | N/mm ² | 0,080 | 0,140 |
| Verformung 50 % | N/mm ² | 0,140 | 0,240 |
| Druckverformungsrest (25%, 23°C, 22 h) | | | |
| nach 0,5 h | % | 19 | 18 |
| nach 6,0 h | % | 14 | 11 |
| nach 24,0 h | % | 7 | 8 |
| Wärmeformbeständigkeit | °C | 80 | 110 |
| Wärmeleitzahl 20°C | W/mK | 0,044 | 0,039 |
| Wasseraufnahme | Vol-% | 2,5 | 1,0 |

Im Verpackungsbereich finden **Polyurethan-Schaumstoffe (PUR)** auf Polyether- und Polyesterbasis sowie in Form von Flockenverbundschäumen Verwendung, deren technisch physikalischen Kennwerte hinsichtlich Rohdichte, Stauchhärte und Druckverformungsrest im Rahmen einer Blockschäumstoffklassifizierung innerhalb der Norm DIN 55482 - Teil 1 beschrieben sind /Din89/. Als Transportschutzverpackung konzentriert sich der Einsatz von

PUR-Schaumstoffen auf weiche bis halbharte Spezifikationen mit überwiegend offenzelliger Schaumstruktur, wobei die Bandbreite der Rohdichte bei den am häufigsten eingesetzten Verpackungsschäumen zwischen 6 kg/m^3 und 15 kg/m^3 liegt /Dol88/. Im Vergleich zu Schaumstoff-Polstermitteln aus Polystyrol, Polyethylen und Polypropylen zeigen Polyurethan-Schaumstoffe verbesserte Rückstelleigenschaften mit maximalen Druckverformungsresten (bleibende Verformung) unterhalb von 20 % bei einer Zusammendrückung von 50 % entsprechend den Prüfbedingungen nach DIN 53572 /Din82b/, demgegenüber jedoch das Absorptionsvermögen von Stoßenergie als Folge der Offenzelligkeit durch verminderte Werte beschrieben ist.

Die polstermittelspezifischen Einsatzformen von PUR-Schaumstoffen unterscheiden universell verwendbare Formgebungsstandards in Matten- und Plattenbauweise sowie komplexe Formteilenwendungen auf Basis einer Packgut-Direkteinschäumung bzw. einer Formpolsterfertigung durch Ausschäumen einfacher Schäumwerkzeuge.

Industrielle Anwendungsfelder findet das Verfahren der Direkteinschäumung insbesondere im Bereich der Kleinserienfertigung mit unterschiedlichen Packgutgeometrien, die eine flexible Anpassung der polstermittelspezifischen Formgebung erfordern. Demgegenüber unterliegt der Einsatz von PUR-Schaumstoffen im Bereich größerer Stückzahlen einer Formpolsterfertigung, deren grundlegende Einsatzvorteile sich aus verminderten Packstoffaufwendungen in Verbindung mit vereinfachten Handhabungsabläufen des Abpackvorganges ableiten.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die einzelnen Polstermaterialien sich vor allem in der Härte und im Rückstellvermögen unterscheiden. Styropor ist im Vergleich zu den anderen Materialien hart und weist ein geringeres Rückstellvermögen nach Druckverformungen auf, Polyurethan-Schaumstoffe sind dagegen sehr weich und haben ein größeres Rückstellvermögen. Die Materialeigenschaften der Schaumstoffe aus Polyethylen und

Polypropylen liegen hinsichtlich der Härte und des Rückstellvermögens zwischen Styropor und Polyurethan-Schaumstoffen. Als Konsequenz für den Verpacker bedeutet dies, dass sehr leichte und empfindliche Packgüter besser mit dem weichen Polyurethan-Schaumstoffen und schwere zu verpackende Güter mit Styropor vor Belastungen geschützt werden. Ferner unterscheiden sich diese Materialien im Preis, wobei Styropor mit Abstand das billigste und Polyurethan-Schaumstoffe das teuerste dieser Polstermaterialien ist.

3.1.3. Entwicklung und Produktion von formgeschäumten Verpackungspolstern

Hinsichtlich der Produktion von formgeschäumten Verpackungspolstern werden in dieser Arbeit im wesentlichen Schaumstoffe aus petrochemischen Polymeren betrachtet. Da diese Werkstoffe zu den Thermoplasten zählen, werden diese Schaumstoffe mittels Wärmezufuhr oberhalb der Glasstemperatur und unter Einsatz eines Treibmittels zur Volumenvergrößerung erzeugt. Im einzelnen erfolgt dabei die Schaumstoffherstellung in den Arbeitsstufen:

- Vorschäumen,
- Zwischenlagern und
- Ausschäumen.

Vorschäumen

Ziel des Vorschäumens ist die Bildung von Zellen in der Gerüstsubstanz und zwar in diesem Arbeitsschritt in jedem einzelnen Teilchen aus petrochemischen Polymeren. Hierbei sollen sich die einzelnen Teilchen noch nicht verbinden. Beim Vorschäumen laufen folgende einzelne Prozessschritte ab: Zunächst erfolgt das Erweichen der Rohstoffteilchen durch Wärme und anschließend das ungehinderte Aufblähen dieser Teilchen mittels Expansion des Treibmittels. Dieser Prozess wird heute praktisch ausschließlich mit Hilfe von Wasserdampf als Wärmeträger bei Temperaturen von 80 bis 110°C durchgeführt. Andere Energieträger wie Heißluft oder Heißwasser haben in diesem Zusammenhang keine wirtschaftliche Bedeutung. Wasserdampf wird insbesondere wegen

seines hohen Energiespeichervermögens bevorzugt, da bei der Phasenumwandlung von Dampf zu Wasser eine Wärmemenge in Form von Kondensationswärme von 2186 kJ/kg ohne Temperaturabsenkung frei wird.

Ab einer Temperatur von etwa 80°C erweicht der Rohstoff und der ansteigende Dampfdruck des Treibmittels bläht die Perlen ca. bis zum Fünzigfachen ihres ursprünglichen Volumens auf. Wasserdampf hat darüber hinaus die Eigenschaft, sehr viel schneller als z. B. Luft oder Treibmitteldampf durch die sich bildenden Zellwände zu diffundieren und ist somit in der Lage, den Expansionsvorgang aktiv zu unterstützen.

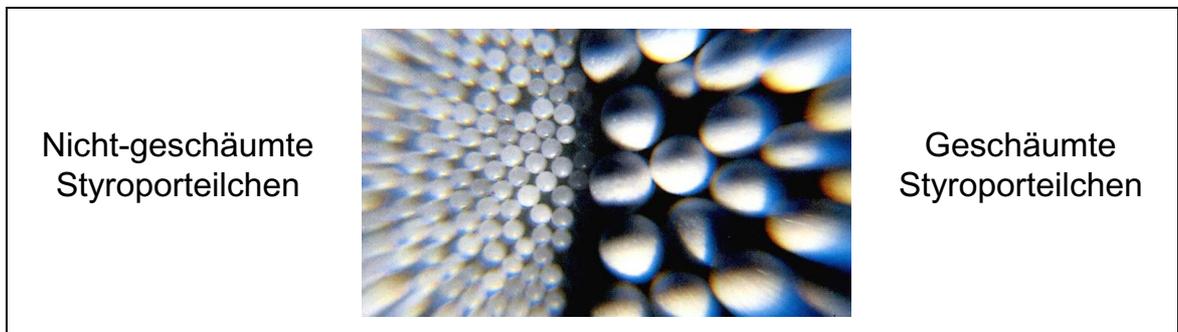


Abb. 11: Größenverteilung von nicht- und geschäumten Styroparteilchen /NN90a/

Wird beim Schäumen die Zeit überschritten, die bis zum Erreichen der minimalen Schüttdichte erforderlich ist, sinkt der Überdruck in den Teilchen durch die Gasabgabe. Die Teilchen ziehen sich dabei langsam zusammen und eine Volumenschrumpfung ist zu beobachten. Dieser Zustand wird als „überschäumt“ bezeichnet. In Abb. 11 werden vorgeschäumte Styroparteilchen im Vergleich zu nicht vorgeschäumten Teilchen - den Styroparteilchen im Ausgangsstadium des Prozesses - dargestellt. Es ist eine deutliche Vervielfachung der Teilchenvolumen zu erkennen.

Der Aufschäumungsgrad, also die Schüttdichte, liegt gewöhnlich zwischen 10 und 30 kg/m³; für Block- und Trittschallmaterial bei ca. 10 bis 20 kg/m³, für Formteile vorzugsweise zwischen 18 und 30 kg/m³ /NN95/.

Zwischenlagern

Das Zwischenlagern der vorgeschäumten Perlen in belüfteten Silos ist eine zweite und sehr wichtige Stufe auf dem Weg zur Schaumstoffherstellung. Ziel des Zwischenlagerns ist die Trocknung und Stabilisierung der vorgeschäumten Teilchen bzw. Perlen.

Die durch das Vorschäumen bedingte Volumenvergrößerung der Rohstoffpartikel bewirkt eine geschlossenzellige Raumstruktur des Materials. Nach Verlassen des Vorschäumers setzt sofort die Abkühlung des Gefüges ein, wobei das Resttreibmittel und der eindiffundierte Wasserdampf kondensieren. Dieses hat zur Folge, dass in den Zellen ein Unterdruck entsteht. Aus diesem Grund sind die frischen Schaumstoffzellen mechanisch instabil und müssen vor der Weiterverarbeitung in luftdurchlässigen Silos zwischengelagert werden, wobei darauf zu achten ist, dass der Transport dorthin möglichst schonend erfolgt, um eine Verdichtung/Verklumpung des Materials zu vermeiden. Während der Zwischenlagerung laufen mehrere Prozesse gleichzeitig ab:

1. Durch das Eindiffundieren von Luft durch die Zellmembranen werden die Partikel mechanisch stabil.
2. Durch das Abgeben von Feuchtigkeit an die Atmosphäre wird die Rieselfähigkeit des Materials erhöht, wodurch das Fördern sowie das Füllen schwieriger Formen erleichtert wird.
3. Das Resttreibmittel diffundiert aus.

Die Zwischenlagerzeiten sind im wesentlichen abhängig von der Schüttdichte³, der Größe der Schaumstoffpartikel sowie der Lagertemperatur. So ergibt sich für die üblicherweise verwendete Schüttdichte von 18 bis 22 kg/m³ für feinteilige Formteilmaterialien eine Lagerungszeit von mindestens fünf Stunden. Nach dieser Zeit ist die Luftaufnahme weitestgehend abgeschlossen, so dass sich die

Verarbeitungseigenschaften des Materials in den nächsten 24 Stunden nicht mehr ändern. Die maximale Zwischenlagerzeit sollte 48 Stunden nicht überschreiten, da sonst die Blähkraft des Materials allmählich nachlässt, was sich allerdings durch einen leicht erhöhten Ausschäumdruck verhindern lässt. Da die vorgeschäumten Partikel unterschiedlich feucht aus dem Zwischenlager kommen, muss das Material vor dem Ausschäumen getrocknet werden /NN95/.

Ausschäumen

In dieser Stufe erfolgt die Umwandlung der losen Perlschüttung zu Schaumstoffblöcken oder Schaumstoff-Formteilen. Die Ausschäumung geschieht prinzipiell nach folgendem Ablauf: Dem als Kugelschüttung vorliegenden Material wird Energie in Form von Wasserdampf zugeführt. Dies hat zur Folge, dass das Polymergerüst aufweicht und gleichzeitig den Dampfdruck des Resttreibmittels erhöht, was das weitere Expandieren der Schaumstoffkugeln bewirkt. Da dieser Prozess in einem Raum mit gasdurchlässigen formstabilen Wandungen durchgeführt wird, die keine Volumenvergrößerungen zulassen, steht für die Expansion der Partikel nur das freie Volumen zwischen den Schaumstoffkugeln selbst zur Verfügung. Dabei bildet sich eine Polyederstruktur und die sich berührenden Flächen versintern miteinander, so dass mechanisch widerstandsfähige Polsterblöcke und -formteile entstehen.

Zur Herstellung von Schaumstoffkörpern mit unterschiedlichen Geometrien, wie zum Beispiel Verpackungspolster, werden Formteilautomaten eingesetzt. Sie bestehen aus einer stabilen Rahmenkonstruktion, in der zwei Dampfkammern gegeneinander verschiebbar angeordnet sind (s. Abb. 12). Eine dieser Kammern ist fest mit der Rahmenkonstruktion verbunden, während sich die andere in vertikaler oder horizontaler Richtung verschieben lässt. Die Dampfkammern haben getrennte Anschlüsse für Dampf, Druckluft, Wasser und Vakuum. Um eine gezielte Benetzung der Werkzeugrückseite zu erreichen, sind

³ Die Schüttdichte ist das Verhältnis der Masse eines Schüttgutes in einem definierten Volumen. Sie nimmt mit der Größe des durchschnittlichen Teilchendurchmessers des Schüttgutes ab.

die Kammern innenseitig gegen Wärmeabstrahlung isoliert und verfügen über ein Kühlwassersprühsystem. Die zweigeteilten und mit Dampfdufen perforierten Formwerkzeuge werden auf Formträgerplatten vormontiert, um so schneller an den Dampfkammern befestigt werden zu können. Formteilautomaten besitzen entweder ein eigenes Vakuumsystem oder sind für den Anschluss von externen Vakuumeinrichtungen ausgestattet. Die Werkzeuge werden über druckluftbetriebene Füllinjektoren, Druckfüllsysteme oder mit Vakuumunterstützung in geschlossenem Zustand mit der Perlschüttung gefüllt.

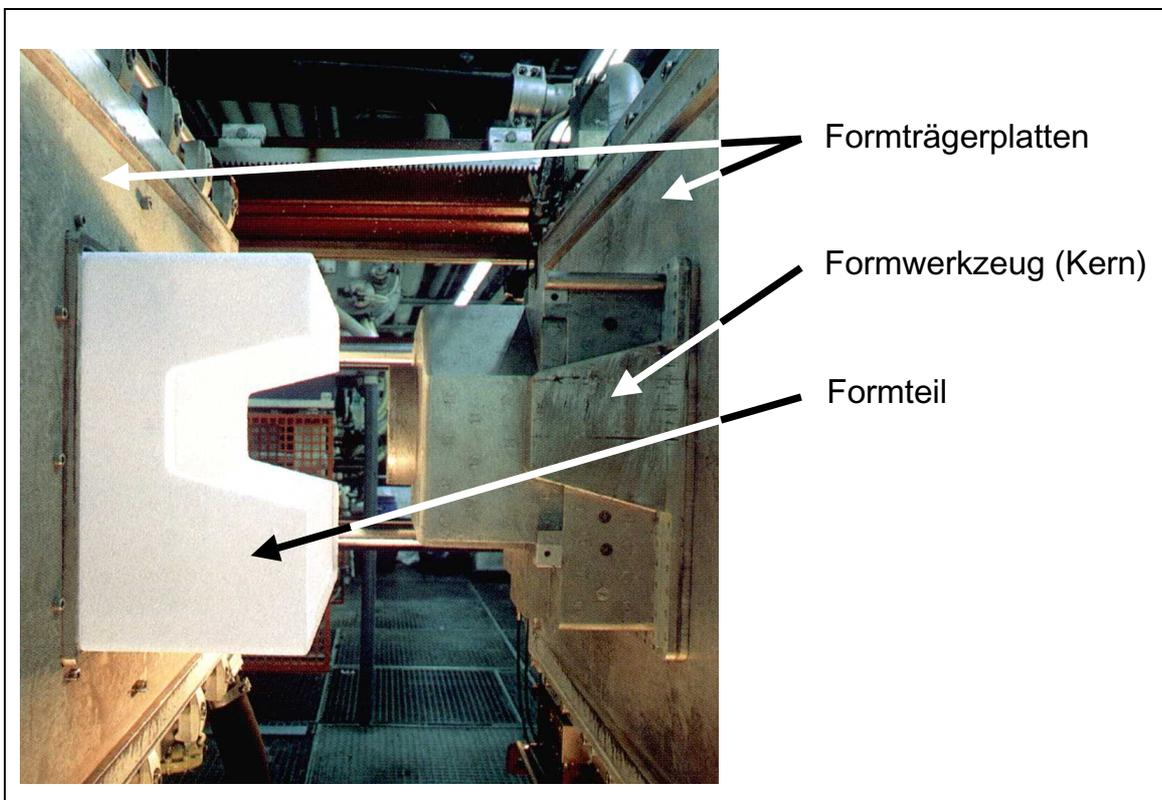


Abb. 12: Geöffneter Formteilautomat /NN90a/

Dabei führt der Formteilautomat beim Ausschäumen folgende Arbeitsschritte durch:

- Schließen des Werkzeuges
- Füllen des Formvolumens mit vorgeschäumten Perlen
- Absaugen und/oder Ausspülen der Luft aus den Dampfkammern

- Ausspülen der Luft aus der Perlschüttung durch Querspülung in wählbarer Richtung
- Druckaufbau in den Dampfkammern bis zum vorgewählten Bedampfungsdruck
- Druckhaltung über einen einstellbaren Zeitraum
- Entspannen des Dampfkammervolumens und Einsprühen einer vorwählbaren Kühlwassermenge gegen die Werkzeugrückwandungen
- Materialdruckabbau durch Anlegen von Vakuum an die Dampfkammern
- Belüften der Dampfkammern
- Lösen der Teile von den Wandungen der Dampfkammern durch Druckluftimpulse
- Öffnen des Werkzeuges und Entnahme der Schaumstoffteile

Vor der Serienfertigung werden Verpackungspolster in Form von Prototypen bzw. Mustern hergestellt. Diese Muster werden zum einen im Rahmen der Angebotsphase zur Vorlage beim Kunden, zum anderen aber auch für labor-technische Überprüfungen sowie zur Herstellung der Serienwerkzeuge verwendet.

Die Entwicklung dieser komplexen Polster wird auch heute noch zum größten Teil in Handarbeit ausgeführt. So werden Polster allein auf Grundlage von 2D-Schnittdarstellungen oder eines haptischen Modells des zu verpackenden Gutes durch „Herausmodellieren“ der Polsterkontur aus einem Schaumstoffblock gewonnen. Die Werkzeuge, die dabei zum Einsatz kommen, sind Bandsäge, Ständerbohrmaschine, heißer Schneiddraht und ein scharfes Messer. In Abb. 13 wird die Erstellung eines Musters aus einem Styroporblock durch Verwendung eines heißen Schneiddrahtes dargestellt.

Die Entwicklung eines Verpackungspolsters von der manuellen Dimensionierung und Fertigung eines Prototypen bis zur manuellen Fertigung einer Gussform zur Herstellung der Serienwerkzeuge durch einen Werkzeugbauer nimmt derzeit im günstigsten Fall zehn bis zwölf Wochen in Anspruch. Bei diesem Entwicklungsverfahren führen Änderungen am Produkt oder am Polster immer zu einer kompletten Neukonstruktion des Verpackungspolsters.

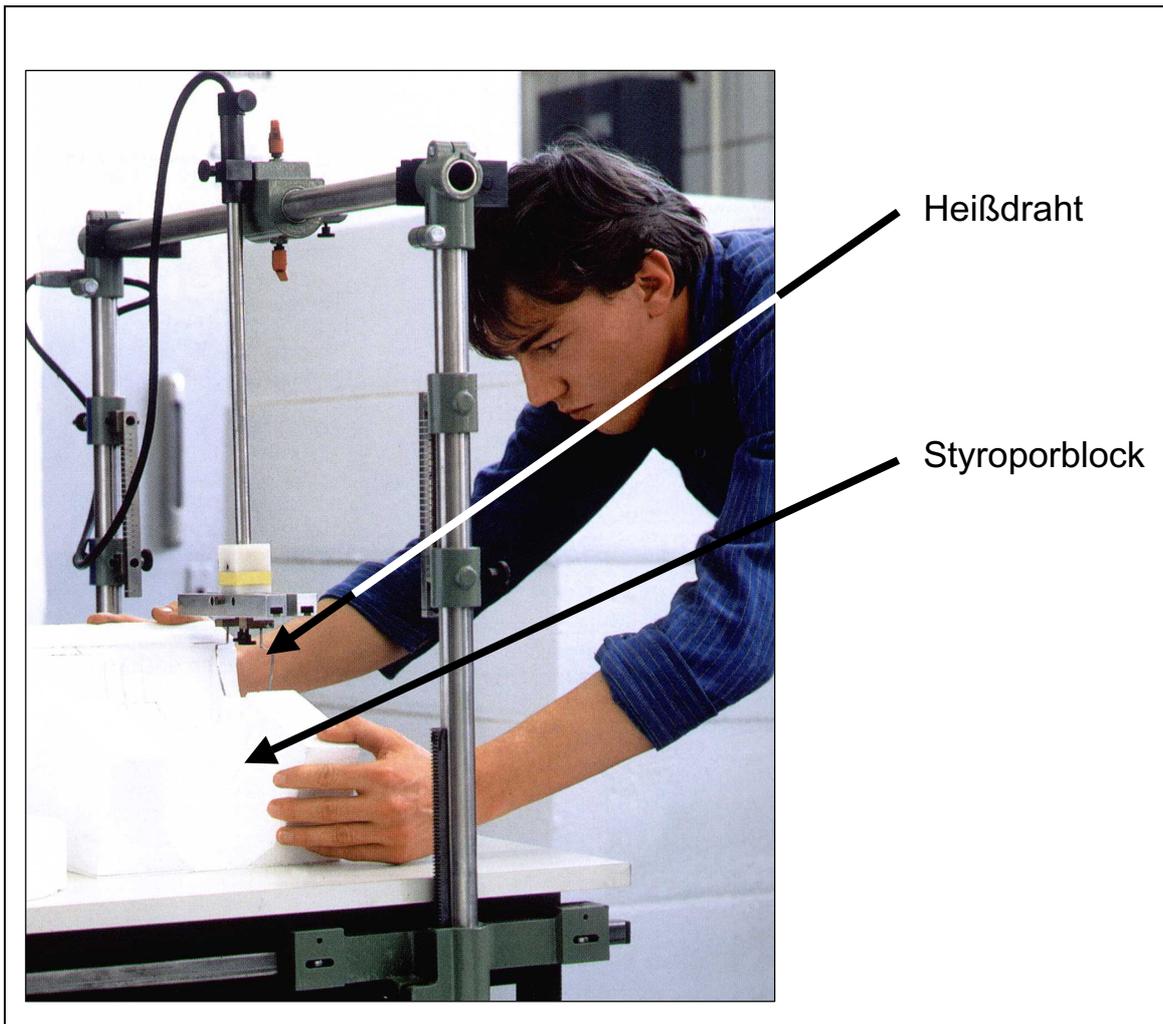


Abb. 13: Prototypenherstellung durch Einsatz eines Heißdrahtes /NN90a/

3.1.4. Transport-, umschlag- und lagerbelastungsbezogene Dimensionierung von Verpackungspolstern

Empfindliche Produkte (beispielsweise Fernseher oder Hifi-Geräte) werden vor mechanischen Belastungen in Form von Stößen und Schwingungen bei Transport-, Umschlag- sowie Lagerungsvorgängen (TUL) durch Verpackungspolster aus Schaumstoff geschützt. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass nur Beschleunigungen in der Höhe auf das zu verpackende Produkt wirken, welche die vorher ermittelten Produktempfindlichkeitswerte nicht überschreiten. Die Minderung der Beschleunigungsamplitude erfolgt durch eine zeitliche Ausdehnung der Stoß- bzw. Energieübertragung. Wesentliche Einflüsse auf die Schutzfunktion der Polster haben die Eigenschaften der Polstermaterialien und die konstruktive Gestaltung der Polster.

Dabei sind sowohl der zeitliche Verlauf als auch die Intensität der Packgutbelastung von der stoßmindernden Polsterwirkung aufgrund von Feder- und Dämpfungseigenschaften des Polstermaterials abhängig. Diese beiden Materialeigenschaften unterscheiden sich in der Art der Umwandlung der aufgenommenen Bewegungsenergie. Bei der federelastischen Energieumwandlung wird die aufgenommene Bewegungsenergie reversibel in Verformungsenergie transferiert, wobei eine Speicherung der absorbierten Energie durch die elastische Verformung des Polsters geschieht und anschließend nach der Energieübertragung des Stoßvorgangs durch die Rückverformung des Polstermaterials freigesetzt wird. Hierbei kann der funktionale Zusammenhang zwischen der Verformung und der einwirkenden Federkraft in Form von Federkennlinien beschrieben werden. Dagegen erfolgt bei der Dämpfung des Polstermaterials eine irreversible Wandlung der absorbierten Energie in plastische Verformung und innere Reibung. Da die Energieumwandlung eine plastische Verformung zur Folge hat, ändert sich das Dämpfungsverhalten nach jedem Stoß. Folglich muss nicht nur die Höhe der Belastungsspitze, sondern auch die Anzahl der Wiederholungen von Belastungszuständen bei der Polsterdimensionierung berücksichtigt werden.

3.1.4.1. Dimensionierung einfacher Verpackungspolster

Zur Dimensionierung von einfachen Polstern sind die zwei bekanntesten theoretischen Modelle zu nennen:

- das ideale Polster und
- die ideale Feder

Bei beiden Polstermodellen werden Fallvorgänge aus einer Höhe h betrachtet, von der ein Packgut der Masse m mit einem Polster der Dicke d fällt. Dabei wird die Höhe von der Unterseiten des Polsters zu dem Falluntergrund gemessen. Es wird die potentielle Energie gleich der Deformationsenergie gesetzt. Hierbei setzt sich die potentielle Energie aus dem Produkt von Gewichtskraft und Fallweg bzw. Fallhöhe zusammen. Die Prinzipskizze des physikalischen Modells wird in Abb. 14 dargestellt.

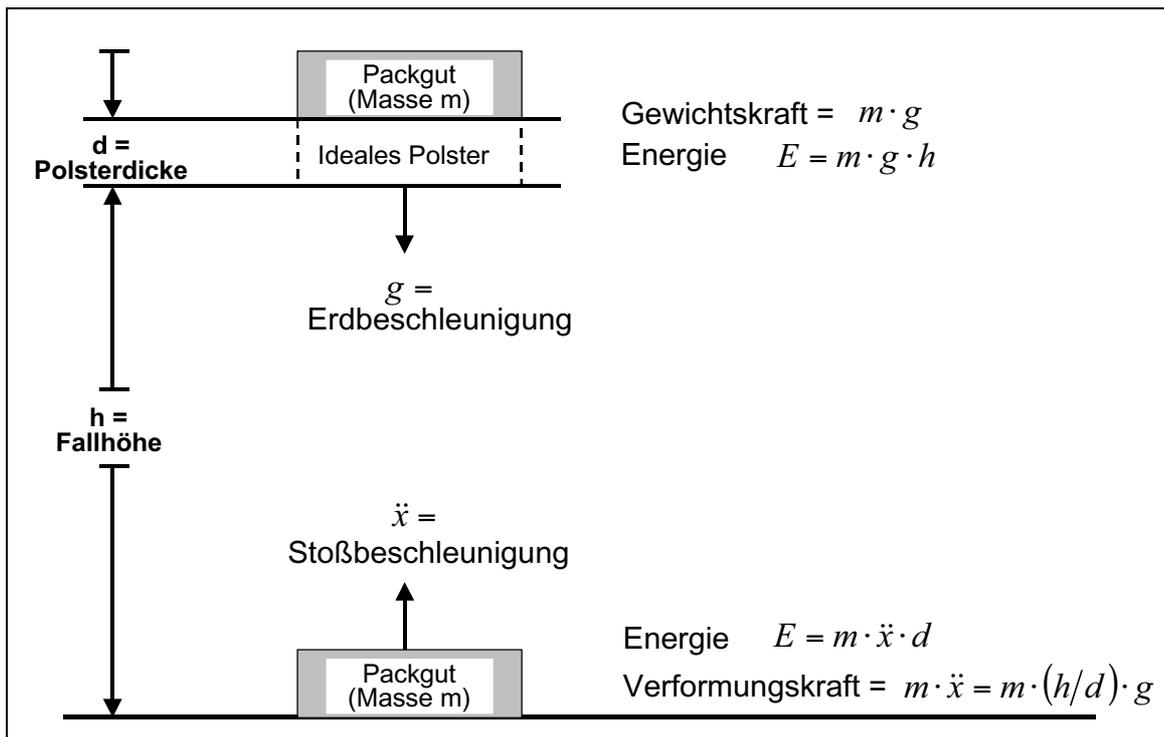


Abb. 14: Prinzipskizze des physikalischen Modells zur Dimensionierung eines Verpackungspolsters /NN90a/

Beim Fallbeginn zum Zeitpunkt $t=0$ wird angenommen, dass das Polster aus der Ruhelage (Anfangsgeschwindigkeit = 0) aus der Höhe h fällt.

Daher liegt zum Zeitpunkt $t=0$ nur die potentielle Energie E_1 in der Höhe von

$$E_1 = F_G \cdot h \quad (3-1)$$

mit F_G = Gewichtskraft und

h = Fallhöhe

vor.

Dagegen wird die Deformationsenergie als Produkt von Stoßkraft und Deformationsweg angesetzt:

$$E_2 = F_S \cdot d \quad (3-2)$$

mit F_S = Stoßkraft und

d = Polsterverformung/Deformationsweg.

Aufgrund der Energieerhaltung können diese Energien gleichgesetzt werden, so dass sich die nachstehende Gleichung ergibt

$$F_G \cdot h = F_S \cdot d. \quad (3-3)$$

Da die Gewichtskraft mit der Gleichung $F_G = m \cdot g$ und die Stoßkraft mit der Gleichung $F_S = m \cdot \ddot{x}$ beschrieben werden, kann Gleichung (3-3) wie folgt umgeschrieben werden:

$$m \cdot g \cdot h = m \cdot \ddot{x} \cdot d. \quad (3-4)$$

mit:

m = Masse des Packgutes,

g = Erdbeschleunigung,

h = Fallhöhe,

x = Koordinate der Polsterverformung,

\ddot{x} = Packgutbeschleunigung im Verlauf der Stoßübertragung und

d = Polsterverformung.

Diese Gleichung (3-4) kann wiederum wie folgt umgestellt werden:

$$\frac{\ddot{x}}{g} = \frac{h}{d}, \quad (3-5)$$

mit:

g = Erdbeschleunigung,

h = Fallhöhe,

\ddot{x} = Packgutbeschleunigung im Verlauf der Stoßübertragung und

d = Polsterverformung,

so dass anhand des Wegverhältnisses der Beschleunigungswert, der sogenannte G-Wert, abgelesen werden kann. Der G-Wert wird auch als Stoßfaktor bezeichnet und gibt den Faktor der Kraftänderung am Packgut gegenüber der

Ruhelage ($m \cdot g$) an. Die maximale auf das Packgut einwirkende Kraft beträgt also

$$F_{\max} = \frac{h}{d} \cdot m \cdot g = (G - Wert) \cdot m \cdot g \quad (3-6)$$

mit:

m = Masse des Packgutes,

g = Erdbeschleunigung,

h = Fallhöhe und

d = Polsterverformung.

Der so ermittelte G-Wert beruht auf den Annahmen, dass

- sich das Polster ganz zusammendrücken lässt,
- die Stoßkraft und damit die Beschleunigung während der Polsterdeformation konstant bleibt und
- sich das Packgut nach der Polsterverformung in der Ruhelage befindet.

Wenn diese Bedingungen erfüllt sind, wird der Fall eines idealen Polsters betrachtet. Da diese Annahmen in der Realität im allgemeinen nicht erfüllt sind, wird in einem weiteren Schritt der Anpassung des Polsterverhaltens an die Realität die theoretische Modellierung des Verformungsverhaltens eines Polsters mit dem Verhalten einer idealen Feder beschrieben. Da die Verformungsenergie nun mit der Energieaufnahme einer Feder

$$E_2 = \frac{1}{2} \cdot F_s \cdot d \quad (3-7)$$

verglichen wird, hat dies im Vergleich zum idealen Polster eine linear ansteigende Energieübertragung zur Folge. Somit wird bei 50 %-iger Polsterverformung nur 25 % der Fallenergie übertragen und umgeformt. Daher beträgt dieser G-Wert das Doppelte von dem G-Wert eines idealen Polsters. Deshalb

beträgt bei diesem theoretischen Modell die maximale auf das Packgut einwirkende Kraft nur

$$F_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{d} \cdot m \cdot g \quad (3-8)$$

mit:

m = Masse des Packgutes,

g = Erdbeschleunigung,

h = Fallhöhe und

d = Polsterverformung.

Folglich wirkt eine doppelt so hohe Maximalkraft, wie bei einem idealen Polster.

In der Realität zeigen untersuchte Polster ein von den idealisierten Modellen abweichendes Übertragungsverhalten. Bei den realen Polstern ist die auf das Packgut wirkende Belastung in Form von Beschleunigungen nicht nur von dem Verformungsweg, sondern auch von der Verformungsgeschwindigkeit des Polsters abhängig. Die in Verformungsarbeit umgewandelte Stoßenergie entspricht der Summe infinitesimaler Arbeitsanteile entlang des Verformungsweges und berechnet sich unter Vernachlässigung dissipativer Energieanteile (beispielsweise Wärmeentwicklung) aus der Änderung der kinetischen Packgutenergie im Verlaufe der Stoßübertragung. Folglich kann die Verformungsenergie bei einem realen Polster bei Fallvorgängen mit der nachstehenden Gleichung beschrieben werden /HEI96/:

$$m \cdot g \cdot h = m \cdot \int_0^d \ddot{x}(\dot{x}, x) dx \quad (3-9)$$

mit:

m = Masse des Packgutes,

g = Erdbeschleunigung,

h = Fallhöhe,

x = Koordinate der Polsterverformung,

\ddot{x} = Packgutbeschleunigung im Verlauf der Stoßübertragung,

\dot{x} = Packgutgeschwindigkeit im Verlauf der Stoßübertragung und

d = Polsterverformung.

Da auf Basis dieses Integrals eine Dimensionierung der Verpackungspolster aufgrund der fehlenden Kenntnis der genauen funktionalen Zusammenhänge nicht möglich ist, werden in der Praxis reale Fallvorgänge zur Auslegung herangezogen.

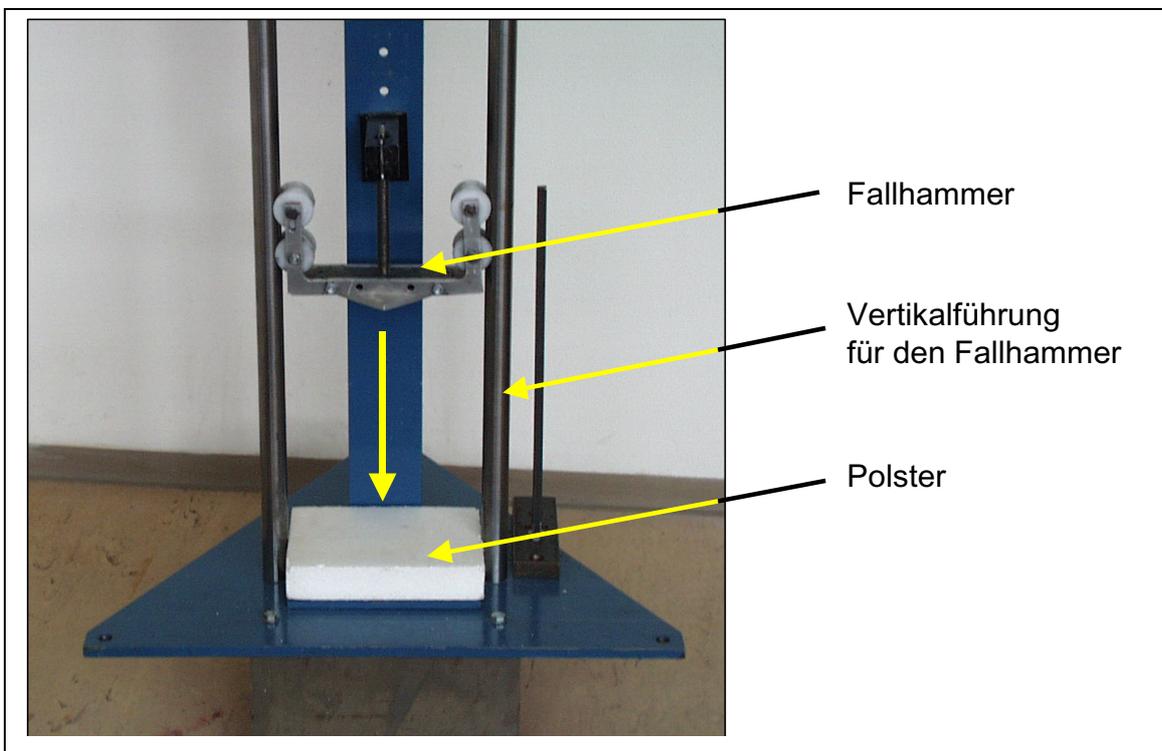


Abb. 15: Fallhammer zur Aufstellung verzögerungsstatischer Flächenbelastungs-Diagramme

Aus diesem Grund wurden in der Vergangenheit in umfangreichen Laboruntersuchungen standardisierte Fallhammerversuche durchgeführt, um Aussagen über das Energieabsorptionsverhalten einzelner Polstermaterialien treffen zu können. Bei diesen Versuchen fällt eine definierte Masse flächig auf ein Polster mit quaderförmiger Geometrie. Dabei werden entweder mit piezoelektronischen

oder induktiven Beschleunigungsaufnehmern die Beschleunigungswerte beim Aufprall auf das Polster aufgenommen (s. Abb. 15).

Die messtechnisch erfassten Ergebnisse wurden einer statistischen Auswertung unterzogen. Hierbei wurden durch Variation der Parameter Masse des Fallhammers, Polsterdicke und Fallhöhe die statischen Flächenbelastungen den gemessenen Beschleunigungsamplituden zugeordnet und als polsterspezifische Kurvenscharen festgehalten. Die sich daraus ergebenden Diagramme werden als verzögerungsstatische Flächenbelastungs-Diagramme oder umgangssprachlich als „Polsterkurven“ bezeichnet.

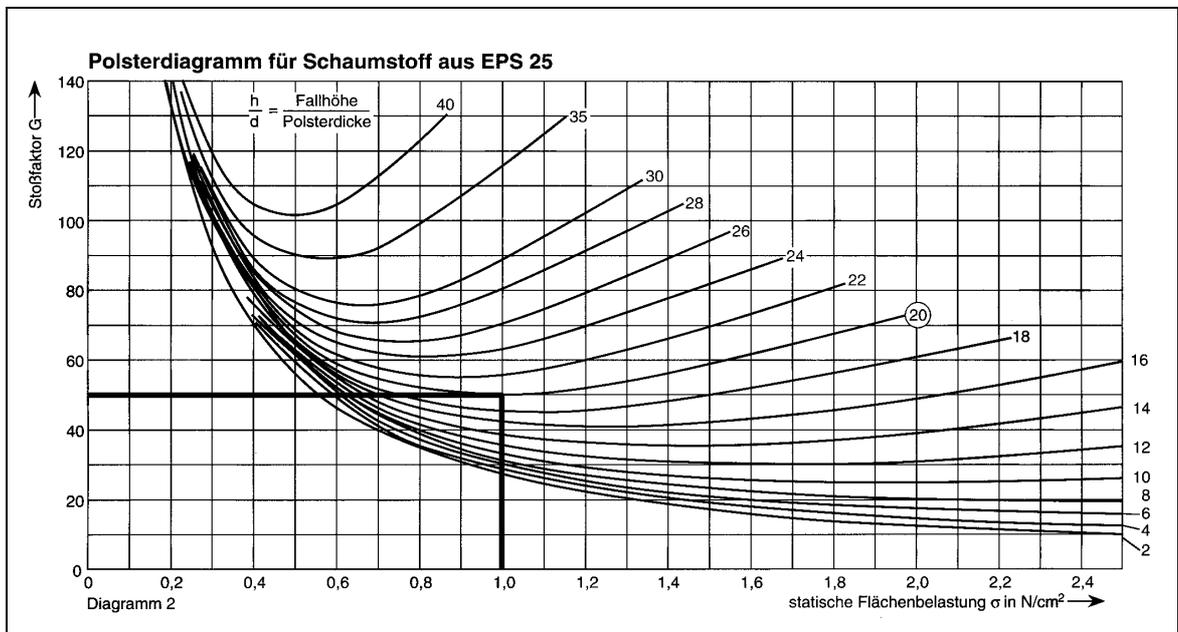


Abb. 16: h/d Polsterdiagramm für EPS 25 /Din85/

In diesen Diagrammen werden die Beschleunigungsamplituden in Abhängigkeit von statischen Flächenlasten dargestellt. Jede Kurve dieser Schar entspricht folglich dem Verhältnis aus Fallhöhe und Polsterdicke. Abb. 16 zeigt ein verzögerungsstatisches Flächenbelastungs-Diagramm für EPS 25.

Auf der Grundlage der Polsterkurven können bei bekannter quaderförmiger Formgebung und symmetrischer Schwerpunktlage eines idealisierten Pack-

gutes die grundlegenden Konstruktionsdaten eines Polstermittels in Abhängigkeit der durch die Fallhöhe h beschriebenen Stoßbelastung ermittelt werden.

Zur Bestimmung der Konstruktionsmerkmale bei der Polsterdimensionierung sind die Polsterdicke und die Polsterauflagefläche entscheidend. Die Werte dieser Parameter werden über die dem Funktionswert der Stoßempfindlichkeit zugehörigen Variablenwerte der statischen Flächenbelastung für unterschiedliche h/d -Verhältnisse bestimmt. Dabei werden folgende funktionale Zusammenhänge zugrunde gelegt:

$$d = h \cdot \left(\frac{h}{d} \right)^{-1} \quad (3-10)$$

$$A_{\text{erf.}}(d) = \frac{m \cdot g}{\sigma_{\text{stat.}}(d)} \quad (3-11)$$

mit:

d = Polsterdicke,

h = Fallhöhe,

m = Masse des Packgutes,

g = Erdbeschleunigung,

$A_{\text{erf.}}(d)$ = erforderliche Polsterauflagefläche und

$\sigma_{\text{stat.}}(d)$ = statische Flächenlast.

Bei Anwendung der Polsterkurven muss berücksichtigt werden, dass im Hinblick auf die effiziente Nutzung von Transport-, Umschlag- und Lagerräumen im Rahmen der Warendistribution insbesondere Polsterlösungen mit verminderten Abmessungen der Polsterdicke industrielle Verwendung finden. Die Wahl der polstermittelspezifischen Arbeitspunkte innerhalb des verzögerungsstatischen Flächenbelastungs-Diagramms konzentriert sich somit auf Kennlinien mit maximalen h/d -Verhältnissen, wobei die Polsterlösung mit minimaler Polsterdicke an dieser Stelle durch diejenige Kennlinie bestimmt ist, deren Funktionswert im Minimum unmittelbar der zulässigen Stoßempfindlichkeit des Packgutes ent-

spricht. Zur Verdeutlichung der Dimensionierung einfacher Polster unter Zuhilfenahme von verzögerungsstatischen Flächenbelastungs-Diagrammen wird in dem nachfolgenden Beispiel ein Polster aus EPS 25 dimensioniert.

Beispiel 3-1: Stoßdämpfende Verpackung aus EPS 25

Gegeben:

| | |
|------------------------------------|---------------------|
| Masse des Packgutes: | $m = 22 \text{ kg}$ |
| Stoßempfindlichkeit des Packgutes: | $G = 50$ |
| kritische Fallhöhe: | $h = 0,8 \text{ m}$ |

Gesucht:

| | |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Polsterdicke: | $d = ?$ |
| erforderliche Polsterauflagefläche: | $A_{\text{erf.}} = ?$ |

Berechnung:

Aus Abb. 16 ist zu entnehmen, dass der Funktionswert im Minimum der Kennlinie $h/d = 20$ unmittelbar der zulässigen Stoßempfindlichkeit des Packgutes von $G = 50$ entspricht.

Daraus ergibt sich:

$$\frac{h}{d} = 20$$
$$\sigma_{\text{stat.}} = 1,0 \text{ N/cm}^2$$

Aus Gl. 3-10 und Gl. 3-11 ergibt sich:

$$d = 4,5 \text{ cm}$$
$$A_{\text{erf.}} = 215,82 \text{ cm}^2$$

Eine weitere Möglichkeit die Materialeigenschaften der Polstermaterialien darzustellen, ist die Darstellung der Eigenschaften der Polstermaterialien über den C-Wert in Abhängigkeit von dem spezifischen Stoßenergieaufnahmevermögen e .

Der C-Wert beschreibt das Verhältnis zwischen dem experimentell ermittelten und dem theoretischen G-Wert für vorgegebene Werte für die Dicke eines Polsters und einer Höhe. Folglich gibt der C-Wert an, um das Wievielfache die Polsterdicke eines realen Polsters größer als die des idealen Polsters sein muss, um die gleichen G-Werte (Packgutbelastungen) zu erhalten. Der G-Wert nimmt bei einem idealen Polster den Wert „1“ an. Wenn der C-Wert bei dem Polstermodell der idealen Feder ermittelt wird, so ist festzustellen, dass der C-Wert den doppelten Wert im Vergleich zum idealen Polster annimmt.

Im Gegensatz zum idealen Polster ändern reale Polsterstoffe ihre Stoßdämpfungseigenschaften mit der Größe der Polsterbelastung. Zu jedem C-Wert muss deshalb auch die dazugehörige Polsterbelastung genannt werden. Als Kennwert hierfür wurde die spezifische Fallenergie festgelegt:

$$e = \frac{\text{Fallenergie}}{\text{Polstervolumen}} = \frac{(m \cdot g) \cdot h}{l \cdot b \cdot d} \quad (3-12)$$

mit:

- d = Polsterdicke,
- l = Polsterlänge,
- b = Polsterbreite,
- h = Fallhöhe,
- m = Masse des Packgutes und
- g = Erdbeschleunigung.

Folglich gibt der e-Wert an, mit welcher Fallenergie ein Polster belastet werden muss, um die zugehörigen Dämpfungseigenschaften (C-Wert) zu erhalten. In Abb. 17 werden Wertepaare der C- und e-Werte von einigen oft in der Praxis eingesetzten Polstermaterialien dargestellt.

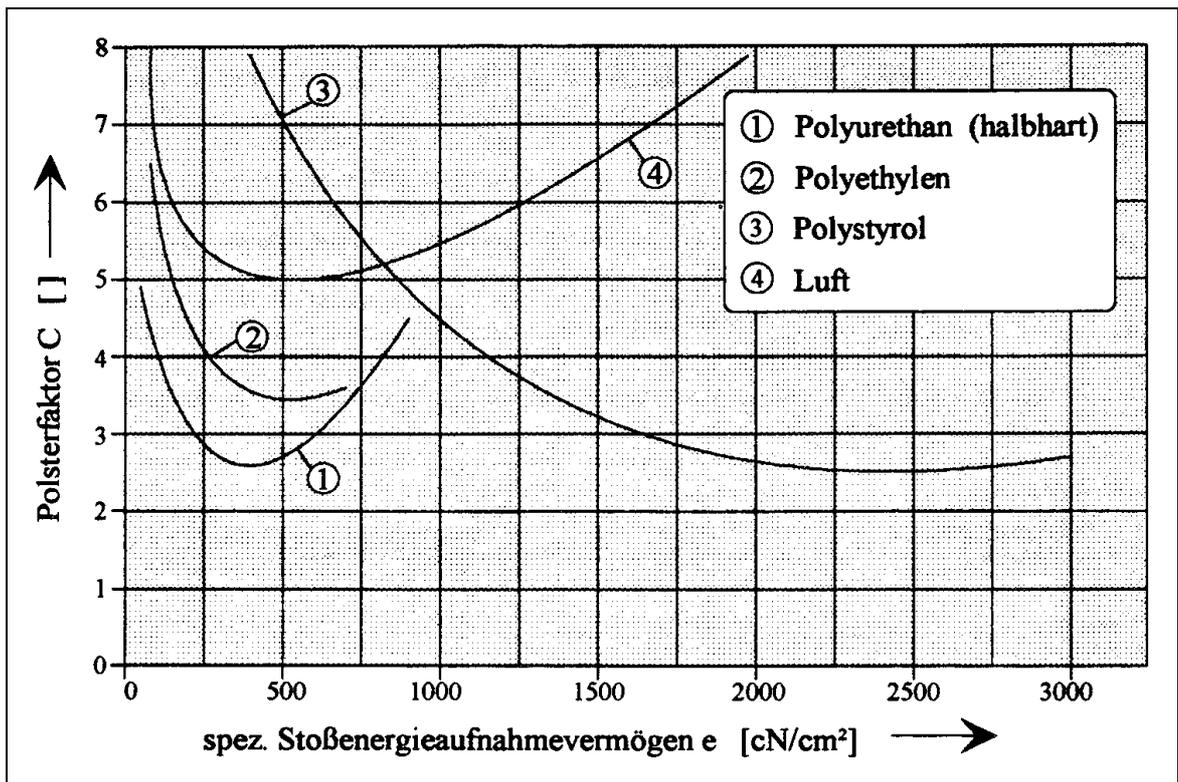


Abb. 17: C-e-Diagramm verschiedener Polstermaterialien /Pra80/

Von diesen C-e-Wertkurven werden zur Auswahl des geeigneten Polstermaterials die Minima dieser Kurven herangezogen. Somit unterliegt die Entscheidungsfindung vornehmlich einer Betrachtung der mit $C_i^*(e_i^*)$ beschriebenen Mindestwerte der spezifischen Polsterfaktoren $C_i(e_i)$. Die labortechnisch ermittelten C^* -Werte und das spezifische Stoßenergieaufnahmevermögen e^* von Polsterstoffen werden in Tab. 3 aufgelistet.

Tab. 3: *Kenndaten verschiedener Polsterstoffe /NN90b/*

| Material Substanz | Rohdichte RD kg/m ³ | Polsterfaktor C* - | Spez. Arbeitsauf- nahmevermögen e* cN cm / cm ³ |
|---|--------------------------------------|--------------------------|---|
| PE-Schaumstoff | 30 | 3,5 | 500 |
| PUR-weich (Polyether)Schaum- stoff | 30 | 3,1 | 125 |
| PUR-weich (Polyester)Schaum- stoff | 30 | 3,3 | 200 |
| PUR-halbhart Schaumstoff | 30 | 2,8 | 350 |
| Schaumstoff aus Styropor | 30 | 2,2 | 2400 |
| Schüttbare Polster- materialien aus PS- Schaumstoff | 8 | 4 | 400 |
| Schaumgummi | 200 | 4,3 | 350 |
| Kokosfaser, gummiert | 80 | 3,8 | 70 |
| Wellpappe 1-wellig, A-Welle | 800 g/m ² | 2,4 | 530 |
| Wellpappe 2-wellig, A- u. B- Welle | 1050 g/m ² | 2,6 | 800 |
| Luft, 1bar | 1,29 | 5,11 | 650 |

Abb. 18 und Abb. 19 verdeutlichen die Abhängigkeit der Werte C^* und e^* von der Rohdichte des Polsterstoffes für Polystyrol-Schaumstoff (EPS).

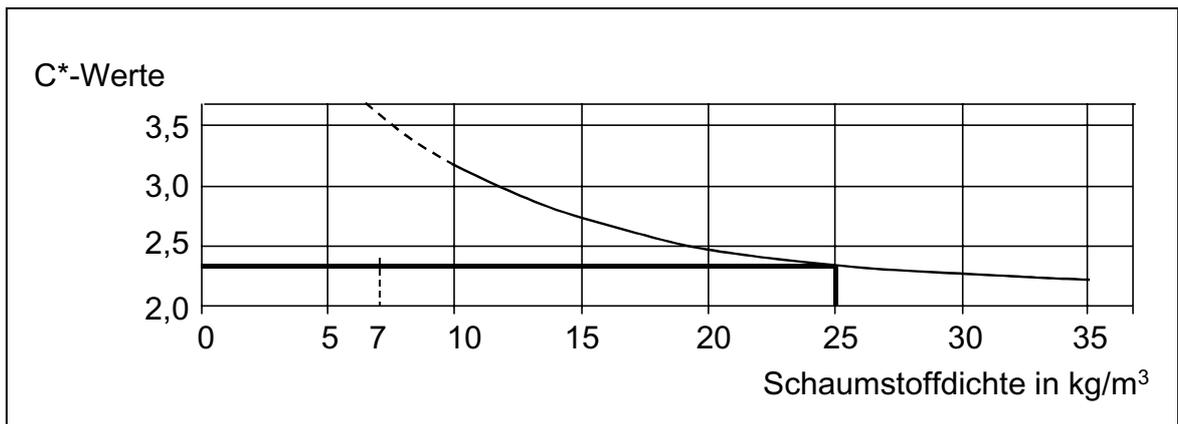


Abb. 18: Einfluss der Rohdichte von Schaumstoffen aus Styropor auf die C*-Werte /NN90b/

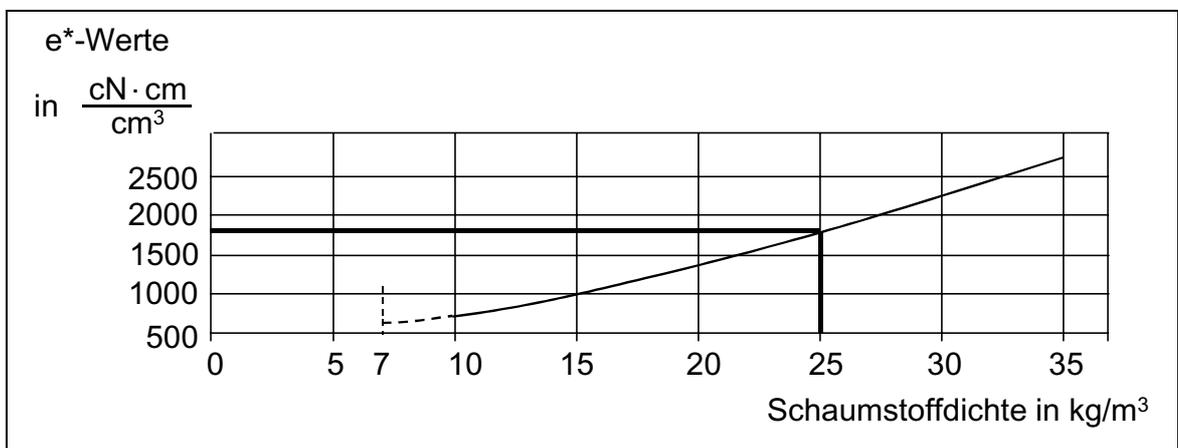


Abb. 19: Einfluss der Rohdichte von Schaumstoffen aus Styropor auf die e*-Werte /NN90b/

Zur Verdeutlichung der Handhabung von Abb. 18 in Bezug auf die Dimensionierung von Verpackungspolstern aus expandiertem Polystyrol wird Beispiel 3-1 erneut aufgegriffen:

Beispiel 3-2: Stoßdämpfende Verpackung aus EPS 25

Gegeben:

| | |
|------------------------------------|---------------------|
| Masse des Packgutes: | $m = 22 \text{ kg}$ |
| Stoßempfindlichkeit des Packgutes: | $G = 50$ |
| kritische Fallhöhe: | $h = 0,8 \text{ m}$ |

Gesucht:

Polsterdicke: $d = ?$

erforderliche Polsterauflagefläche: $A_{erf.} = ?$

Berechnung:

Aus Abb. 18 und Abb. 19 können für $RD = 25$ g/l folgende Werte abgelesen werden:

$$e^* = 1800 \frac{cN \cdot cm}{cm^3}$$

$$C^* = 2,35$$

Aus Gl. (3-10) ergibt sich:

$$d = \frac{h \cdot C^*}{G} = 4,21 \text{ cm}$$

$$\sigma_{stat.} = \frac{e^* \cdot d}{h} = 84,24 \frac{cN \cdot cm}{cm^3}$$

Mit Gl. 3-11 folgt:

$$A_{erf.} = 256 \text{ cm}^2$$

Der Vergleich der Ergebnisse aus Beispiel 3-1 und Beispiel 3-2 zeigt deutlich die gesteigerte Fehleranfälligkeit in Bezug auf Ableseungenauigkeiten und das Näherungsverfahren an sich. Es muss noch einmal deutlich darauf hingewiesen werden, dass Abb. 18 lediglich die Minima der verzögerungsstatischen Flächenbelastungs-Diagramme nach Abb. 16, S. 47 und somit nur die optimalen Lösungen zur Dimensionierung von Verpackungspolstern approximiert.

Neben den Polsterdiagrammen gibt es auch einfach handhabbare Dimensionsrechner ähnlich der Rechenschieber zum Ermitteln der optimalen Werte für Polsterdicke und -fläche. Grundlagen für den Dimensionsrechner sind jedoch nur die Kurvenminima der Polsterdiagramme.

3.1.4.2. Dimensionierung komplexer Verpackungspolster

Auf Basis der zuvor beschriebenen Berechnungsverfahren lassen sich die für die Dimensionierung eines Verpackungspolsters relevanten Größen Polsterdicke d und erforderliche Auflagefläche $A_{erf.}$ ermitteln. In der industriellen Praxis zeigt sich jedoch, dass die erforderliche Auflagefläche $A_{erf.}$ vielfach kleiner ist, als die am Packgut zur Verfügung stehende Verpackungsauflagefläche, weshalb in der Regel die erforderliche Auflagefläche auf Rippen- und Noppenkonstruktionen aufgeteilt wird. Die in der Industrie eingesetzten Verpackungspolster sind häufig von sehr komplexer Natur. Abb. 20 zeigt komplexe Verpackungspolster für EDV-Produkte.

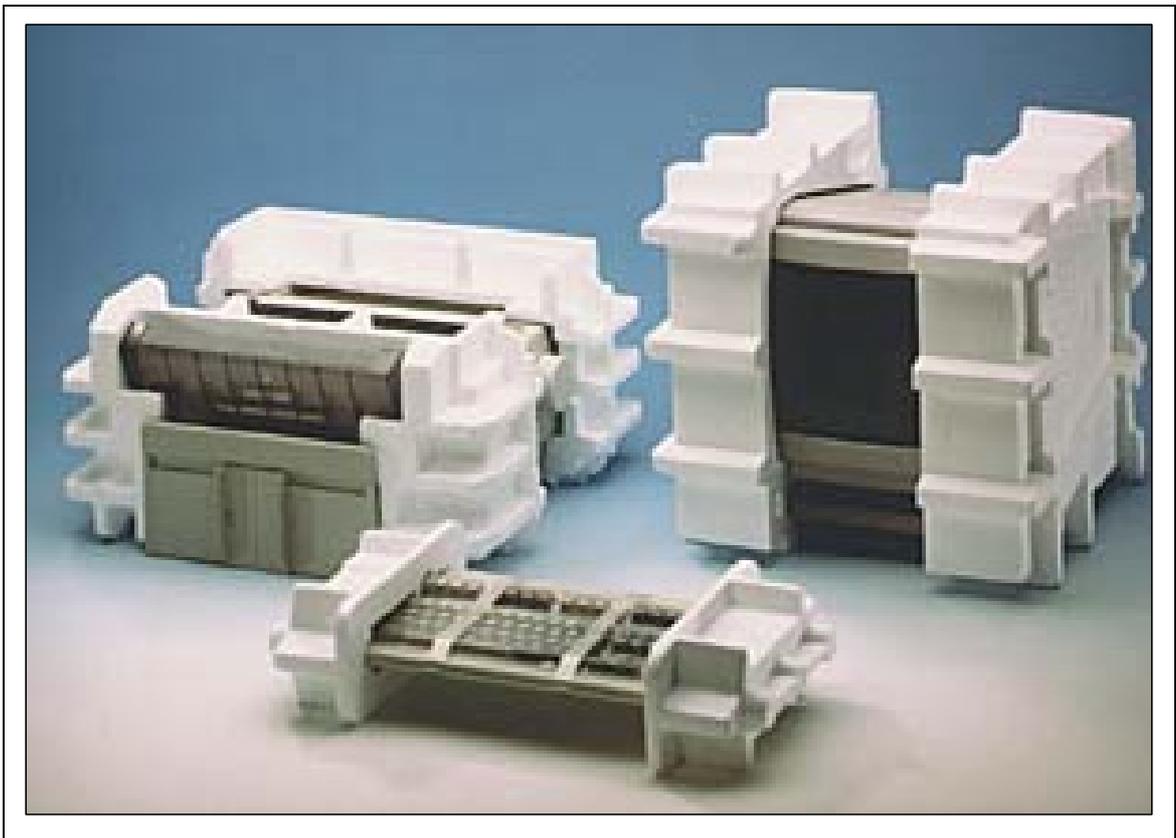


Abb. 20: Komplexe formgeschäumte Verpackungspolster

Die nicht-kubische Formgebung von Rippen- und Noppenkonstruktionen wird bei der Dimensionierung in Form von durch labortechnische Überprüfungen

verifizierte Formfaktoren und Zuschläge auf die Berechnungsgrundlagen
 Polsterdicke d und erforderliche Auflagefläche A_{erf} berücksichtigt.

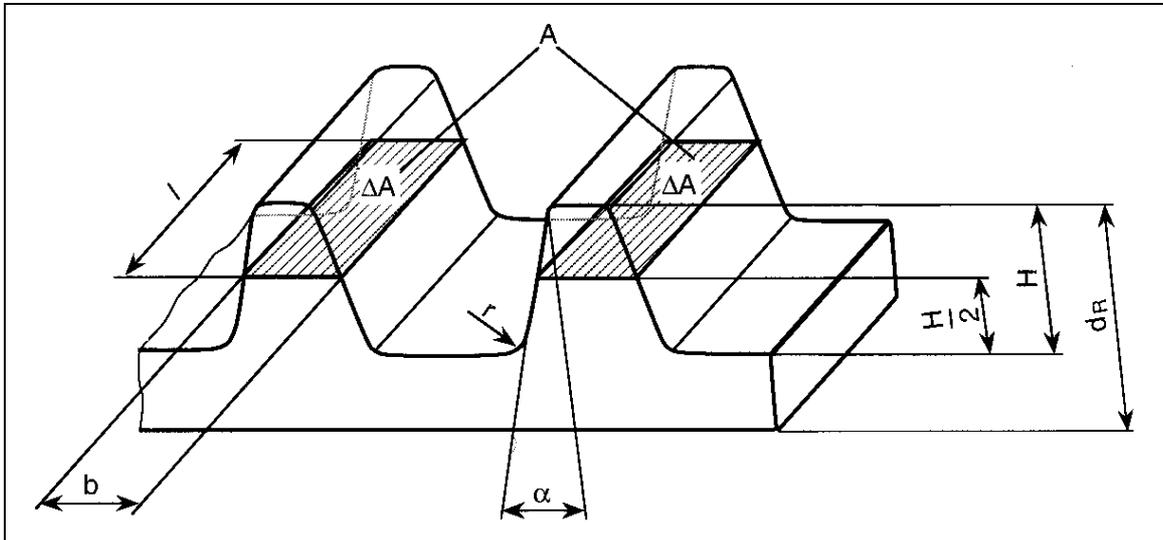


Abb. 21: Schematische Darstellung einer Polsterrippe /NN92/

Zunächst erfolgt die Bestimmung der Polsterdicke d wie in Kapitel 3.1.4.1, Seite 41 vorgestellt, wobei als Dimensionierungsgrundlage aufgrund der maximal erzielbaren Genauigkeit verzögerungsstatische Flächenbelastungs-Diagramme nach Abb. 16, Seite 47 empfohlen werden. Die sich aus den Diagrammen ergebende Polsterdicke wird zur Berücksichtigung der nicht-kubischen Formgebung mit einem Formfaktor beaufschlagt. Für Polystyrol-Schaumstoffe hat sich aus Praxiserfahrungen ein Aufschlag von 10 % auf die berechnete Polsterdicke bewährt (vgl. /Din85/). Die Polsterdicke d_R einer Rippenkonstruktion berechnet sich demzufolge zu:

$$d_R = 1,1 \cdot d \quad (3-13)$$

mit:

d_R = Polsterdicke für Rippenkonstruktionen

d = Polsterdicke für Plattenpolster

Die Höhe der eigentlichen Rippe H wird aus der Praxiserfahrung heraus mit 50 % -65 % der berechneten Polsterdicke d_R angegeben /Din85/:

$$H = 0,5 \cdot d_R \dots\dots 0,65 \cdot d_R \quad (3-14)$$

mit:

d_R = Polsterdicke für Rippenkonstruktionen

H = Rippenhöhe

Die Polsterfläche $A_{erf.}$ wird ebenfalls wie in Kapitel 3.1.4.1, Seite 41 vorgestellt ermittelt, wobei diese auf die gewählte Anzahl der Polsterrippen zu verteilen ist. Es ist in diesem Zusammenhang zu beachten, dass die Polsterfläche einer Rippe sich durch einen Schnitt durch die Rippe auf halber Rippenhöhe ergibt (vgl. Abb. 21).

Der Flankenwinkel einer Rippe wird für Polystyrol-Schaumstoff mit 10° bis 15° empfohlen, wobei in der Praxis selten von einem Winkel von 15° abgewichen wird; Fußradien werden mit $r = 10$ mm empfohlen /NN92/.

Die Wahl der Anzahl der verwendeten Rippen unterliegt zunächst keinerlei Beschränkung und ist in der Regel abhängig von der Konstruktionserfahrung eines Mustermachers. Es muss aber dennoch beachtet werden, dass sich mit zunehmender Anzahl verwendeter Rippen die Fläche pro Rippe verringert, was zu einer statischen Instabilität einer Rippe unter Belastung durch eine Stoßeinwirkung führen kann. Konstruktiv kann dem durch die Überprüfung einer Knickbedingung für Rippenkonstruktionen entgegengewirkt werden:

$$\frac{H}{3} \leq b - \frac{h}{4} \quad \text{mit } b \leq l \quad \text{/NN92/} \quad (3-15)$$

mit:

- H = Rippenhöhe
- b = Breite der Rippenpolsterfläche
- l = Länge der Rippenpolsterfläche
- h = Fallhöhe

Eine detailliertere Betrachtung unter Berücksichtigung einer Abhängigkeit der Knickbedingung von der Rohdichte des Polystyrol-Schaumstoffes wird in /NN90b/ gegeben:

$$\frac{H}{f_{RD}} \leq b - \frac{h}{4} \quad \text{mit } f_{RD} = 2,2 \text{ für } RD = 12 \text{ g/l} \quad (3-16)$$
$$f_{RD} = 2,6 \text{ für } RD = 18 \text{ g/l}$$
$$f_{RD} = 3 \text{ für } RD = 24 \text{ g/l}$$

mit:

- H = Rippenhöhe
- b = Breite der Rippenpolsterfläche
- f_{RD} = Formfaktor abhängig von der Rohdichte RD
- h = Fallhöhe

Die Abhängigkeit des Faktors f_{RD} von der Rohdichte RD kann unter Annahme einer linearen Interpolation auch ausgedrückt werden durch:

$$f_{RD} = 0,06 \cdot RD + 1,4 \quad (3-17)$$

mit:

- RD = Rohdichte
- f_{RD} = Formfaktor abhängig von der Rohdichte RD

Damit ergibt sich Gleichung 3-16 zu:

$$\frac{H}{0,06 \cdot RD + 1,4} \leq b - \frac{h}{4} \quad \text{mit } 12 < RD < 24 \quad (3-18)$$

mit:

- H = Rippenhöhe
- b = Breite der Rippenpolsterfläche
- h = Fallhöhe
- RD = Rohdichte

Wird diese Forderung nicht erfüllt, können durch folgende Maßnahmen Verbesserungen erzielt werden /NN92/:

- Rippenzahl reduzieren
- Rippenquerschnitt mit geringerem Längen-/Breitenverhältnis wählen
- Rippenhöhe auf unteren Grenzwert ($H = 0,5 \cdot d_R$) reduzieren
- Niedrigere Rohdichte RD verwenden
- Mit Verpackungsverwendern prüfen, ob die festgelegten Grenzwerte erhöht (G-Wert) bzw. reduziert (Fallhöhe) werden können.

Problematisch bei der Anwendung der Polsterkurven ist, dass diese Werte anhand von Fallversuchen an Schaumstoffplatten ermittelt wurden und nicht die zum Teil höchst komplexe Gestaltung von Verpackungspolstern mit Rippen, Stegen etc. berücksichtigt. Dem wird in der Praxis in der Weise Rechnung getragen, dass die Verpackungshersteller sich auf die jahrelangen Erfahrungen ihrer Mustermacher verlassen, die entsprechende Zuschläge bei Polsterdicke und -fläche vornehmen. Da nach diesem Auslegungsverfahren nur eine unzureichende, nicht akzeptable Planungssicherheit erzielt werden kann, werden die von Hand modellierten Verpackungspolsterprototypen in der Regel kostspieligen Fallversuchen bspw. nach DIN EN 22 248 /Din93/ unterzogen (vgl. Abb. 22), um feststellen zu können, ob die Polster die von den Kunden gewünschte Schutzfunktion – in der Regel durch den sogenannten G-Wert als Vielfaches der Erdbeschleunigung ausgedrückt – für die Produkte bieten können.

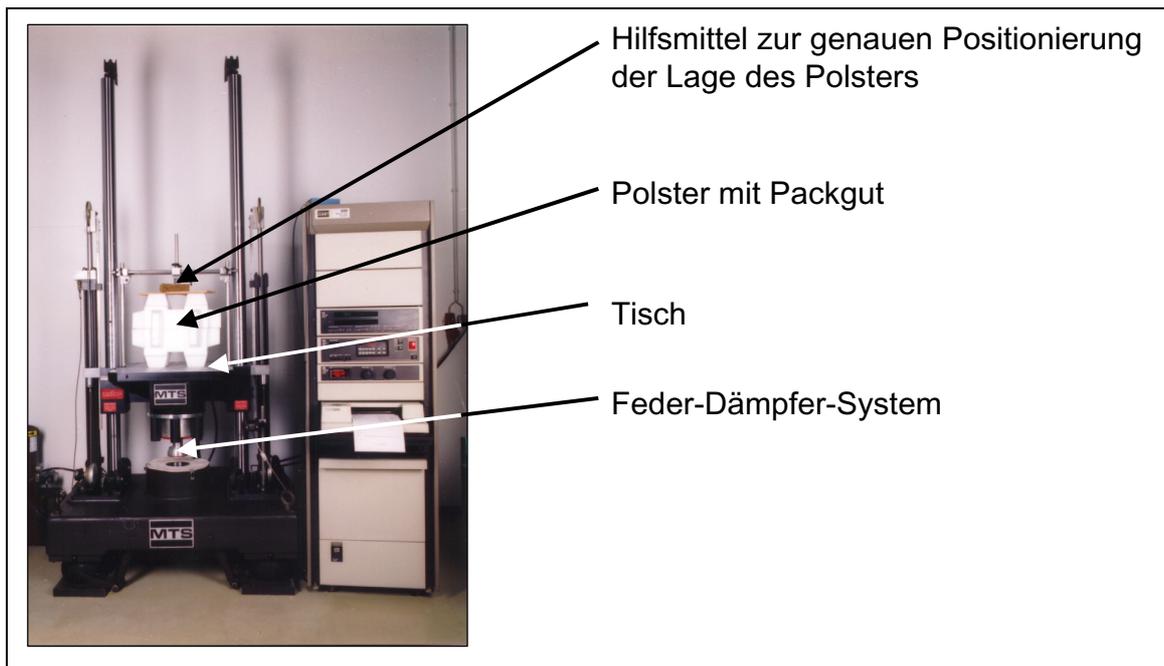


Abb. 22: Versuchseinrichtung zur Durchführung von Fallversuchen /Hir01/

Bei der in Abb. 22 dargestellten Versuchsanlage handelt es sich um einen Schocktester, mit dem Fallversuche gezielt auf kritische Stellen einer Verpackung durchgeführt werden können. Mittels am Produkt applizierter Beschleunigungsaufnehmer können die am Produkt wirkenden Beschleunigungswerte (G-Werte) aufgenommen werden und somit die Schutzwirkung der Polster überprüft werden.

Wenn die Polster die Anforderungen an die Schutzwirkung nicht erfüllen, müssen solange verbesserte Prototypen in Handarbeit neu hergestellt werden, bis eine ausreichende Dimensionierung experimentell nachgewiesen werden kann.

3.2. Flächenrückführung und Reverse-Engineering

Reverse Engineering geometrischer Formen ist eine sich schnell entwickelnde Disziplin. Während beim konventionellen Engineering entwickelte Konzepte und Modelle in reale Teile transformiert werden, werden beim Reverse Engineering real existierende Bauteile wieder in digitale Daten zurückgeführt. Reverse Engineering beginnt in der Regel mit der Vermessung eines existierenden

Objektes, so dass daraus digitale Darstellungen der Oberfläche oder des Volumens abgeleitet werden können. Auf diese Daten können anschließend die Funktionalitäten von CAD/CAM-Technologien angewendet werden, einschließlich der Modifizierung existierender Designs, der Analyse, der Qualitätssicherung, der NC-Fertigung etc.

Es gibt viele Anwendungsfälle für Reverse Engineering. Oftmals ist es notwendig, eine Kopie eines Bauteils herzustellen, wenn keine Originalzeichnungen oder Dokumentationen vorhanden sind. In einem anderen Fall kann die Anwendung darin bestehen, ein existierendes Bauteil zu reverse-engineerieren, um ein neues verbessertes Produkt zu entwickeln. Digitale Modelle basierend auf 1:1 Holz- oder Tonmodellen werden dort benötigt, wo das ästhetische Design von entscheidender Bedeutung ist, wie bspw. in der Automobilindustrie. Ein weiteres Anwendungsfeld liegt in der Vermessung des menschlichen Körpers, um bspw. Helme oder passgenaue Prothesen anzufertigen [Var99].

3.2.1. Sensorsysteme zur 3D-Digitalisierung

Die 3D-Digitalisierung ist die Ausgangsbasis eines Reverse Engineering Prozesses. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieses Kapitels ein Überblick über die Technik der 3D-Digitalisierung gegeben, d. h. über die verschiedenen Technologien, die am Markt verfügbar sind, um ein real existierendes Produkt in eine digitale Darstellungsform zu überführen.

Digitalisierung wird hauptsächlich eingesetzt, um

- die Form eines Objektes (physikalischer Prototyp) digital zu erfassen, um daraus ein CAD-Modell erstellen zu können,
- im Rahmen einer Qualitätskontrolle die digitalisierten Messwerte, die das Sensorsystem liefert, mit einem CAD-Referenzmodell zu vergleichen,
- Informationen für Fertigungsverfahren zu generieren, die es ermöglichen, ein Objekt zu kopieren (CNC-Datensatz zum Fräsen oder ein STL-Datensatz für verschiedene Rapid-Prototyping-Verfahren).

Die numerischen Daten, die aus einer Digitalisierung resultieren, sind in der Regel Punktwolken. Eine Punktwolke ist dabei eine Ansammlung von unabhängigen Messpunkten, die durch ihre kartesischen Koordinaten (x-, y- und z-Wert) im dreidimensionalen Raum bestimmt sind.

Sensorsysteme für die 3D-Digitalisierung können entsprechend der Aufnahmemethode in 3 Gruppen unterteilt werden (s. Abb. 23).

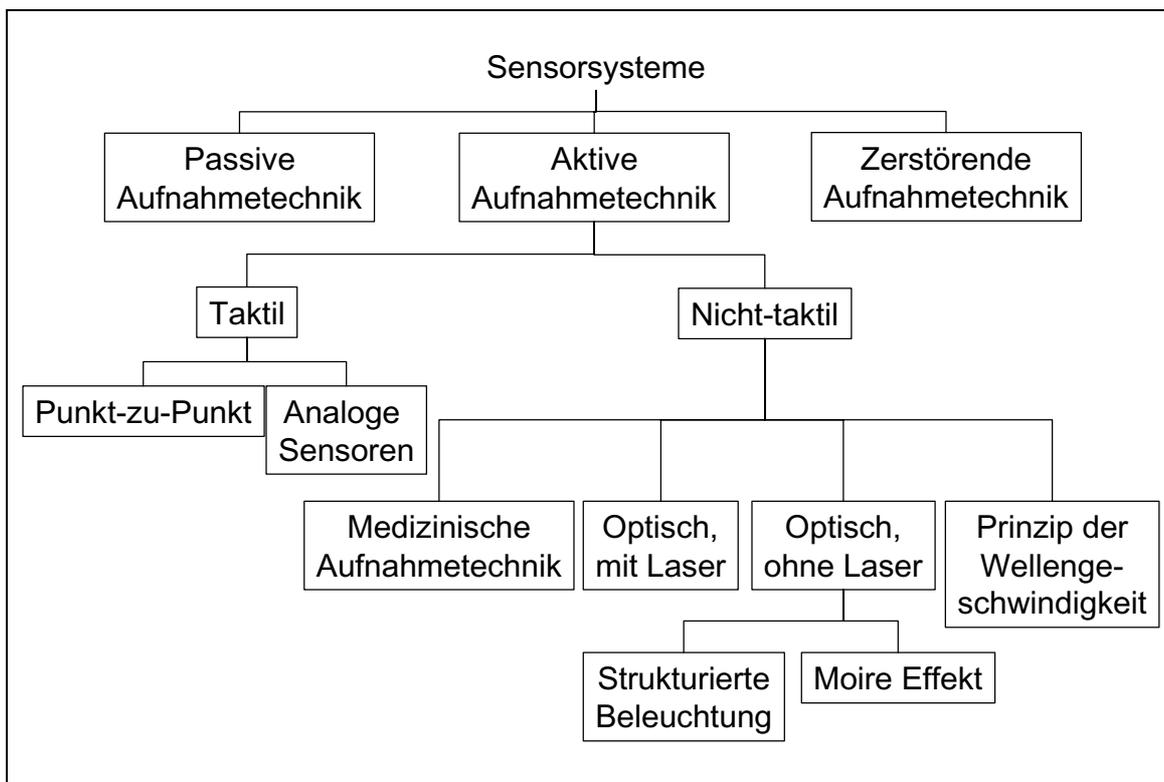


Abb. 23: Verfahren der 3D-Digitalisierung (nach /Ber99/)

3.2.1.1. Passive Aufnahmetechnik

Eine Aufnahmetechnik wird als passiv bezeichnet, wenn der Sensor keinerlei Einfluss auf das zu digitalisierende Objekt oder seine Umgebung ausübt. Derartige Sensorsysteme bestehen in der Regel aus einer oder mehreren Kameras, mit denen Bilder aufgenommen werden. Die Tiefeninformation muss anschließend aus der Analyse der Informationen aus jedem Bild extrahiert werden.

Zu den wohl bekanntesten passiven Aufnahmetechniken gehört die Photogrammetrie oder auch Stereovision genannt. Auf Basis mehrerer Fotografien eines Objektes ist es möglich, die Lage eines Objektes im Raum zu vermessen, wenn die Betrachtungspunkte und –winkel der Fotografien jeweils zueinander bekannt sind.

Kommerziell werden derartige Sensorsysteme oft aus 2 Kameras aufgebaut, deren Position und Winkel zueinander genau bekannt sind. Zu vergleichen ist dieser Aufbau im Zweidimensionalen dann mit einem Dreieck, wo die Länge der Hypothenuse und beide Winkel zwischen Hypothenuse und den Katheten bekannt sind. Aus diesen drei Informationen kann die Höhe eines Dreiecks (= Abstand eines Punktes) berechnet werden.

Die Photogrammetrie wird hauptsächlich für die Vermessung großer Objekte oder großer Distanzen eingesetzt. Eine typische Anwendung stellt die Herstellung topographischer Landkarten dar, die aus Luftaufnahmen berechnet werden. Für weiterführende Informationen wird auf /Ber99/ verwiesen.

3.2.1.2. Aktive Aufnahmetechnik

Entgegen der passiven Aufnahmetechnik interagieren Sensorsysteme, die mit aktiver Aufnahmetechnik arbeiten, mit dem zu digitalisierenden Objekt entweder durch

- physikalischen Kontakt (taktil),
- Emission von – i. d. R. strukturiertem – Licht (nicht-taktil),
- oder Gebrauch elektromagnetischer Wellen (nicht-taktil).

Taktile Sensorsysteme

Die taktilen Sensoren sind die bekanntesten und verbreitetsten Systeme. Zu ihnen gehören die in der Industrie häufig eingesetzten Koordinatenmessmaschinen (CMM). Häufig können auch 3-Achsen-Fräsmaschinen mit einem taktilen Sensor bestückt werden, so dass neben der bearbeitenden Funktion auch Messaufgaben übernommen werden können. Der Sensor besteht häufig aus einem Stab mit einer Kugel als Kontaktkörper (s. Abb. 24, rechts). Es wird jeweils ein Signal ausgelöst, wenn die Kraft, die auf die Kugel bei Kontakt mit

dem Objekt ausgeübt wird, einen bestimmten Wert überschreitet. Die Korrektur um den Radius der Tasterkugel wird oftmals bereits durch die Steuerungssoftware durchgeführt, so dass reale Koordinatenmesswerte ermittelt werden.

Bei den taktilen Sensorsystemen wird zwischen „**Punkt-zu-Punkt**“-Systemen – hier wird jeder Messpunkt separat angefahren – und „**analogen**“ Systemen – hier kann der Sensor automatisch einer Kontur folgen – unterschieden /Ber99/.

Koordinatenmessmaschinen können sowohl für Punkt-zu-Punkt-Betrieb als auch für analogen Betrieb ausgelegt sein. Neben den CMM gibt es „Punkt-zu-Punkt“-Sensoren in Form von handgeführten Messarmen (s. Abb. 24, links), die in sphärischen Volumen Messpunkte erfassen können.

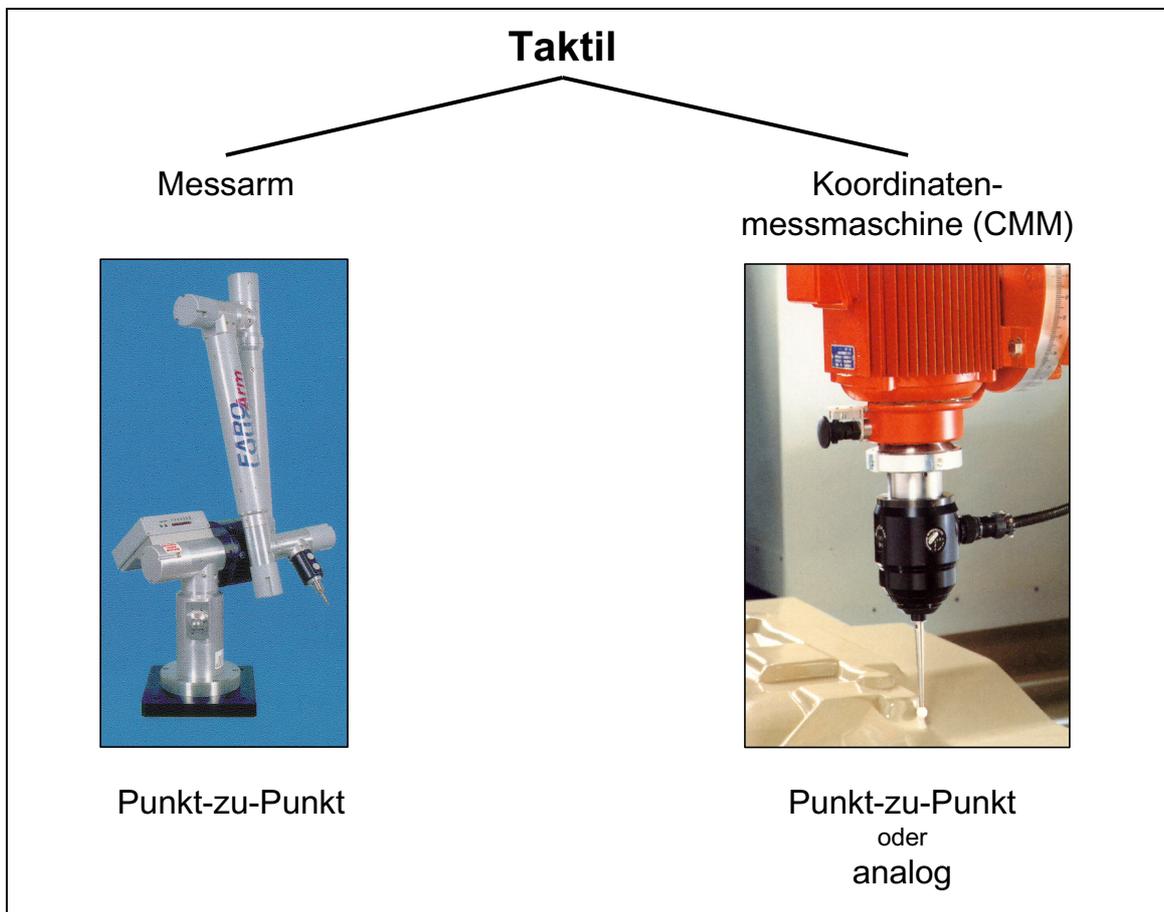


Abb. 24: Taktile Sensorsysteme zur 3D-Digitalisierung

Taktile Sensorsysteme arbeiten mit einer hohen Präzision im Mikrometerbereich /Rod99/. Eine typische Präzisionsspezifizierung einer CMM kann mit 4 μm

in einem Arbeitsbereich von $350 \times 450 \times 550 \text{ mm}^3$ angegeben werden /Bra98/. Die Geschwindigkeit der Digitalisierung liegt bei ca. 10 Messpunkten pro Minute, wenn die Messpunkte manuell angefahren werden bis hin zu ca. 100 Messpunkten pro Minute, wenn die Messpunkte über die Steuerung der CMM angefahren werden. Details, die kleiner als der Radius des Tasters sind, können nicht erfasst werden. Ebenso werden die Messergebnisse verfälscht, wenn das zu vermessende Objekt aus einem weichen bzw. verformbaren Material besteht, da das Objekt bei Kontakt mit dem Taster verformt wird /Ber99/.

Nicht-taktile Sensorsysteme

Nicht-taktile Sensoren können ebenfalls in mehrere Familien untergruppiert werden:

- Basierend auf dem Prinzip der Wellengeschwindigkeit
- Aufbauend auf medizinischen Aufnahmen
- Nutzung optischer Techniken ohne Lasereinsatz
- Nutzung optischer Techniken mit Lasereinsatz

Sensorsysteme basierend auf dem **Prinzip der Wellengeschwindigkeit** arbeiten nach dem Radarprinzip. Sie senden eine Welle aus, deren Geschwindigkeit bekannt ist und messen die Zeit, die benötigt wird, bis diese Welle, reflektiert vom zu vermessenden Objekt, wieder registriert wird. Aus dem Zeitunterschied kann die Entfernung des Objektes bestimmt werden.

Mit diesen Sensorsystemen können weit entfernte und sehr große Objekte vermessen werden (s. auch /Rod99/). Oftmals werden Messziele auf den Objekten positioniert, die vom Sensorsystem erfasst werden. Werden elektromagnetische oder Ultraschallwellen eingesetzt, wird eine Vermessung von Objekten, in deren Nähe sich Gegenstände aus Metall befinden, unmöglich /Ber99/.

Sensorsysteme **basierend auf medizinischen Aufnahmen** sind zunächst für medizinische Anwendungen bekannt, finden ihren Einsatz jedoch auch zunehmend in der Industrie. Zu den Verfahren gehört:

- die Echografie, bei der Ultraschall zur Herstellung von Schnitten durch ein Bauteil eingesetzt wird,
- die nuklear magnetische Resonanz, bei der ein magnetisches Feld zur Herstellung von Schnitten durch ein Bauteil eingesetzt wird,
- und die Tomografie mit Röntgenstrahlen. Bei diesem Verfahren wird die Menge an Röntgenstrahlung gemessen, die vom Bauteil nicht absorbiert wird.

Mit diesen Verfahren ist es möglich, Daten vom Inneren eines Bauteils zu erhalten. Anschaffungs- und Unterhaltungskosten derartiger Anlagen sind jedoch extrem hoch /Ber99/.

Bei den Sensorsystemen, bei denen **optische Techniken ohne Lasereinsatz** genutzt werden, gibt es zwei ähnliche Prinzipien: Sensoren mit strukturierter Beleuchtung (s. Abb. 25, rechts) und Sensoren, die den Moire-Effekt ausnutzen. Für eine umfassende Zusammenfassung zur Moire-Messtechnik wird auf /Pir82/ und /Rei84/ verwiesen. Die meisten optischen Sensorsysteme arbeiten nach dem Streifenprojektionsverfahren /Bey98/. Bei beiden Prinzipien wird ein regelmäßiges optisches Gitter auf das Bauteil projiziert, wobei die Koordinatenwerte durch Triangulation errechnet werden.

Beide Prinzipien unterscheiden sich jedoch in der Art und Weise, wie das Messfeld erfasst wird. Bei Verfahren, die strukturierte Beleuchtung einsetzen, wird das Messfeld nur erfasst (für weiterführende Informationen zum Messprinzip wird auf /Rod99/ verwiesen), wohin gegen bei Verfahren, die den Moire-Effekt ausnutzen, das Messfeld durch dasselbe optische Gitter betrachtet wird, jedoch unter einer Orientierung, die verschieden ist von der, unter der das Gitter projiziert wurde /Ber99/.

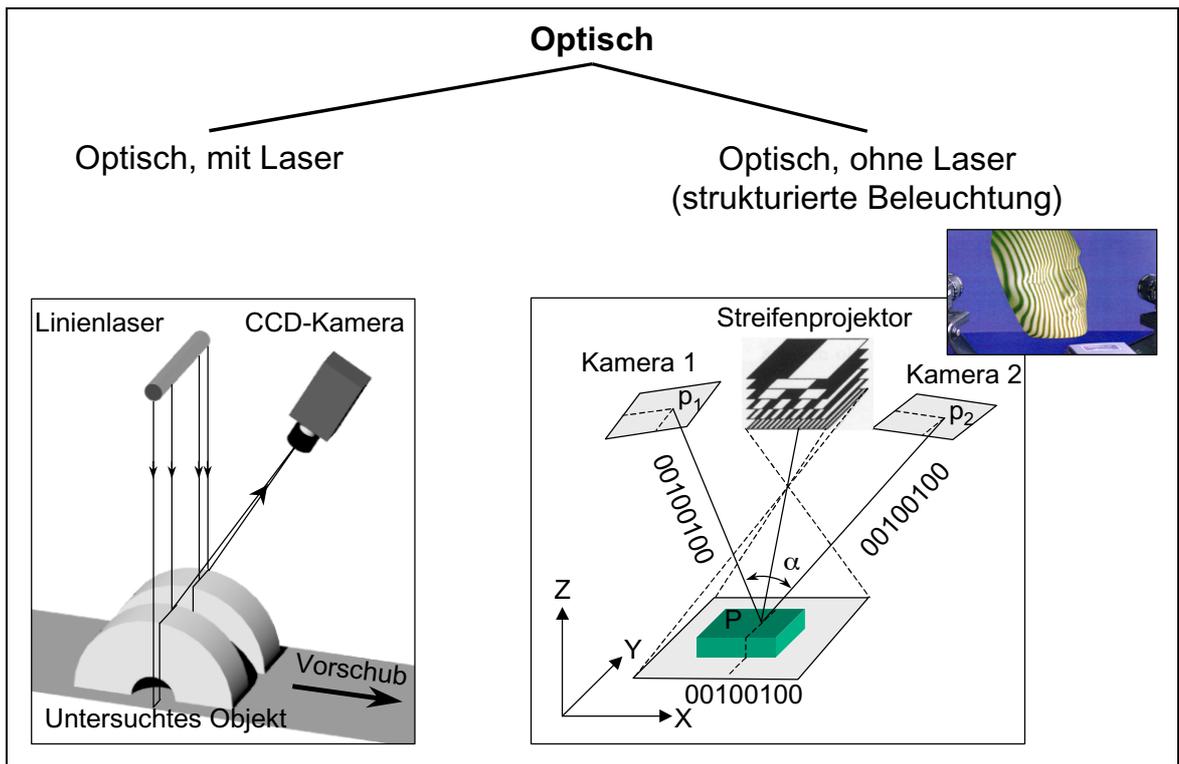


Abb. 25: Optische Sensorsysteme zur 3D-Digitalisierung

Moire-basierende Messsysteme wurden für hohe Messauflösungen in kleinen Messvolumen entwickelt. Messverfahren mit strukturierter Beleuchtung wurden für mittelgroße Messvolumen von ca. $(300 \times 300 \times 300) \text{ mm}^3$ mit niedrigeren Anforderungen an die Messauflösung entwickelt /Rod99/.

/Bie97/ gibt als zu erwartende Leistungswerte für Streifenprojektionssysteme eine Tiefenauflösung von 0,1 mm und eine Lateralauflösung von 0,3 mm bei einem Messvolumen von $(200 \times 200 \times 200) \text{ mm}^3$ an. Bei einer Vergrößerung des Messvolumens sinkt entsprechend die erzielbare Genauigkeit.

Nach /Bre99/ können Leistungsmerkmale nach Tab. 4 für optische Sensorsysteme ohne Lasereinsatz angesetzt werden:

Tab. 4: *Leistungsmerkmale optischer Systeme ohne Lasereinsatz nach /Bre99/*

| Parameter | Typischer Wertebereich | Typische Systemkonfigurationen | |
|-------------------|--|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Baugröße | einige 10 cm ³ | (250 x 90 x 100) mm ³ | (500 x 90 x 100) mm ³ |
| Gewicht | einige kg | 1.6 kg | 2.0 kg |
| Messbereich | mm bis mehrere m | (40 x 25 x 10) mm ³ | (360 x 300 x 200) mm ³ |
| Arbeitsabstand | einige cm bis mehrere m | 160 mm | 800 mm |
| Messzeit | 1 sec. bis 1 min. | 1 sec. | 1 sec. |
| Messgenauigkeit | ca. 1 / 10.000 der Bilddiagonalen | ± 10 µm | ± 40 µm |
| Digitalisierung | (512 x 512) bis (1.300 x 1.024) Pixel | (768 x 512) Pixel | (1.300 x 1.024) Pixel |
| Messpunkteabstand | einige µm bis mehrere mm | 50 µm | 0.3 mm |

Sensorsysteme, bei denen **optische Techniken mit Lasereinsatz** genutzt werden, basieren auf Trigonometrie, genauer gesagt auf Triangulation. Das Bauteil wird mit einem Laserstrahl belichtet und eine CCD⁴-Kamera erfasst das Messfeld. Nachdem die Kamera kalibriert ist, können die Koordinaten eines Punktes auf dem Bauteil aus den Bildkoordinaten der Abbildung auf dem CCD-Chip der Kamera errechnet werden. Das Messprinzip ist in Abb. 26 dargestellt.

Der einzelne projizierte Laserpunkt kann mit Hilfe einer zylindrischen Linse oder einem rotierenden Spiegel zu einer Laserlinie (s. Abb. 25, links) aufgeweitet werden, wodurch es möglich wird, die Anzahl der erfassten Messpunkte pro Zeiteinheit deutlich zu erhöhen /Ber99/.

Prinzipbedingte Einschränkungen bei optischen Sensorsystemen existieren aufgrund von Schattenbildung oder Verdeckung von Messregionen, d. h. es

⁴ CCD = Charged Couple Device

können nur Koordinatenwerte von Punkten ermittelt werden, die gleichzeitig von der Lichtquelle angestrahlt und von der CCD-Kamera gesehen werden können. Hierdurch ergeben sich oftmals Probleme, wenn ausgeprägte Vertiefungen (Bohrlöcher etc.) im Bauteil vermessen werden sollen. Bei scharfen Kanten wird zudem das Licht gestreut, so dass es für die Auswertung nicht verwendet werden kann. Dafür können in sehr kurzer Zeit große und dichte Datenmengen erfasst werden /Rod99/, /Bey98/.

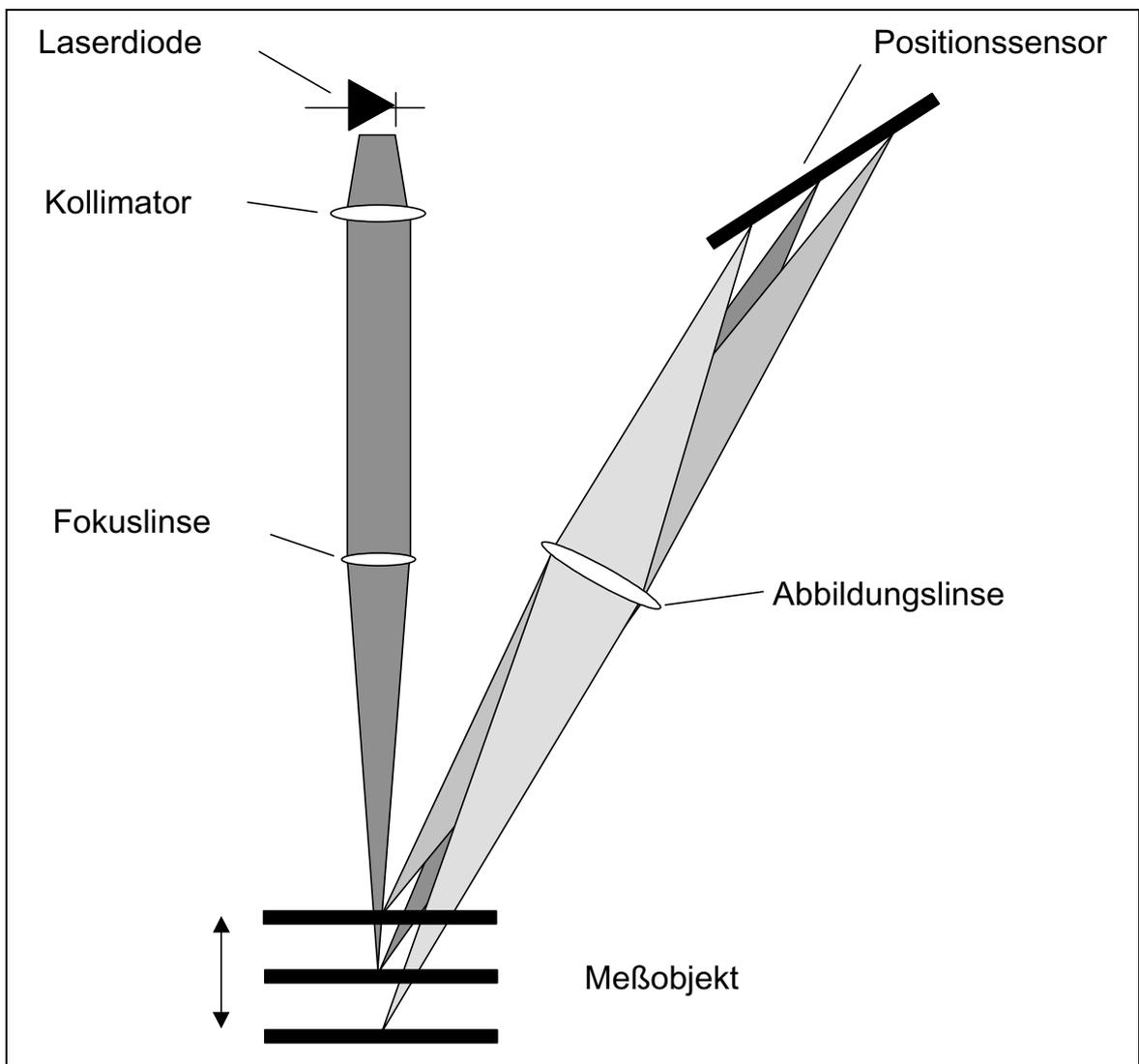


Abb. 26: Prinzipdarstellung der Lasertriangulation (vgl. /Bra98/)

3.2.1.3. Zerstörende Aufnahmetechnik

Bei der zerstörenden Aufnahmetechnik wird in der Regel eine spanabhebende Maschinenbearbeitung des zu digitalisierenden Bauteils mit einer optischen Aufnahmetechnik verknüpft. Es wird durch eine Fräsmaschine eine dünne Schicht (0,012 mm bis 0.25 mm) des Bauteils abgetragen und anschließend das sich ergebende Schnittbild mit dem Sensor digitalisiert. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass innere Strukturen eines Bauteils erfasst werden können; auf der anderen Seite muss das Bauteil hierfür zerstört werden. Um den Zusammenhalt des schichtweise abgetragenen Bauteils zu gewährleisten, muss dieses zuvor vollständig in eine Trägermasse eingegossen werden. Zudem ist dieses Verfahren sehr langsam (Digitalisierzeit: mehrere Stunden bis Tage) /Ber99/.

3.2.2. Verarbeitung von Punktwolken

3.2.2.1. Datenformate im Reverse-Engineering-Prozess

Das Ergebnis der Digitalisierung eines Objektes mit einem der zuvor beschriebenen Sensorsysteme ist eine komplexe **Punktwolke**, die in den meisten Fällen eine Ansammlung von kartesischen Koordinatentripeln (x-, y-, z-Koordinaten) ist (s. Abb. 27). Es wird hier zwischen sortierten und unsortierten Punktwolken unterschieden. Koordinatenmessmaschinen liefern häufig sortierte Punktwolken, da die Messwertaufnahme in Bahnen erfolgt, die in einem festzulegenden Abstand voneinander verlaufen und somit ein mäanderförmiges Datenbild liefern. Sortiert heißt in dem Fall, dass die Abfolge der Messpunkte in der Datendatei der Reihenfolge der Aufnahme entspricht.

Optische Systeme liefern in der Regel unsortierte Punktwolken, die keine Rasterung oder gerichtete Orientierung haben. Diese lässt sich jedoch auch künstlich, d. h. durch einen Berechnungsschritt, erzeugen, wobei Dichte und Abstand der Orientierung vom Anwender frei gewählt werden können.

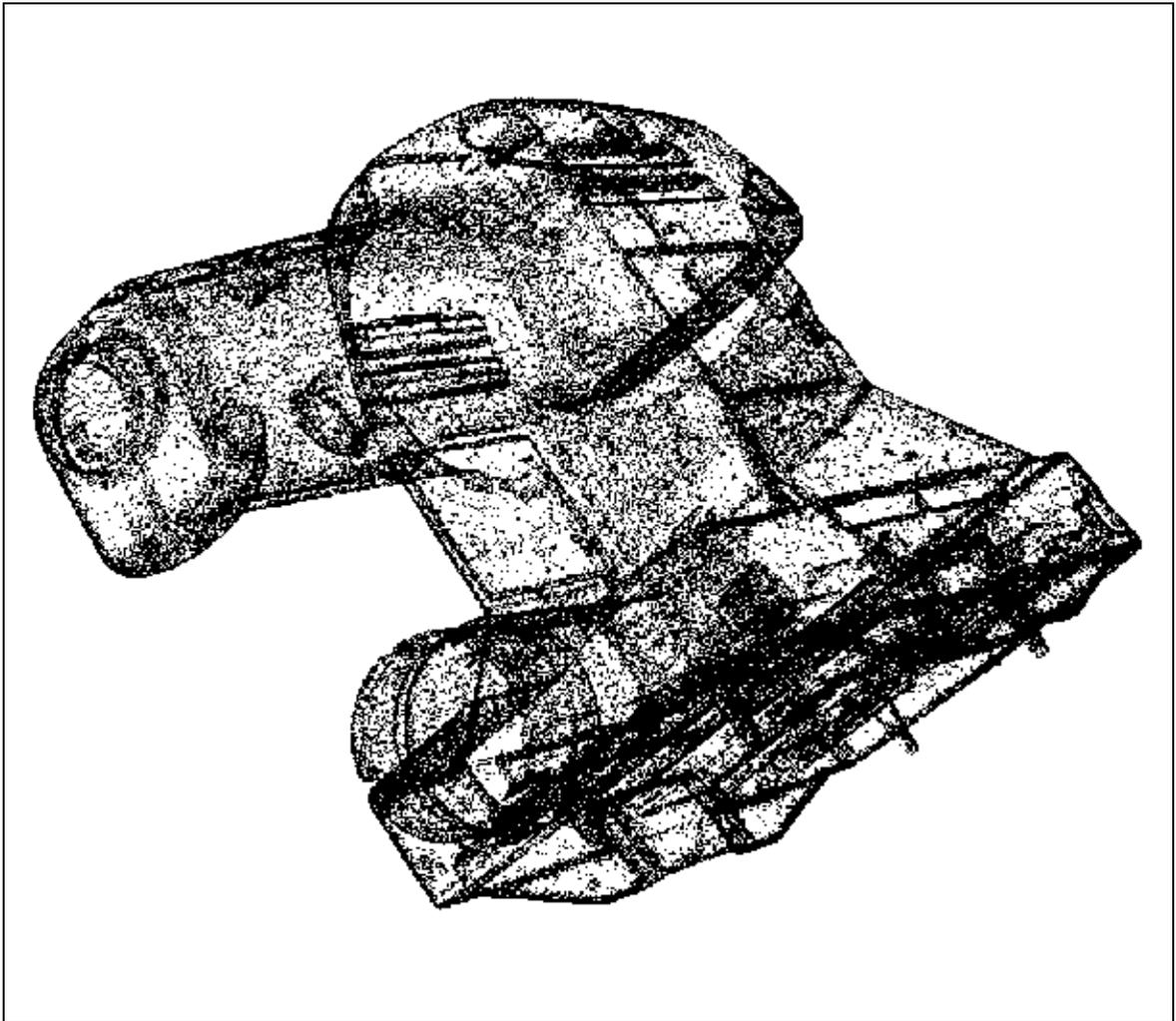


Abb. 27: Darstellung einer komplexen Punktwolke am Beispiel eines Schwingschleifergehäuses

Die einzelnen Sensorsysteme erzeugen zudem eine höchst unterschiedliche Dichte und Anzahl an Messpunkten. Messarme nach Abb. 24, links, S. 64, werden oft eingesetzt, um Bauteile stückweise abzutasten, wobei nur einige wenige Messpunkte von wichtigen geometrischen Features des Objektes aufgenommen werden /Ber99b/; taktile Systeme ergeben generell keine hohen Datenmengen. Mehrere Tausend bis mehrere Zehntausend Messwerte pro Objekt entsprechen einer gängigen Anzahl. Optische Systeme hingegen erzeugen sehr hohe Datenmengen. Bedenkt man, dass mehrere Hunderttausend Messwerte gleichzeitig innerhalb von wenigen Sekunden erfasst werden können, ergeben sich je nach Anzahl der benötigten Messeinstellungen

mehrere Millionen Messpunkte. Im Bereich der Automobilherstellung sind Datenmengen von mehr als 100 Mio. Messpunkten keine Seltenheit /Sch99a/.

Das nachfolgend wichtige Datenformat, welches die digitalisierten Daten i. d. R. durchlaufen, ist das **STL-Format** (*.stl), welches ein de facto Standard im Rahmen des Reverse Engineering geworden ist /Con97/. Das STL-Format ist eine „carrier surface“ /Var00(96)/, wobei zur Bildung dieses Formates Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Messpunkten berechnet werden, um sie dann anschließend untereinander zu verbinden. Dieser Prozess wird als Triangulation oder Polygonisierung bezeichnet, wobei eine Struktur zusammenhängender Dreiecke gebildet wird, deren Kanten jeweils zwei benachbarte Messpunkte durch eine gerade Linie miteinander verbinden /Wan99/. Das STL-Format enthält die Kantenkoordinaten der Dreiecke sowie deren Flächen-Normalenvektor, durch den es möglich ist, innere und äußere Flächen dieser Struktur zu unterscheiden. Im Idealfall bilden diese ein fehler- und lückenfreies Netz über der gesamten Punktwolke, wobei die Auflösung des STL-Datensatzes durch die Wahl der Größe der Dreiecke eingestellt werden kann /Con97/. Je mehr Dreiecke die Struktur enthält, um so größer ist der Speicherbedarf und um so geringer ist die Performance der sie verarbeitenden Computer. Im Vorfeld dieser Triangulation müssen Probleme aufgrund von Rauschen in der Punktwolke, ungleichmäßiger Punktedichte, Unstetigkeiten und Löchern etc. behoben werden /Var00(96)/. Auf diese Arbeitsschritte wird in Kap. 5.3, S. 118 ff. näher eingegangen.

Das dritte wesentliche Datenformat sind **Flächen**, wobei es unterschiedliche mathematische Darstellungen für Freiformflächen gibt /Ker97/. Eine weit verbreitete mathematische Darstellungsform für Freiformflächen ist die Bezier-Fläche. Da Bezier-Flächen nur zur Modellierung kleiner Bereiche mit begrenzter Komplexität geeignet sind (limitierte Anzahl an Freiheitsgraden oder Kontrollpunkten), werden oft sehr viele Bezier-Flächen benötigt, um eine komplette Fläche zu beschreiben. Zusätzlich ist eines der größten Probleme bei der Nutzung von Bezier-Flächen die Erzeugung von stetigen Flächenübergängen

(Tangentialität oder Krümmungsstetigkeit). Darüber hinaus ist ein CAD-Modell mit vielen verschiedenen Flächenpatches von CAD-Systemen zunehmend schwerer zu verarbeiten.

Neben Bezier gibt es andere Modellierungsmethoden, die auf B-spline Darstellung beruhen. Die B-spline Darstellung hat den Vorteil gegenüber Bezier-Flächen, dass sie an lokalen Bereichen sehr einfach manipuliert werden kann. Darüber hinaus können sie sehr effektiv zur Modellierung sehr großer Bereiche eingesetzt werden.

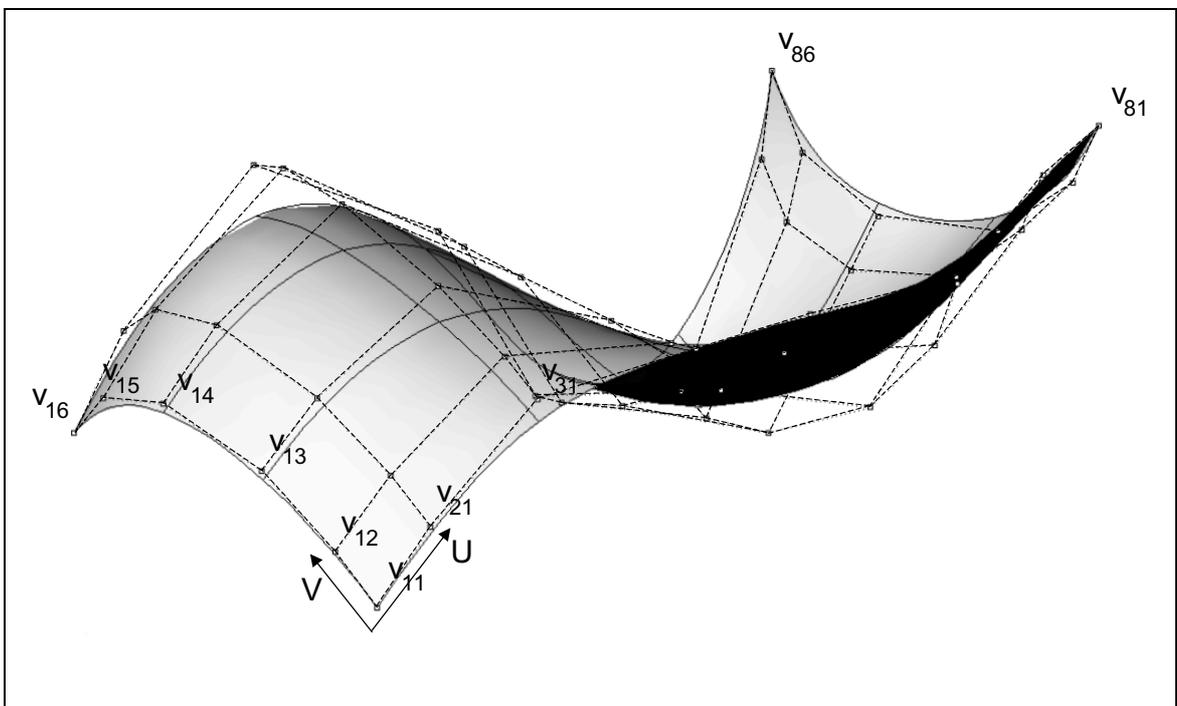


Abb. 28: Schematische Darstellung einer NURBS-Fläche /Ker97/

Beide Darstellungsformen sind Spezialfälle der „Non-Uniform B-spline representation“ (NURBS). Mit NURBS können sowohl Regelgeometrien (Zylinder, Kugeln etc.) als auch Freiformflächen dargestellt werden (s. auch /Bra98/). NURBS wird zudem von den meisten CAD-Systemen unterstützt. Die mathematische Beschreibung einer NURBS-Fläche lautet:

$$P(u_P, v_P) = \frac{\sum_{i=1}^{n_u} \sum_{j=1}^{n_v} w_{ij} V_{ij} B_{ui}(u_P) B_{vj}(v_P)}{\sum_{i=1}^{n_u} \sum_{j=1}^{n_v} w_{ij} B_{ui}(u_P) B_{vj}(v_P)} \quad (3-19)$$

mit:

$P(u_P, v_P)$: Eine vektor-orientierte Funktion der x-, y- und z-Koordinaten eines Punktes auf der Oberfläche mit den Parametern (u_P, v_P) , die die Position des Punktes auf der Oberfläche in Längs- und Querrichtung beschreiben (vgl. Abb. 29).

V_{ij} : V_{ij} sind die x-, y- und z-Koordinaten der $n_u \times n_v$ Kontrollpunkte, die den globalen Verlauf der Fläche bestimmen (vgl. Abb. 28). Es muss beachtet werden, dass eine NURBS-Fläche nicht notwendigerweise durch ihre Kontrollpunkte verlaufen muss. Der Parameter w_{ij} ist ein Gewichtungsfaktor, der die Gewichtung des entsprechenden Kontrollpunktes beschreibt. Wenn w_{ij} größer ist als der Gewichtungsfaktor eines benachbarten Kontrollpunktes, wird die Fläche näher an diesem Kontrollpunkt V_{ij} entlang verlaufen.

$n_u; n_v$: Anzahl der Kontrollpunkte in u- und v-Richtung.

$B_{ui}(u_P); B_{vj}(v_P)$: Basisfunktionen, die den Bereich beschreiben, auf den ein Kontrollpunkt Auswirkungen hat. Für eine vollständige Beschreibung dieser Basisfunktionen wird auf /Bar87/ und /Die93/ verwiesen.

$P(u_P, v_P)$ ist definiert als gewichtete Summe der Kontrollpunkte und wird – neben den zuvor genannten Parametern – durch die Parameter k_u und k_v bestimmt, welche den Grad der Stetigkeit einer NURBS-Fläche in u- und v-Richtung beschreiben /Ker97/.

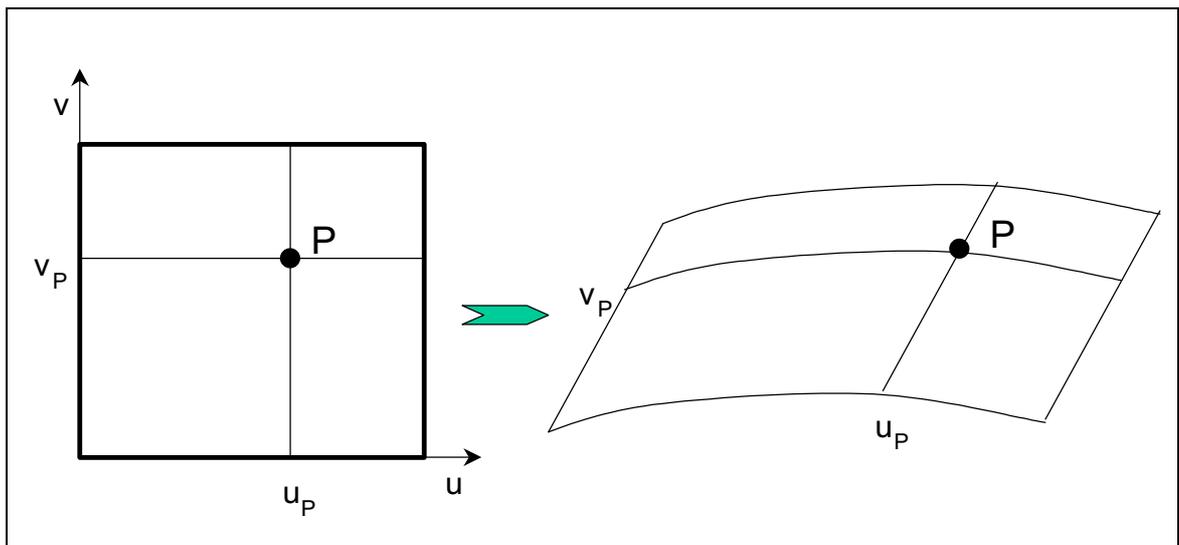


Abb. 29: u - und v -Richtung einer Fläche /Ker97/

Wie die mathematische Beschreibung von NURBS-Flächen und Abb. 29 bereits zeigen, besteht eine Fläche im Idealfall aus genau vier Berandungskurven und mehreren u - und v -Kurvenzügen, die den Verlauf der Fläche, also die Krümmung an jeder Stelle, innerhalb ihrer Berandungskurven beschreibt. Wenn eine angrenzende Fläche dieselbe Berandungskurve besitzt, so bezeichnet man diesen Flächenübergang als C_0 -stetig. Sind alle Berandungskurven aller Flächen C_0 -stetig, ist das Flächenmodell rundum „wasserdicht“ geschlossen. Kritisch an dieser Aussage ist die Tatsache, dass CAD-Systeme mit einer sehr hohen Rechengenauigkeit arbeiten. Praktisch kann daraus die Problemstellung entstehen, dass das CAD-System, in dem die C_0 -Stetigkeit von zwei Berandungskurven erzwungen wurde, welches mit einer geringen Genauigkeit arbeitet, diese Berandungskurven im Rahmen der Toleranz als identisch ansieht. Ein anderes System, das mit einer sehr viel höheren Genauigkeit arbeitet, kann diese Berandungskurven jedoch als mathematisch verschieden im Rahmen seiner engen Toleranz ansehen, was dazu führt, dass dieses System keine C_0 -stetigkeit erkennt, sondern eine Lücke zwischen den Flächen. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass ein tangentialer Übergang zwischen zwei Flächen als C_1 -stetig, ein krümmungsstetiger Übergang als C_2 -stetig bezeichnet wird, usw. In der Automobilindustrie wird häufig mit wesentlich

höheren Stetigkeiten konstruiert, um optimale Flächen gerade im Karosseriebereich zu erhalten.

Das vierte Datenmodell ist das **Volumenmodell** oder auch SOLID genannt. Ein SOLID kann in erster Näherung als rundum wasserdicht geschlossenes Flächenmodell bezeichnet werden. Der in Abb. 30, links, abgebildete Würfel ist ein Beispiel für ein solches SOLID.

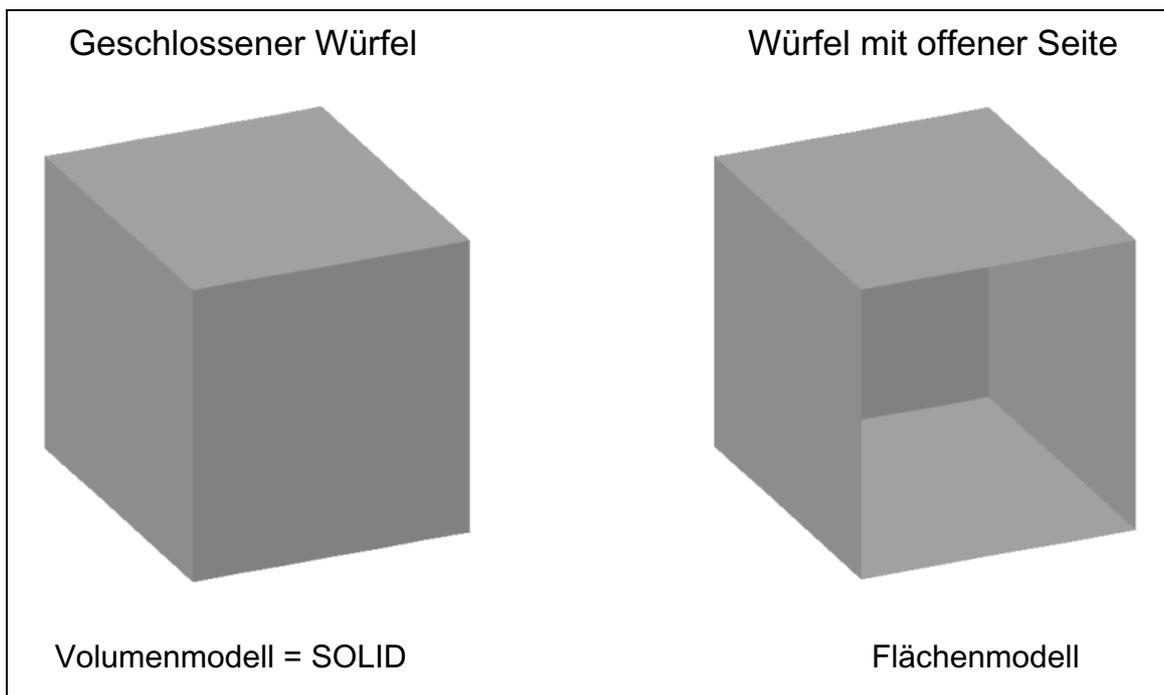


Abb. 30: Unterschied zwischen Flächen- und Volumenmodell

SOLIDS beschreiben immer „Gegenstände“, die real existieren könnten. In einem Flächenmodellierer könnte – wie in Abb. 30, rechts, zu sehen ist – eine Fläche entfernt werden, ohne dass dieser Datensatz hier ungültig würde; ein Volumenmodellierer wäre nicht mehr in der Lage, dieses Gebilde als gültigen Datensatz zu erkennen.

Unterschieden werden können Solids anhand der Verwaltung der einzelnen Elemente im Datensatz. In einem flächenorientierten Volumenmodell werden die einzelnen Flächen durch eine B-Rep-Darstellung beschrieben; in einem körperorientierten Volumenmodell wird das Volumen durch verknüpfte Grundvo-

lumina beschrieben (s. Abb. 31). Die Form der Datenrepräsentation wird als CSG⁵-Modell bezeichnet /Spu97/.

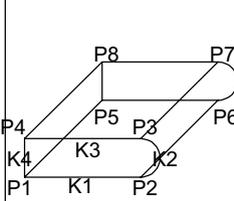
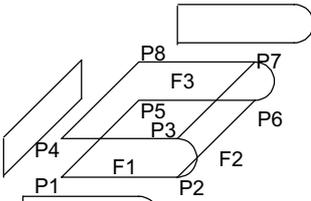
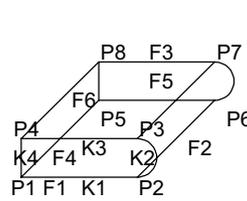
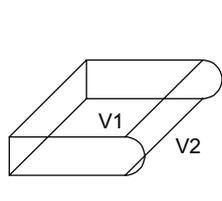
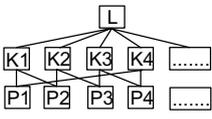
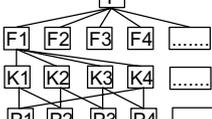
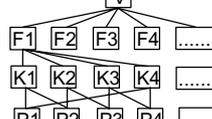
| Linienmodell | Flächenmodell | Volumenmodell | |
|---|---|--|---|
| | | flächenorientiert | körperorientiert |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
| Punkt, Linie | Punkt, Linie, Fläche | Punkt, Linie, Fläche, Volumen | Volumen |
| Drahtmodell | Flächenmodell | B-Rep (Boundary Representation) | CSG (Constructive Solids Geometry) |

Abb. 31: Geometrische Modelle und die zugehörige Verwaltung der Elemente /Spu97/

Aus der Form der Darstellung eines flächenorientierten Volumenmodells kann somit auch rückgeschlossen werden, dass ein Volumenmodell auch manuell aus einzelnen Flächen aufgebaut werden kann. In der Tat sind die meisten Volumenmodellierer in der Lage, ein wasserdicht geschlossenes Flächenmodell als SOLID zu erkennen. Abb. 32 zeigt das wasserdicht geschlossene Flächenmodell einer Kamera; in einem Volumenmodellierer könnte dieser Datensatz als SOLID erkannt werden.

⁵ CSG = Constructive Solid Geometry

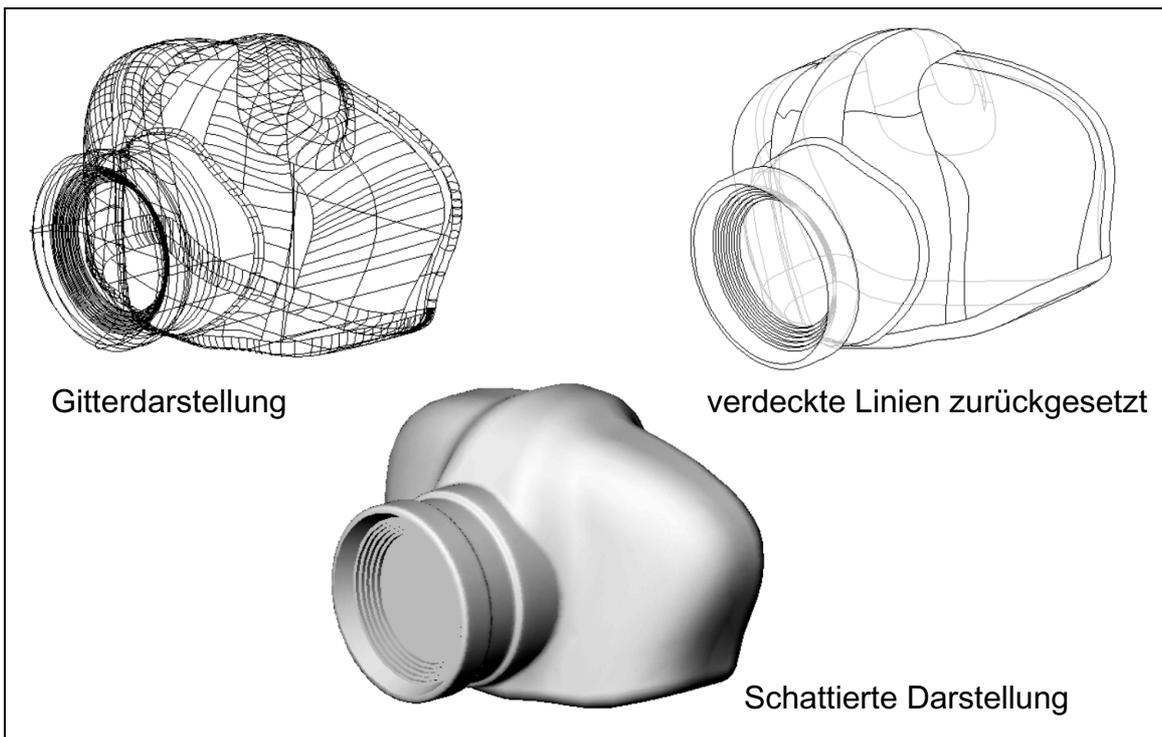


Abb. 32: Beispiel für ein Flächenmodell

3.2.2.2. Klassische Vorgehensweise beim Reverse-Engineering

Der Prozess des Reverse Engineering kann in 4 Hauptphasen unterteilt werden. Nach der eigentlichen Objektvermessung (data acquisition) beginnt die Phase der Aufbereitung (pre-processing) des Datensatzes, um „Rauschen“ herauszufiltern, die Punkteanzahl zu reduzieren, Verbindungen zwischen benachbarten Messpunkten herzustellen, Redundanzen in den Messwerten zu reduzieren und Teil-Punktwolken, die aus verschiedenen Ansichten aufgenommen wurden, in einen Datensatz zu überführen. In der dritten Phase wird die Punktwolke segmentiert (segmentation) und CAD-Flächen in diese separierten Segmente eingepasst (surface fitting). Hierzu werden markante „Kanten“ im Datensatz herausgefiltert (sog. feature-lines), die sehr häufig als Berandungskurven für Flächenpatches eingesetzt werden. In der letzten Phase werden diese Flächen zu einem vollständigen CAD-Modell verbunden (geometric model creation), indem Blend-Flächen, Verrundungen oder sonstige Verbindungsflächen erzeugt werden /Var99/, /Bra98/.

Auf dem Weg vom Gegenstand zum Solid-Modell werden in den meisten Fällen die in Kap. 3.2.2.1, S. 70 vorgestellten Datenformate in der in Abb. 33 gezeigten Reihenfolge durchlaufen.

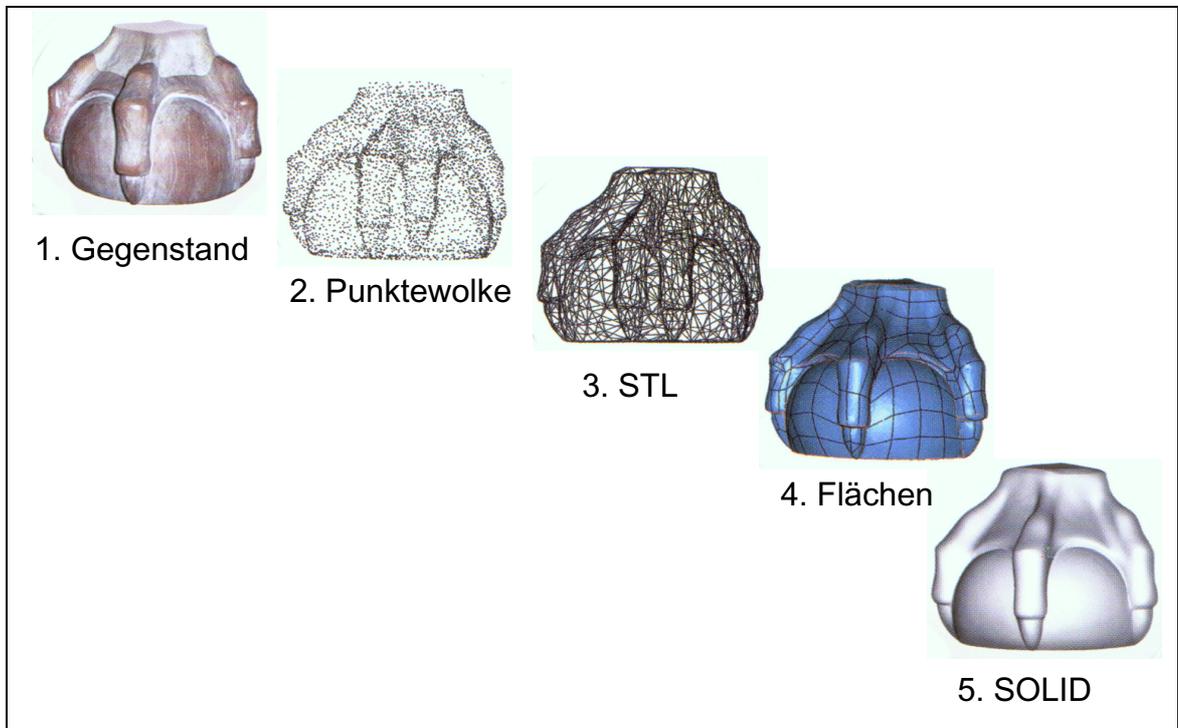


Abb. 33: Reihenfolge der Datenformate im Reverse-Engineering-Prozess

Arbeitsschritt drei (segmentation and surface fitting) ist in der Regel der aufwendigste und schwierigste Arbeitsschritt. Die Probleme, die es im Rahmen dieses Schrittes zu lösen gilt, sind:

1. die gesamte Punktwolke wieder in logische Teilbereiche aufzuteilen, so dass jeder Teilbereich nur die Punkte enthält, die einer Fläche zuzuordnen sind,
2. zu entscheiden, zu welcher Art Fläche (Ebene, Zylinder, Rotationsfläche, Freiformfläche) jeder Teilbereich der Punktwolke gehört
3. und die Fläche zu erzeugen, die den entsprechenden Teilbereich der Punktwolke optimal approximiert.

Es muss beachtet werden, dass in der Praxis diese Aufgabenschritte nicht in der oben vorgestellten sequentiellen Abfolge durchgeführt werden können, da stets zu entscheiden ist, ob bestimmte Punkte zu einem bestimmten Teilbereich zur Bildung einer Fläche gehören, oder zu einem anderen. Zu Beginn jedes Segmentierungs-Prozesses existiert stets eine Hypothese, nach der Flächen am besten zu rekonstruieren sind; deshalb können Segmentierung und Flächenerzeugung kaum voneinander getrennt werden. Typischerweise werden hier iterative Schritte durchgeführt, z. T. auch auf dem tryal and error Prinzip beruhend / Var99/. Für eine ausführliche Zusammenfassung der prinzipiellen Techniken der Flächenrückführung wird auf /Var00/ verwiesen.

3.2.2.3. Datenaustausch / Schnittstellen

Der Datenaustausch zwischen unterschiedlichen CAD-Systemen gehört zu den größten Problemen in der rechnergestützten Konstruktion. Insbesondere bei 3D-CAD-Systemen gestaltet sich der Austausch von Daten zwischen zwei unterschiedlichen CAD-Systemen sehr schwierig. Während der Datenaustausch zwischen zwei gleichen Systemen problemlos möglich ist, ist der Austausch zwischen unterschiedlichen Systemen nur über Direktschnittstellen – sofern gerade für die beiden gewünschten CAD-Systeme eine Direktschnittstelle auf dem Markt verfügbar ist – oder systemneutrale Schnittstellen möglich. Hierbei stellt sich dann immer die Frage, wie groß die Informationsverluste beim Datenaustausch sind, da eine 100 %-ige Fehlerfreiheit fast nie erreicht wird.

Neben der Schnittstellenproblematik an sich besteht zudem das Problem, Daten generell zwischen unterschiedlichen CAD-Konzepten auszutauschen. Daten aus einem 3D-Flächenmodellierer können bspw. nur in den seltensten Fällen von 3D-Volumenmodellierern derart importiert werden, dass dieser in der Lage ist, aus den Daten ein echtes Volumenmodell zu errechnen. Hier liegt die Problematik jedoch nicht beim Verlust von Informationen durch die Schnittstelle, sondern vielmehr im unterschiedlichen Arbeitsprinzip beider CAD-Konzepte.

Gerade im Bereich des Reverse Engineering muss sehr oft mit vielen verschiedenen Softwaresystemen gearbeitet werden, um damit das Ziel zu erreichen.

Für den Austausch von Daten zwischen diesen Systemen können in der Regel nur systemneutrale Schnittstellen genutzt werden.

IGES ist eine solche Schnittstelle. IGES⁶ wurde als Standard von der US-Regierung und der Industrie definiert und bereits zu Beginn der 80er Jahre vorgestellt. Das IGES-Format ist eine reine Geometrieschnittstelle, die zur Übertragung von Geometriedaten entwickelt wurde. Mit IGES lassen sich nicht nur 2D-Zeichnungen übertragen, es können auch 3D-Flächenmodelle übersetzt werden, wobei sowohl Bézier- als auch NURBS-Flächen unterstützt werden. Die IGES-Schnittstelle wird nach wie vor ständig weiterentwickelt und ist mittlerweile auch in der Lage, Volumenmodelle zu übertragen. Beim Datenaustausch mit IGES muss jedoch bedacht werden, dass durchaus manche Daten bei der Übersetzung in das neutrale Format etwas verändert werden können. Zudem weist IGES eine so große Vielfalt von Definitionsmöglichkeiten auf, dass es einer genauen Abstimmung zwischen Sender und Empfänger bedarf /CAD00/. Dennoch ist IGES derzeit die weltweit am weitesten verbreitete genormte Schnittstelle /RKW98/.

Die VDA-FS⁷ ist ein vom Verband der Automobilhersteller definiertes Standardformat zum Austausch von Freiformgeometrien und deren Konstruktionsgeometrien. Ein Austausch von 3D-Volumenmodellen ist bedingt möglich. Mit der VDA-FS Schnittstelle können Flächenmodelle in Form von Freiform-Kurven und Flächen übertragen werden. Flächen können hierbei auch als Faces⁸ übertragen werden. Dabei wird für die Kurven und Flächen die polynomiale Darstellungsform benutzt, wobei keine Einschränkungen bezüglich der verwendeten Polynomgrade bestehen. Daneben können auch andere einfache Geometriedaten, wie Punkte, Punktemengen und Punkte mit Vektoren übertragen werden. Die VDA-FS Schnittstelle ist eindeutiger definiert als bspw. IGES, findet ihre Verbreitung aber selten über deutschsprachige Softwaresysteme hinaus /CAD00/.

⁶ IGES = Initial Graphics Exchange Specification

⁷ VDA-FS = Verband der Automobilindustrie-Flächenschnittstelle

⁸ getrimmte Flächen

STEP⁹ ist ebenfalls ein international genormtes Schnittstellenformat, das sich jedoch in der Zielsetzung von IGES und VDA-FS stark unterscheidet. Das in den 90er Jahren entwickelte STEP-Format (auch bekannt unter der Bezeichnung ISO Standard 10303) soll alle während der Produktlebensdauer anfallenden Daten darstellen und übertragen. STEP beinhaltet daher nicht nur einen Standard, sondern eine Reihe von Standards, die über spezifische Sprachen definiert sind und die aus sogenannten Parts, Application Protocols und Conformance Classes bestehen. So beschreibt Application Protocol AP 203, Class 2 beispielsweise Draht- und Flächenmodelle, Class 4 Flächenmodelle mit Topologie und Class 6 Volumenmodelle. Das Application Protocol AP 214 ist speziell auf die Automobilindustrie zugeschnitten. Sowohl AP 203 als auch AP 214 besitzen die Fähigkeit, Zusammenbauten nicht nur von ihrer Geometrie, sondern auch von ihrer Struktur her zu unterstützen. Auch Informationen über die hierarchische Struktur eines Zusammenbaus werden berücksichtigt. Damit der Austausch mit Hilfe der STEP-Schnittstelle so problemlos wie möglich funktioniert, bieten die CAD-Hersteller entsprechende STEP-Prozessoren in ihren jeweiligen Systemen an. Die Qualität dieser Prozessoren testet der ProSTEP Verein in regelmäßigen Abständen durch Benchmark-Tests /CAD00/. Neben diesen neutralen Datenschnittstellen ist es bei vielen 3D-CAD-Systemen möglich, ACIS oder Parasolid-Daten zu lesen oder zu erzeugen. ACIS und Parasolid sind zwei konkurrierende Kerne für die rudimentären Funktionalitäten bzgl. Datenerzeugung und –manipulation von CAD-Systemen. Eine Vielzahl von 3D-CAD-Systemen verfügt über keinen eigenen Geometriekern, sondern nutzt in Lizenz den Kern eines der beiden Anbieter. Oftmals können Daten auch über diese Formate ausgetauscht werden. Insbesondere beim Datenaustausch zwischen Softwaresystemen, die den gleichen Kern verwenden, können mit diesen Formaten häufig sehr gute Ergebnisse erzielt werden.

⁹ STEP = Standard for the Exchange of Product Model Data

4. Entwicklung spezieller CAD-Funktionalitäten zur Automatisierung der Verpackungskonstruktion mittels 3D-CAD

Der Begriff CAD hat sich für alle Aktivitäten im Zusammenhang mit rechnerunterstütztem Konstruieren durchgesetzt. Dabei wird unter Konstruieren gemäß VDI-Richtlinie 2223 „das vorwiegend schöpferische, auf Wissen und Erfahrung beruhende Ausdenken möglichst optimaler Lösungen technischer Erzeugnisse, das Ermitteln ihres funktionellen und strukturellen Aufbaus und das Erstellen fertigungsgerechter Unterlagen“ verstanden [Vdi99/].

Diese Tätigkeit erfordert die Verarbeitung einer Vielzahl geometrischer und technologischer Daten sowie die Erstellung zahlreicher Unterlagen in graphischer Form. Hier bieten sich vielfältige Möglichkeiten der Rechnerunterstützung. Während die traditionelle Arbeitsweise in der Konstruktion durch die Arbeit am Zeichenbrett mit Lineal, Schablonen und Bleistift geprägt war, setzt sich immer mehr das Arbeiten mit einem Arbeitsplatzrechner bzw. einem PC durch. Im Rahmen des zunehmenden Einsatzes der CAD-Technik in der Industrie nahm die Anzahl der CAD-Softwareanbieter immer weiter zu und es wurden immer mehr CAD-Programme angeboten, die auf spezielle Probleme der Praxis angepasst sind. Heutzutage ist die zunehmende Verbreitung von 3D-CAD-Software zu beobachten, die die Möglichkeiten des effizienten CAD-Einsatzes noch weiter erhöht. Unter diesen vielen 3D-CAD-Programmen gibt es jedoch kein Programm bzw. Programmmodul, das auf die Verpackungspolsterentwicklung angepasst ist. Einen großen Nutzen hätte insbesondere das Vorhandensein einer Bibliothek, in der zum einen Verpackungspolster und zum anderen häufig verwendete Polster Elemente hinterlegt sind. Diese Bibliothek wurde unter anderem im Zusammenhang mit dieser Arbeit erstellt.

Bei der Erstellung der Variantenbibliothek wurden zwei verschiedene Arten von Modellen erzeugt. Zum einen wurden schon häufig anzutreffende „fertige“ Polster hinterlegt. Zum anderen sind die am häufigsten verwendeten geometrischen Polster Elemente, wie einige Rippenkonstruktionen, in einer Bibliothek angelegt worden. Das in dieser Arbeit benutzte 3D-CAD-System, in dem die

Bibliothek implementiert wurde, heißt SolidWorks 2000. Zur Begründung der Auswahl speziell dieses Softwarepaketes wird auf /Hir01/ verwiesen.

4.1. Umsetzung von Verpackungspolsterkonstruktionen in parametrische 3D-CAD-Modelle

Parametrische Polstervarianten können als Standardelemente in einer Variantenbibliothek vorgehalten werden, um diese im Dialog mit dem Computer sehr komfortabel teilautomatisiert zu dimensionieren (vgl. Abb. 4, S. 11). Der parametrische Aufbau erlaubt dabei ein sehr schnelles Anpassen der Variante an die speziellen Erfordernisse des jeweiligen Produktes. Die Modelle aus Abb. 4, S. 11 sind beispielsweise durch das Ändern nur weniger geometrischer Größen (z. B. Längen, Rippenanzahl) eines parametrisch aufgebauten Verpackungspolsters automatisch entstanden.

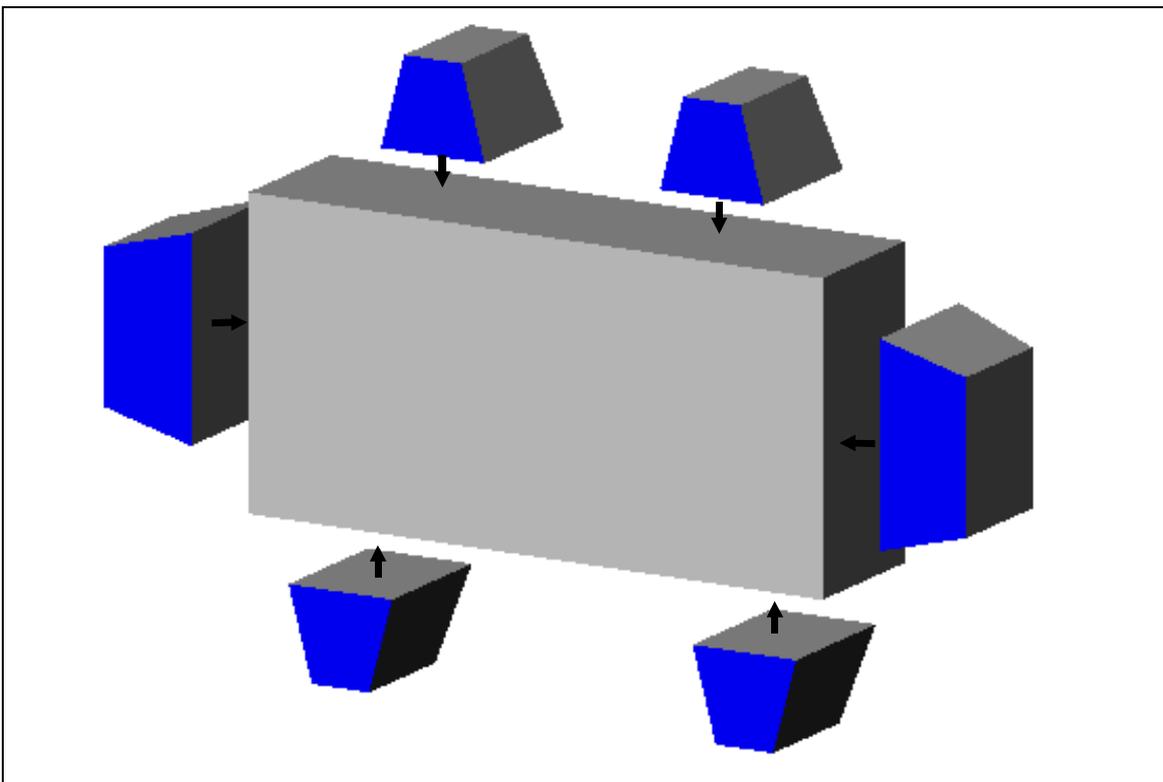


Abb. 34: Einfachstes, aus verschiedenen Standardbauelementen zusammengesetztes Verpackungspolstermodell

Alle vier Polster der Abb. 4, S. 11 sind Varianten eines Polstermodells, bei dem die geometrischen Größen miteinander verknüpft sind und bei Bedarf beliebig geändert werden können. Auf diese Weise können nicht nur Polstermodelle durch Manipulation bestimmter Variablen leicht an neue Aufgabenstellungen angepasst werden, sondern auch einzelne elementare Komponenten wie Rippen, die nach einem Baukastenprinzip mit bestehenden Modellen schnell zu individuellen Lösungen zusammengefügt werden können (vgl. Abb. 34).

Die Funktionsweise der Parametrik eines Modells kann beispielsweise an einer einfachsten Rippe erläutert werden. Für einen Polsterentwickler sind bei einer Rippe nur die Polsterfläche und die Rippenhöhe maßgebend für eine Dimensionierung (vgl. Abb. 35). Bei einem Volumenmodell erfolgt die Dimensionierung in der Regel über Längen- und Winkelbeziehungen.

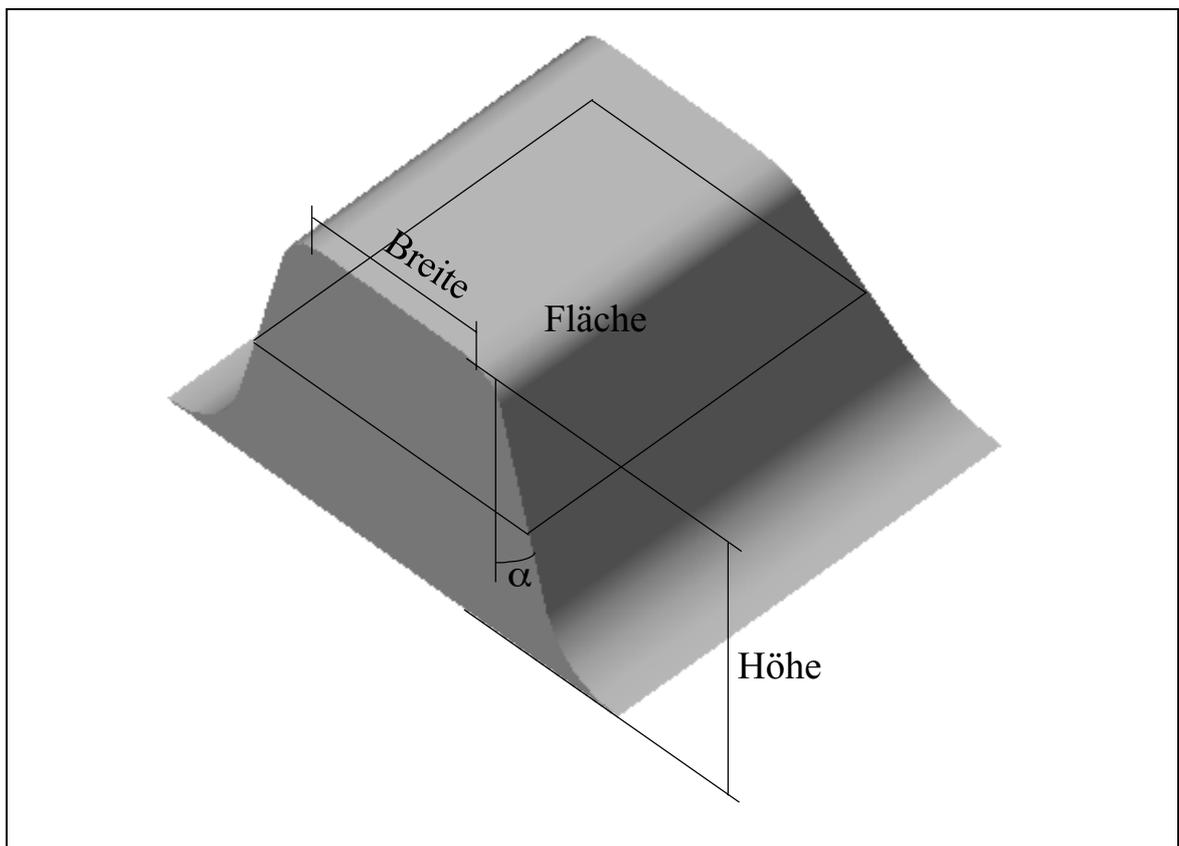


Abb. 35: Relevante Kenngrößen einer Standardrippe

Diese Kenngrößen werden als Variablen gespeichert, denen ein beliebiger Wert zugewiesen werden kann. Dabei können je nach Bedarf die Kenngrößen miteinander verknüpft werden, so dass sich bei Änderung eines Wertes die anderen Kenngrößen nach vorgegebenen Rechenvorschriften mitverändern. Da die Kenngrößen bei einem parametrisch aufgebauten Rippenmodell als Variablen abgespeichert sind, können automatisch unterschiedliche Rippen durch das Importieren von verschiedenen Parametersätzen der Kenngrößen erzeugt werden.

Ferner können bei einem Polstermodell, an dem - wie in Abb. 34 auf Seite 84 dargestellt - mehrere Rippen zugefügt sind, unter Ausnutzung der Parametrik alle Rippen durch das Ändern einer Kenngröße von einer Rippe automatisch mitverändert werden.

4.2. Variantenbibliothek von Komplett-Konstruktionen

Im Rahmen der Untersuchungen des Aufbaus von Verpackungspolstern wurde festgestellt, dass in der Praxis überwiegend außenverrippte Polster, die entweder das Packgut vollständig oder nur an den Seiten umschließen, eingesetzt werden (vgl. /Hir01/). Daher sind in der Variantenbibliothek fast ausschließlich diese beiden Polsterarten hinterlegt. Im weiteren Verlauf wird zwischen diesen beiden Polsterarten nicht weiter differenziert, da der wesentliche Unterschied dieser Polsterarten aus der Eintauchtiefe resultiert, die bei einem parametrisch aufgebauten Polstermodell eine beliebig veränderbare Variable ist.

Bei diesen Verpackungspolstern treten einige Außenkonturen häufig auf und ähneln sich. Dabei unterscheiden sich diese Polster nur in den unterschiedlichen geometrischen Abmessungen, wie beispielsweise den Längenverhältnissen. Aus diesem Grund sind die oft in der Praxis eingesetzten Basistypen von Polstern in parametrischer Form als 3D-Modell erstellt worden. Durch Veränderung einiger Parameter und Hinzufügen von weiteren geometrischen Elementen kann fast jedes Polster erzeugt werden. Bei der Variantenbibliothek der „Fertigen“ Polster sind mehrere Entwicklungsstufen zu unterscheiden:

- Grundkörper des Polsters mit Rippelementen,
- Grundkörper des Polsters mit Rippelementen und weiteren Elementen (beispielsweise Griffe und Rand/Steg) und
- „vollständig fertig“ konstruierte Polster.

Die unterschiedlichen Entwicklungsstufen der hinterlegten Polster ermöglichen es dem Anwender dieser Bibliothek, das für ihn optimale Polster als Ausgangsbasis für seine weiteren konstruktiven Auslegungsvorgänge und Anpassungen des Polsters an die vorliegenden Anforderungen zu nutzen. Dabei sind die erforderlichen Anpassungsmaßnahmen bei den „vollständig fertig“ konstruierten Polstern nur in der Änderung der geometrischen Maße vorzunehmen.

Die bei den Polstern gewählten Rippelemente werden in der Bibliothek anhand der Art der Rippe und der Anzahl der verwendeten Rippelemente unterschieden. In der Praxis werden häufig doppelte oder dreifache Rippelemente in der Längsrichtung und doppelte Rippelemente in der Querichtung eingesetzt. In der Bibliothek werden Polster mit den Rippenarten Eckrippe, Halbrippe und Umlaufrippe angeboten.

Nachfolgend werden die einzelnen hinterlegten Polster vorgestellt. Bei den Polstern der ersten Entwicklungsstufe sind die in Tab. 5 aufgelisteten Polster zu nennen.

Exemplarisch für die Grundpolstermodelle wird das Polster Nr. 1: „Polster mit doppelter Halbrippe auf der Längsseite“ in Abb. 36 vorgestellt. Dieses Grundpolster weist noch keine Rundungen oder weitere Elemente auf und kann problemlos für fast alle Packgüter angepasst werden.

Tab. 5: Übersicht über entwickelte Grundpolstermodelle /Hir01/

| Nr.: | Beschreibung des Polsters |
|------|---|
| 1. | Polster mit doppelter Halbrippe auf der Längsseite |
| 2. | Polster mit doppelter Umlaufrippe auf der Längsseite |
| 3. | Polster mit doppelter Halbrippe auf beiden Seiten |
| 4. | Polster mit doppelter Umlaufrippe auf beiden Seiten |
| 5. | Polster mit dreifacher Halbrippe auf der Längsseite und einer doppelten Umlaufrippe auf der Querseite |
| 6. | Polster mit dreifacher Umlaufrippe auf der Längsseite und einer doppelten Umlaufrippe auf der Querseite |
| 7. | Polster mit dreifacher Umlaufrippe auf der Längsseite und mit dreifacher Halbrippe auf der Querseite |
| 8. | Polster mit dreifacher Umlaufrippe auf beiden Seiten |

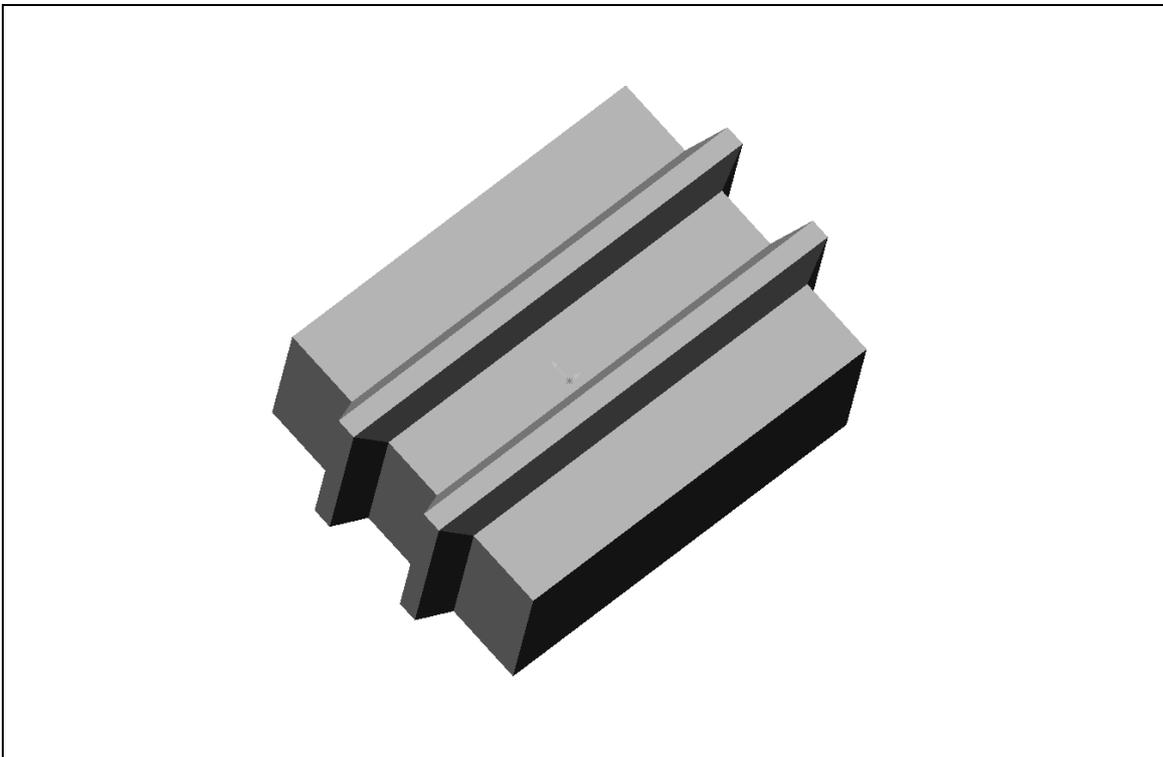


Abb. 36: Polster mit doppelter Halbrippe auf der Längsseite /Hir01/

Die in Tab. 5 aufgelisteten Polstermodelle werden in einer weitermodifizierten Form in einer nächsten Entwicklungsstufe hinterlegt. Hierbei werden Ränder und/oder Griffe dem Basismodell zugefügt und die Kanten abgerundet. Die sich daraus ergebenden Polstermodelle werden in Tab. 6 aufgeführt.

Tab. 6: Übersicht über weiter modifizierte Grundpolstermodelle /Hir01/

| Nr.: | Beschreibung des Polsters |
|-------------|--|
| 1. | Polster für Computertower |
| 2. | Polster für Videogeräte |
| 3. | Polster für Fernseher oder Monitore |
| 4. | Polster für Fernseher und Monitore |
| 5. | Universalpolster mit doppelter Rippe an einer Seite |
| 6. | Universalpolster mit doppelter Rippe an beiden Seiten |
| 7. | Universalpolster mit doppelter Umlaufrippe an Längsseite und dreifacher Umlaufrippe an Querseite |
| 8. | Universalpolster mit dreifacher Umlaufrippe an Längsseite und doppelter Umlaufrippe an Querseite |
| 9. | Universalpolster mit dreifacher Halbrippe an Längsseite und doppelter Umlaufrippe an Querseite |

Als Beispiel für Verpackungspolster dieses Entwicklungstyps wird das Polster Nr. 7: „Universalpolster mit doppelter Umlaufrippe an Längsseite und dreifacher Umlaufrippe an Querseite“ herangezogen (s. Abb. 37). Es weist zwei gleiche elementare Polsterkomponenten in Form von Umlaufrippen auf. Die geometrischen Werte dieses Polsters (Länge, Breite und Tiefe) entsprechen einem realen Verpackungspolster. Aber auch hier sind noch keine Verrundungen vorgenommen worden, um die weitere Bearbeitung zu erleichtern.

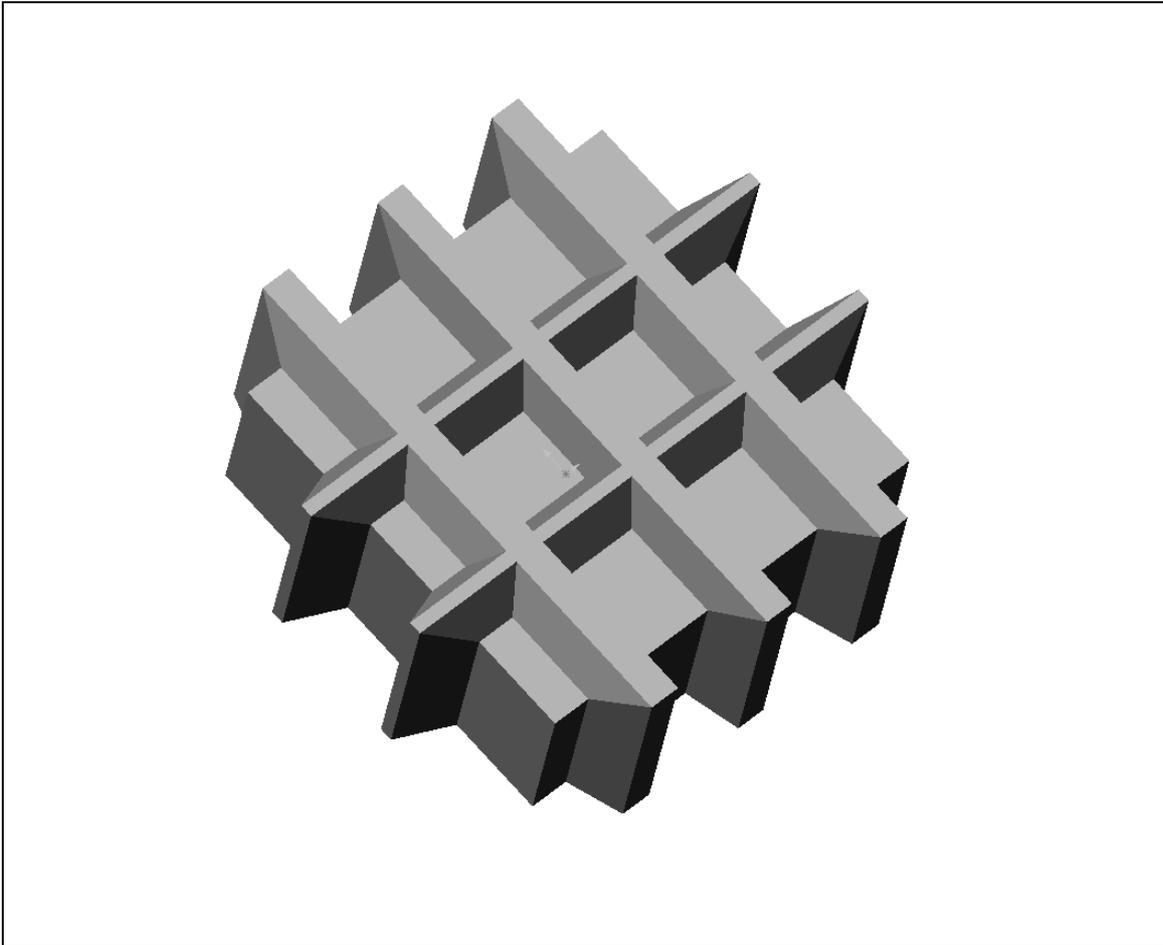


Abb. 37: Universalpolster mit doppelter Umlaufrippe an Längsseite und dreifacher Umlaufrippe an Querseite /Hir01/

Die Polstermodelle der „vollkommen fertig“ konstruierten Polster mit Rundungen und Fasen werden in Tab. 7 vorgestellt:

Ein „vollkommen fertig“ konstruiertes Polstermodell ist das Polster Nr. 7 „Universalpolster mit doppelter Umlaufrippe an Längsseite und dreifacher Umlaufrippe an Querseite, Rahmen und Rundungen“, an dessen Varianten des 3D-Modells schon alle Verrundungen vorgenommen wurden (s. Abb. 38).

Tab. 7: Übersicht über vollkommen fertig konstruierte Polster /Hir01/

| Nr.: | Beschreibung des Polsters |
|------|--|
| 1. | Polster für Computertower |
| 2. | Polster für Videogeräte |
| 3. | Polster für Fernseher oder Monitore |
| 4. | Polster für Fernseher und Monitore |
| 5. | Universalpolster mit doppelter Rippe an einer Seite |
| 6. | Universalpolster mit doppelter Rippe an beiden Seiten |
| 7. | Universalpolster mit doppelter Umlaufrippe an Längsseite und dreifacher Umlaufrippe an Querseite, Rahmen und Rundungen |
| 8. | Polster mit quadratischen Noppen |
| 9. | Polster mit runden Noppen |

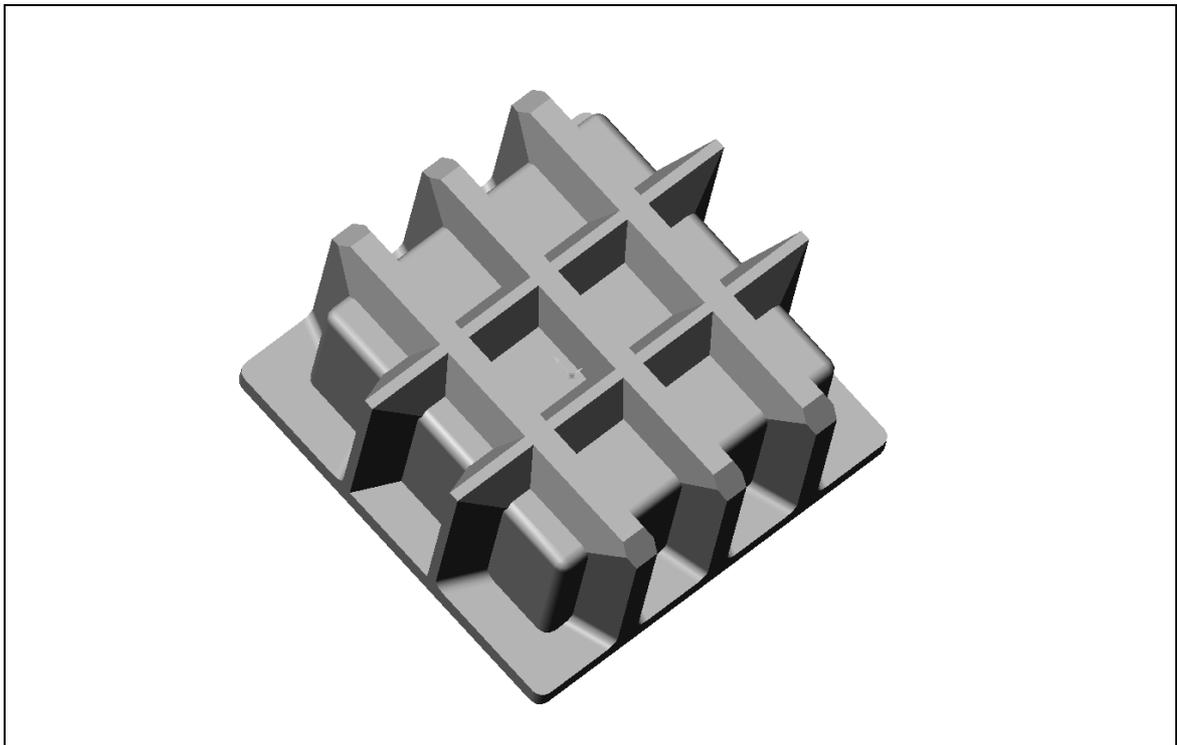


Abb. 38: Universalpolster mit doppelter Umlaufrippe an Längsseite und dreifacher Umlaufrippe an Querseite, Rahmen und Rundungen /Hir01/

Dieser Teil der Bibliothek ist wie folgt in der verwendeten 3D-Software implementiert:

Das Einbinden der Variantenbibliothek erfolgt, indem der Ordner mit den in dieser Arbeit erzeugten Polstermodellen in den Programmordner „Palette Parts“ in dem Verzeichnis „...\\SolidWorks\\data\\“ kopiert wird.

Die Variantenbibliothek kann über die Funktion „Feature Palette“ aufgerufen werden. Diese ist bei Solid Works unter dem Hauptmenüpunkt „Extras“ zu finden.

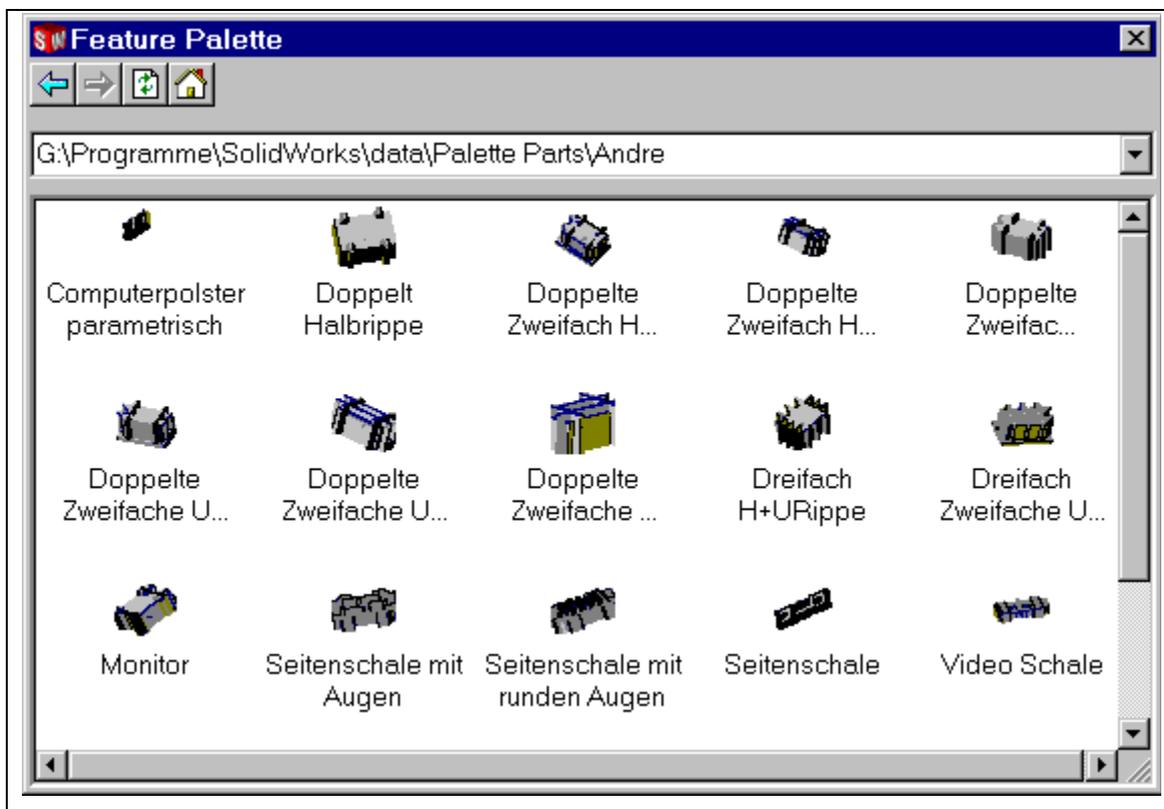


Abb. 39: Ansicht des Fensters mit den 3D-CAD-Modellen von Verpackungspolstern /Hir01/

Nach dem Anwählen des Menüpunktes „Feature Palette“ wird ein Unterfenster aktiviert, in dem der Anwender der Variantenbibliothek die Möglichkeit hat, zwischen den Verpackungspolstermodellen über „Parts“ und den elementaren Komponenten „Features“ auszuwählen. An dieser Stelle erfolgt die Unterscheidung zwischen Polstermodellen und elementaren Komponenten, da diese sich

in der Vorgehensweise der weiteren Handhabung der Bibliotheken erheblich unterscheiden. Bei der Auswahl des Ordners „Parts“ werden alle CAD-Modelle von Polstern in einem neuen Fenster angezeigt (s. Abb. 39).

Das Aufrufen des gewünschten Verpackungspolstermodells erfolgt über das Auswählen des Polstermodells mit der linken Maustaste und dem Öffnen des Modells mit der rechten Maustaste. Das Polster wird in den aktiven Speicher geladen und steht dem Programmanwender zur weiteren Bearbeitung als Ausgangsmodell zur Verfügung.

Die Vorgehensweise der Anpassung der CAD-Modelle an die einzelnen Anwendungsfälle wird nachfolgend an einem CAD-Modell beschrieben. Anzumerken ist, dass diese Beschreibung keine Bedienungsanleitung des CAD-Systems ersetzen, sondern nur eine zusätzliche Hilfestellung darstellen soll. Anhand dieser Hilfestellung und der Bedienungsanleitung dieser Software wird der Anwender in die Lage versetzt, die Anpassung des Polstermodells durchzuführen.

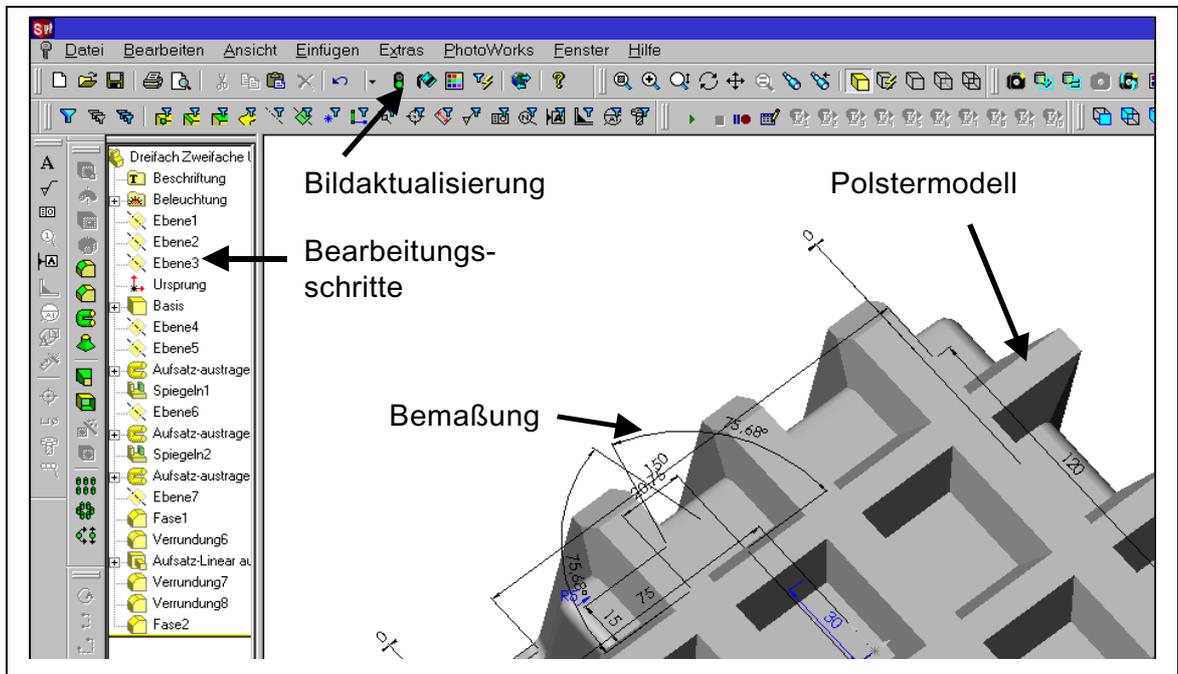


Abb. 40: Geöffnetes parametrisch aufgebautes Polstermodell /Hir01/

Nach dem Öffnen des Modells erscheint das Polstermodell im rechten Bildschirmfenster. In dem linken Fenster werden der zeitliche Entwicklungsablauf bzw. die einzelnen Bearbeitungsschritte aufgelistet (s. Abb. 40).

Das Anpassen des Modells kann auf drei verschiedene Vorgehensweisen erfolgen. Zu einem kann der Anwender durch zweifaches Anklicken der Bemaßungen die Werte ändern. Bei der nächsten Modellaktualisierung werden die Änderungen berücksichtigt.

Die zweite Möglichkeit ist das Öffnen von im CAD-Modell hinterlegten Parametersätzen. Hierbei wird unter dem Hauptmenüpunkt „Bearbeiten“ der Menüunterpunkt „Tabelle“ angewählt. Die Parametersätze sind in einer Excel-Tabelle hinterlegt, die einen festgelegten Aufbau hat (s. Abb. 41).

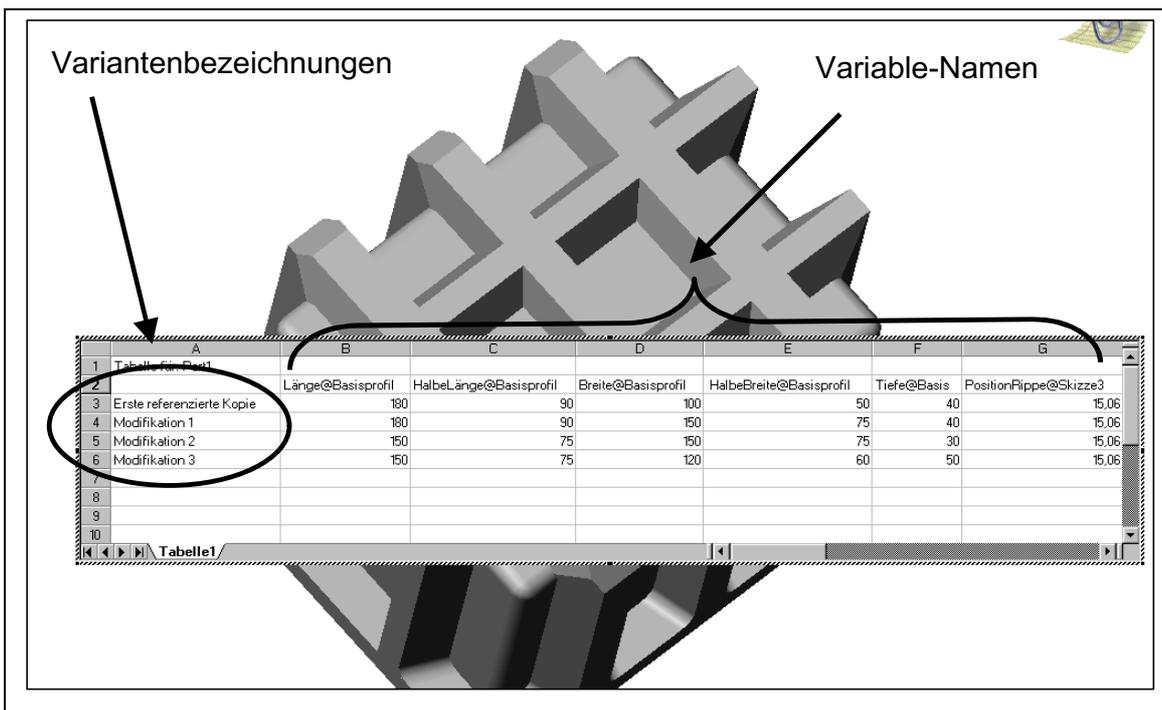


Abb. 41: Polstermodell mit Variantentabelle /Hir01/

In der zweite Zeile werden ab der Spalte B die Variable-Namen des Polstermodells angezeigt. Die Variable-Namen setzen sich aus der Bezeichnung des Arbeitsschrittes (s. linkes Fenster) und der Variable-Bezeichnung zusammen,

welche der Erzeuger des parametrisch aufgebauten Modells den einzelnen Kenngrößen in dem jeweiligen Arbeitsschritt gegeben hat. Beispielsweise ist „Länge@Basisprofil“ eine Kenngröße aus dem Arbeitsschritt „Basisprofil“. In der Spalte A sind ab Zeile 3 die Bezeichnungen der Varianten aufgeführt. In den zugehörigen Zellen sind die einzelnen Werte der Variablen aufgelistet. Hierbei kann der Anwender eine neue Variante erstellen oder Werte einer alten Variante ändern. Im rechten Fenster wird immer nur eine Variante angezeigt. Falls eine andere angezeigt und weiter bearbeitet werden soll, kann über die Menüliste links unten die Variantenübersicht bzw. der „KonfigurationsManager“ angewählt werden, in der durch Anklicken der Variantenbezeichnung die gewünschte Variante dargestellt wird.

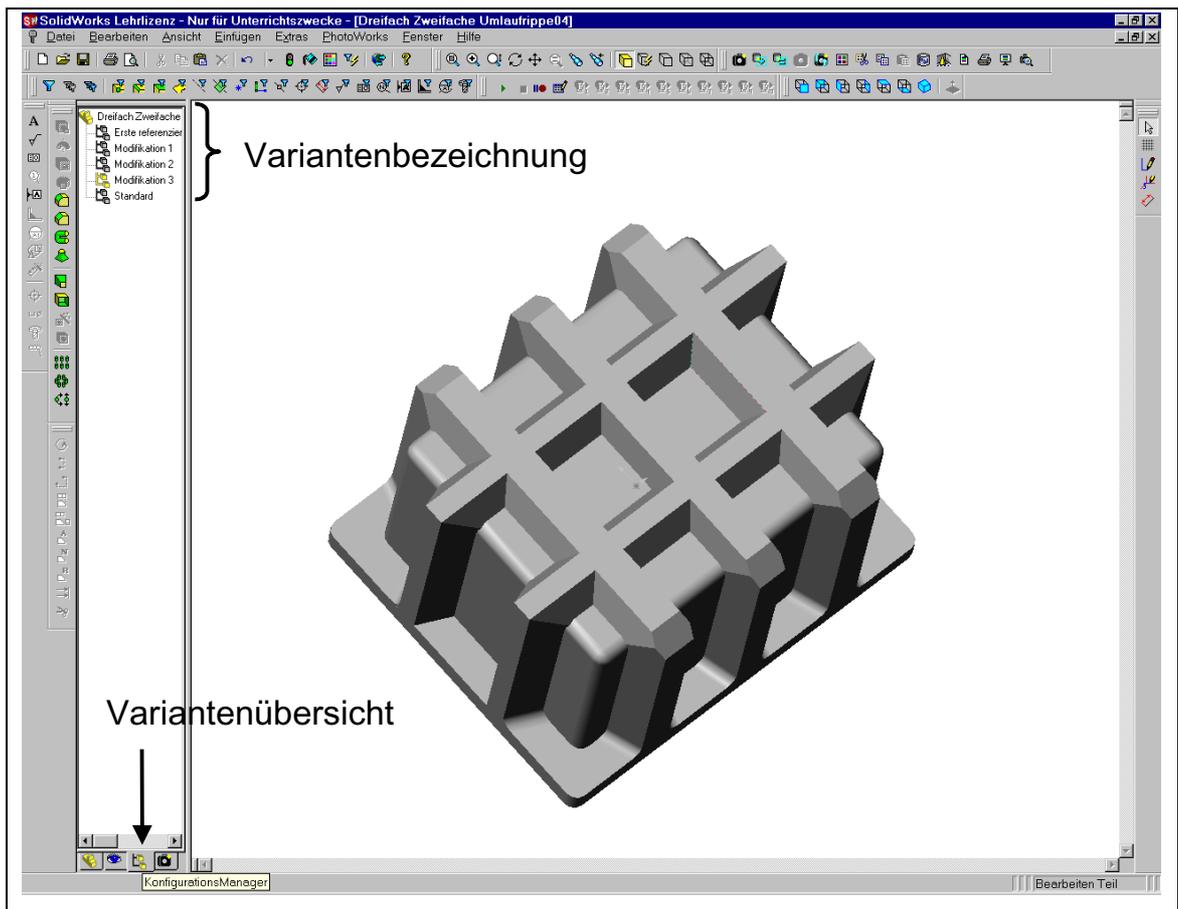


Abb. 42: Auswahl einer Variante des Polstermodells /Hir01/

Die dritte Möglichkeit ist das Einlesen von externen Excel-Tabellen. Dieses ist mit dem Punkt „Tabelle“ des Menüs „Einfügen“ möglich. Die geometrischen Werte der Tabelle können so verändert werden, dass das Polstermodell an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst ist.

Die Innenkontur des Polster kann in einem letzten Schritt über Bool'sche Operationen mit digitalen Daten des Packguts erzeugt werden. Dieser Arbeitsschritt ist der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit.

4.3. Variantenkonstruktion von geometrischen Polsterelementen

Dieser Bibliotheksteil ermöglicht dem Anwender, die häufigsten geometrischen Elemente, die bei Verpackungspolstern eingesetzt werden, einem entweder selbst erzeugten Polstermodell oder einem Polstermodell aus der Bibliothek der „Fertigen“ Verpackungspolster hinzuzufügen. Bei der hier ausgewählten 3D-Software erfolgt das Zufügen der geometrischen Polsterelemente durch folgende Schritte:

- Aufrufen des Bibliothekfensters für die elementaren Komponenten (s. Abb. 43) über den Menüpunkt „Feature Palette“ und dessen Ordner „Features“ (s. Kap. 4.2).

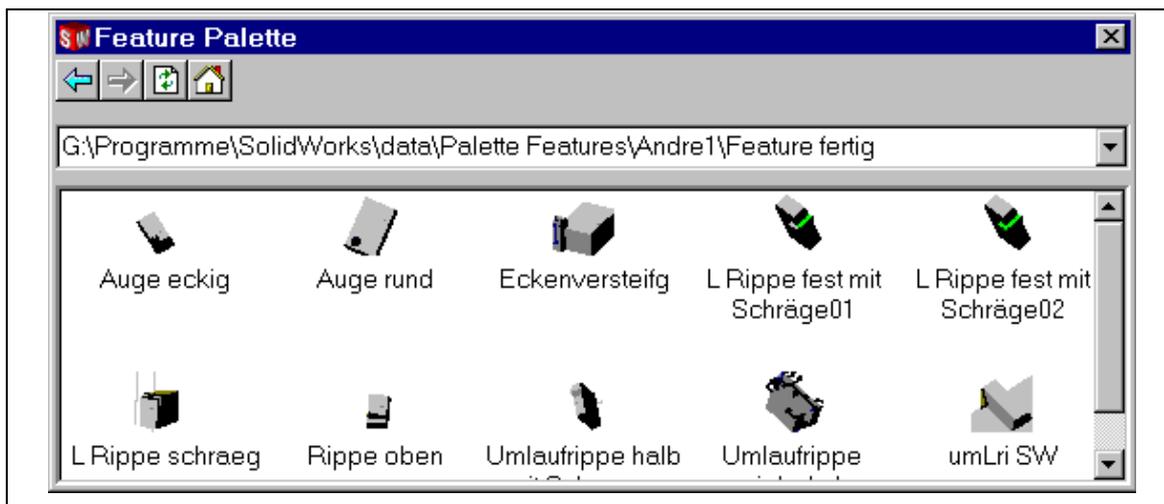


Abb. 43: Ansicht des Fensters mit den geometrischen Komponenten von Verpackungspolstern /Hir01/

- Anklicken des Piktogramms des geometrischen Elements der Bibliothek (s. Abb. 44).
- Bei gleichzeitigem Gedrückthalten der Maustaste wird der Mauszeiger auf die gewünschte Position am Polstermodell geführt.
- Es wird eine Vorschau des zugefügten Bauteils gegeben.

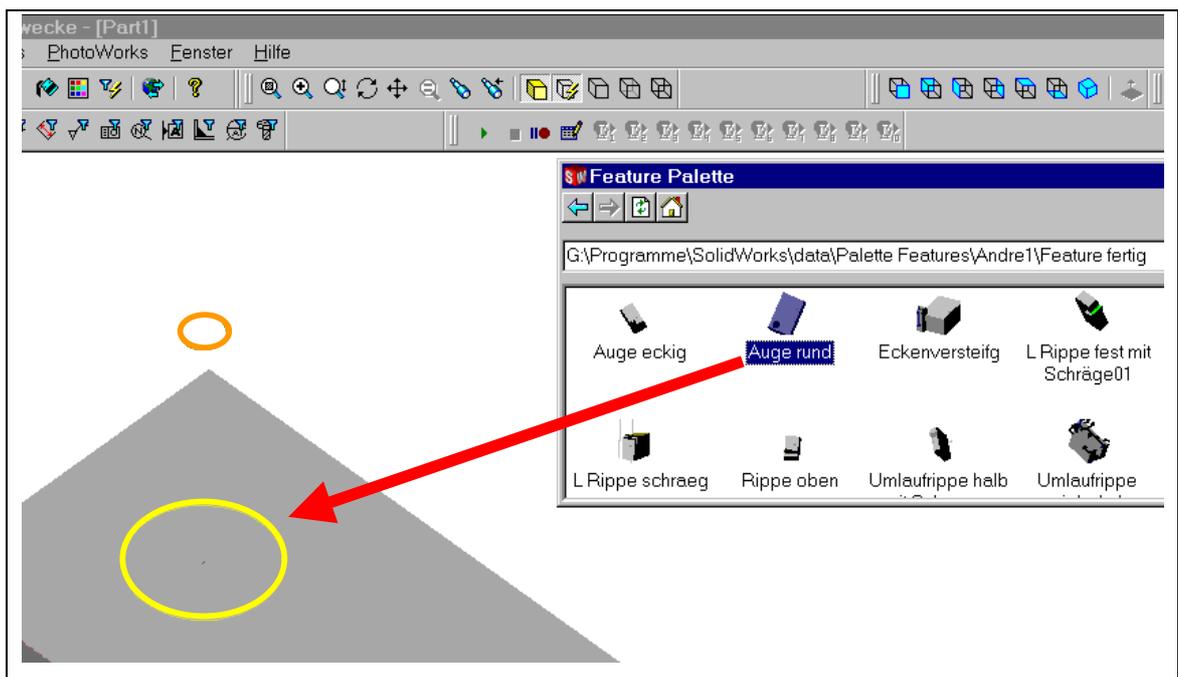


Abb. 44: Grobes Positionieren der elementaren Komponenten /Hir01/

- Beim Loslassen wird das Element angefügt, wobei gegebenenfalls entsprechende Bemaßungen zur genauen Positionierung neu definiert werden müssen. Hierbei müssen zu definierende Bezugspunkte (in Abb. 45 dargestellt) mit der Maus zu den Modellpunkten gezogen werden. Die angezeigten Werte der Abstände können nach einen Doppelklick geändert werden.

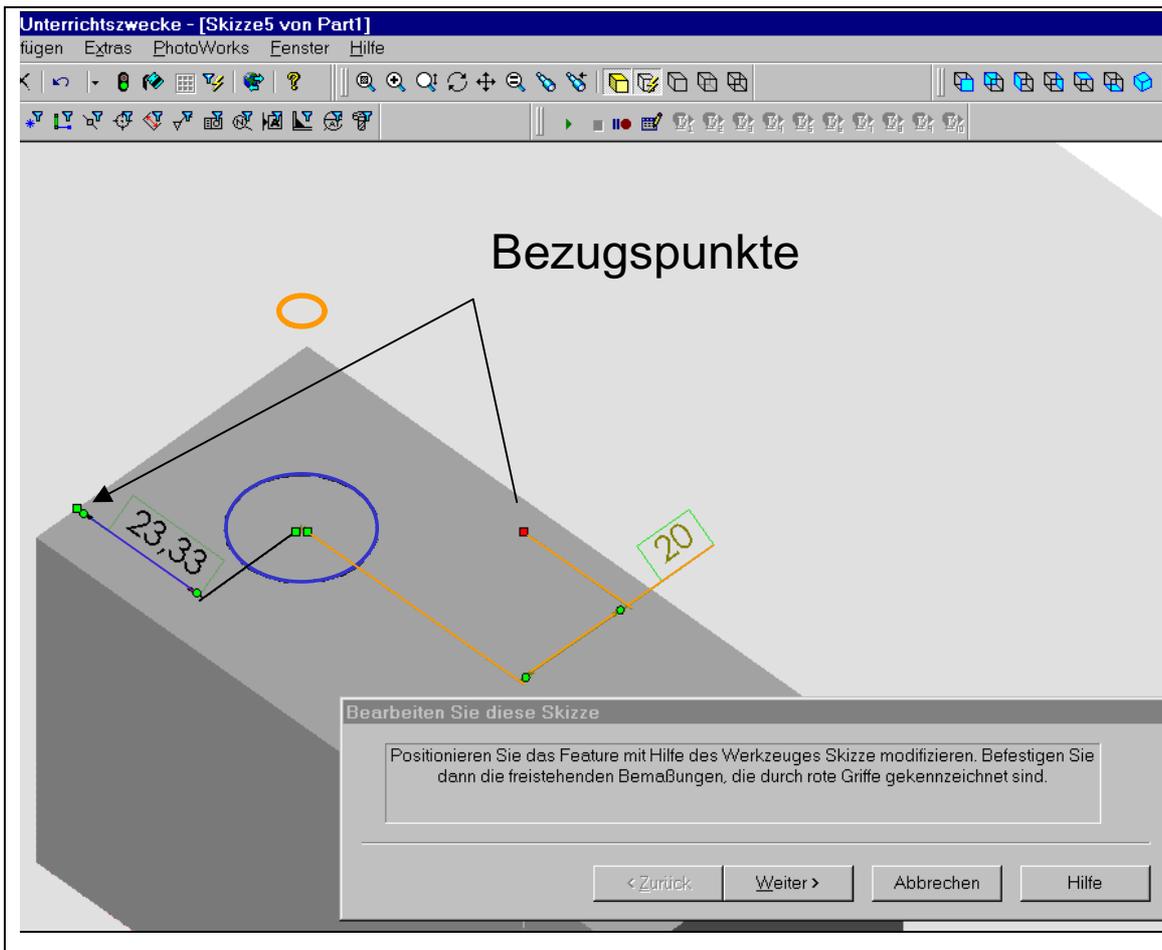


Abb. 45: Genaues Positionieren der elementaren Komponenten /Hir01/

- Abschließend werden geometrische Maße in einer Tabelle abgefragt, um das geometrische Element genau dem CAD-Modell anzupassen. Die geometrischen Größen können geändert werden, indem die Werte in der Tabelle angeklickt und überschrieben werden (s. Abb. 46).

Mit dieser Vorgehensweise können geometrische Elemente beliebig oft auf einem 3D-CAD-Modell zugefügt werden.

Zur Auswahl stehen dem Nutzer die in Tab. 8 aufgeführten geometrischen Polster-elemente.

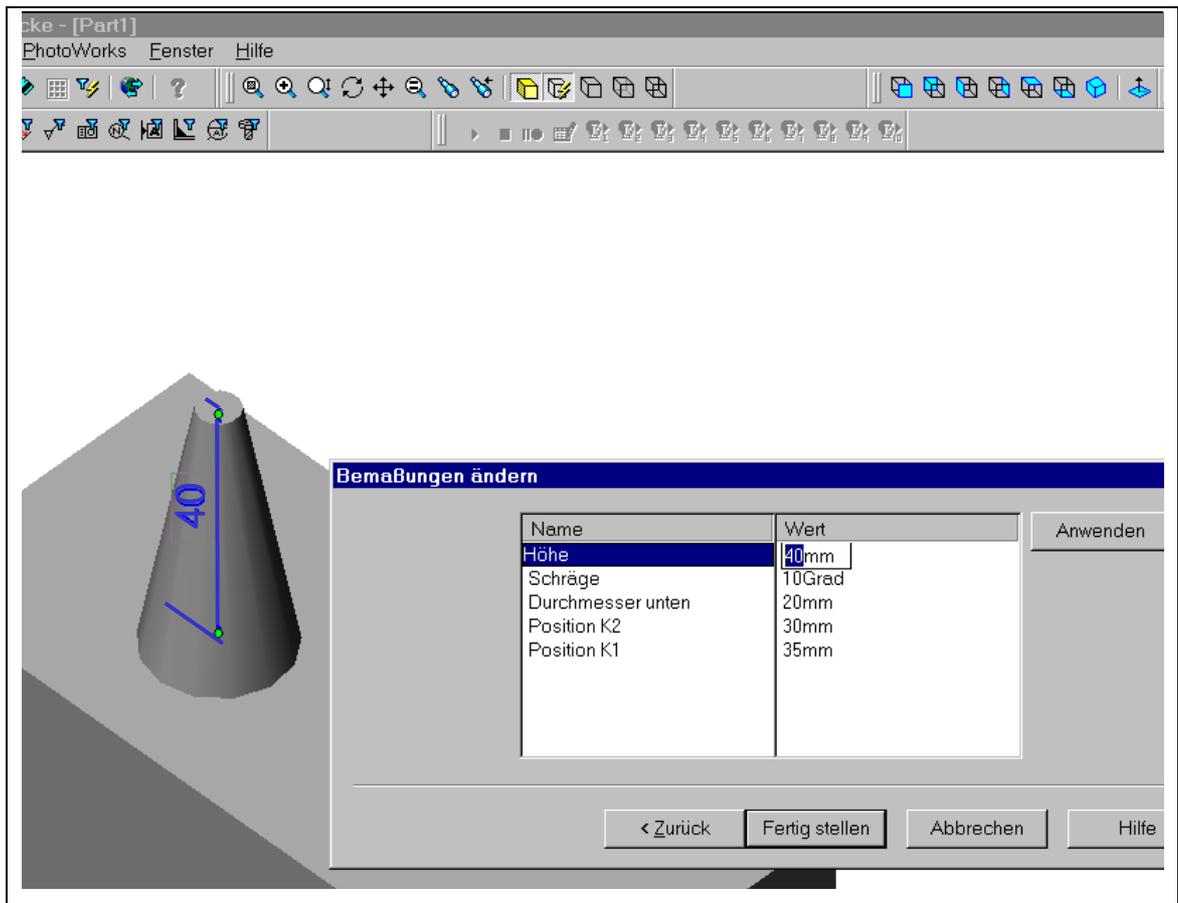


Abb. 46: Modifizierung der geometrischen Komponenten /Hir01/

Tab. 8: Übersicht über elementare Komponenten der Verpackungspolster /Hir01/

| Nr.: | Beschreibung |
|------|---|
| 1. | Noppe, zylindrisch |
| 2. | Noppe, konisch |
| 3. | Noppe, in Form eines Quaders |
| 4. | Noppe, in Form eines Trapezes |
| 5. | Rippe, in Form eines Stegs auf einer Fläche |
| 6. | Rippe, in Form einer Halbrippe |
| 7. | Rippe, in Form einer Umlaufrippe |
| 8. | Rippe, in Form einer Eckrippe |

Die Datenbank kann beliebig erweitert werden, indem neu erstellte Komponenten im Bibliotheksformat „sldfp“ in das entsprechende Verzeichnis gespeichert werden. Das Löschen von Komponenten kann durch das Löschen des Datenfiles in demselben Verzeichnis vorgenommen werden. Ferner ist der Anwender in der Lage, durch den rechten Mausklick ein ausgewähltes Bibliothekselement jederzeit zu verändern.

5. Einsatz des Reverse-Engineerings bei der Entwicklung von Verpackungs-Formteilen

Nachdem im vorhergehenden Kapitel die Möglichkeiten zur Nutzung von 3D-CAD-Systemen für die Konstruktion von komplexen Verpackungspolstern und insbesondere die sich daraus ergebenden Rationalisierungspotenziale vorgestellt wurden, widmet sich dieses Kapitel der Fragestellung, wie das Formnest, welches das zu verpackende Produkt aufnehmen soll, in diesem Polster entwickelt werden kann. Problemstellung ist dabei, dass davon ausgegangen wird, dass das zu verpackende Produkt lediglich als realer Gegenstand vorliegt und nicht als CAD-Datensatz.

Das Reverse-Engineering ist eine Technik, mit der dieses Problem gelöst werden kann. Reverse-Engineering ist in der Industrie nicht sehr weit verbreitet, und wenn, dann vorwiegend im Formen- und Modellbau. Dennoch kann diese Technik weitestgehend als bekannt vorausgesetzt werden, so dass eine Anwendung im Rahmen der Verpackungstechnik ebenfalls ohne Weiteres möglich scheint. Dennoch müssen bei der Entwicklung von Verpackungs-Formteilen eine Reihe von Randbedingungen berücksichtigt werden, die im folgenden näher vorgestellt werden.

5.1. Verpackungstechnische Rahmenbedingungen

Wie in den vorhergehenden Kapiteln verdeutlicht wurde, kann der Einsatz von 3D-CAD-Systemen die Entwicklung von Verpackungspolstern in hohem Maße beschleunigen. Ebenso konnte in Kapitel 3.2, Seite 60 ff. gezeigt werden, dass mit Hilfe moderner Sensorsysteme die Möglichkeit besteht, CAD-verwendbare Daten von real existierenden Produkten zu reverse-engineeren. Somit ist es technisch prinzipiell möglich, ein real existierendes Produkt, welches verpackt werden soll und von dem keine CAD-Daten verfügbar sind, derart aufzubereiten, dass ein digitaler Abformprozess nach Abb. 5, S. 16 möglich ist.

Von technischer Seite aus ist damit die durchgehend computergestützte Kette zur Entwicklung von Verpackungspolstern geschlossen. Somit bleibt die Frage zu klären, ob diese Techniken wirtschaftlich eingesetzt werden können, d. h.

zumindest vom zeitlichen Ablauf her die bisher eingesetzten Entwicklungstechniken manueller Natur deutlich unterbieten. Unter diesem Ansatz können einige Rahmenbedingungen formuliert werden, die maßgeblichen Einfluss hierauf haben.

1. Ziel der Digitalisierung soll ein rundum vermessenes zu verpackendes Produkt sein. Prinzipiell wäre es auch denkbar, nur die Teilbereiche eines Produktes zu digitalisieren, die für einen Abformprozess im Verpackungspolster relevant sind. Dieses würde jedoch bedeuten, dass das Verpackungskonzept, also die Idee für die Verpackung, bereits zum Zeitpunkt der Digitalisierung exakt festgelegt wäre. Aus der Praxis heraus muss dieser Ansatz verworfen werden. Gleichzeitig wäre eine Konzeptänderung in einem späteren Stadium nur mit hohem Aufwand möglich, da hierzu ein Rückschritt innerhalb der Entwicklungskette in die Phase der Digitalisierung erforderlich wäre. Um sich nicht zu früh bzgl. des Aussehens der Verpackung festlegen zu müssen und damit Flexibilität einzubüßen, wird eine Rundum-Digitalisierung gefordert.
2. Die Entwicklungszeit für ein typisches Verpackungsformteil soll im Zeitrahmen von einem Arbeitstag durchführbar sein. Werden bei dieser Forderung die Zeiten für die Entwicklung des Rohpolsters und die CNC-gesteuerte Bemusterung berücksichtigt, so verbleibt ein Zeitanteil von weniger als vier Stunden für die komplette Rundum-Digitalisierung und den anschließenden Reverse-Engineering-Prozess. Allein diese Forderung ist in den Industriezweigen, in denen Reverse-Engineering üblicherweise eingesetzt wird, nahezu unvorstellbar, da hier in Intervallen von Tagen oder sogar Wochen gerechnet wird.
3. Die Anforderungen an die Genauigkeit des Datensatzes werden im Bereich von +/- 1 mm als ausreichend angesehen. Schaumstoffe sind i. d. R. flexibel und elastisch, weshalb hier nicht mit übertrieben hohen Anforderungen

gearbeitet werden muss. Die hier geforderte Genauigkeit sollte gerade im Hinblick auf Forderung 2) eine deutliche Vereinfachung der Aufgabenstellung darstellen, da Forderungen nach hohen Genauigkeiten oftmals die Bearbeitungs- bzw. Prozesszeit bestimmen. Fachgespräche mit Herstellern entsprechender Softwaresysteme haben jedoch deutlich gezeigt, dass diese beiden Forderungen im extremen Gegensatz zu dem stehen, was in den „üblichen“ Anwendungsbereichen gefordert wird. Oftmals konnten diese Bedingungen nicht adäquat erfasst, geschweige denn mit den entsprechenden Softwaresystemen umgesetzt werden.

4. Die Datensätze des digitalisierten Objektes dürfen im CAD-System keine Hinterschneidungen erzeugen. Verpackungsformteile werden i. d. R. in zweiteiligen Werkzeugen (s. Abb. 12, S. 38) formgeschäumt, so dass hier besonders auf die Entformbarkeit bei der Serienherstellung geachtet werden muss. Das wiederum bedeutet, dass – im Gegensatz zu sonst üblichen Einsatzgebieten für Reverse-Engineering – „überflüssige“ Details weitestgehend aus dem Datensatz entfernt werden müssen, d. h. es darf kein reiner Reverse-Engineering-Prozess betrachtet werden; ein konstruktiver Anteil wird in der hier bearbeiteten Aufgabenstellung eine wesentliche Rolle spielen.
5. Die im Rahmen der Verpackungsentwicklung erzeugten CAD-Datensätze sollen im Hinblick auf eine durchgehend computergestützte Kette auch für die computergesteuerte Herstellung der Serienwerkzeuge eingesetzt werden können. Diese Anforderung steht wiederum in einem gewissen Gegensatz zu den Forderungen nach Geschwindigkeit unter Vernachlässigung der Genauigkeit, da hierdurch wiederum Mindestanforderungen an die Qualität der erzeugten Flächendatensätze gestellt werden. Nach dieser Forderung können zwar Maßabweichungen toleriert werden, unsaubere Flächen (Wellen, Schwingungen, Unstetigkeiten etc.) jedoch

nicht, da diese in einem Werkzeug aus Aluminium im Gegensatz zum Styropormuster sofort sichtbar sind.

6. Im Rahmen des Konstruktionsprozesses muss die Möglichkeit bestehen, Anpassungen am Rohpolster vorzunehmen. Der Hintergrund für diese Forderung ist in der Praxis zu suchen. Die Positionierung bspw. von Rippen ergibt sich oftmals erst dann optimal, wenn die Position des zu verpackenden Produktes in der Verpackung festgelegt ist. Erst dann ist bspw. zu erkennen, wo konstruktive Schwachstellen am Produkt vorhanden sind, an denen im Belastungsfall keine Kräfte über eine Rippe eingeleitet werden dürfen. In diesem Fall muss es möglich sein, eine Rippe von ihrer ursprünglichen Position zu verschieben oder ggf. durch Anpassung anderer Rippen die Belastungssituation günstiger zu verteilen.
7. Die Größe der im Rahmen der Verpackungsentwicklung zu digitalisierenden Gegenstände kann von wenigen Zentimetern (bspw. Handy) bis hin zu Bereichen von über einem Meter (z. B. Fernseher) reichen.

Durch diese Randbedingungen müssen bereits – betrachtet man alle Möglichkeiten zum Aufbau einer Prozesskette der computergestützten Verpackungspolsterentwicklung – einige Möglichkeiten zur Lösung der Problemstellung von vornherein verworfen werden. Durch Forderung 6 wird bereits festgelegt, dass das CAD-System, in dem die Konstruktion des gesamten Verpackungspolsters durchgeführt wird, vorzugsweise ein parametrischer Volumenmodellierer sein sollte. Damit ist wiederum festgelegt, dass zur Durchführung eines digitalen Abformprozesses nach Abb. 5, S. 16 das Datenformat des reverse-engineerten Objektes ebenfalls ein Volumenmodell (=SOLID) sein muss. Damit ist noch nicht festgelegt, wie dieses SOLID entstehen kann. Es ist jedoch klar, dass beim Reverse-Engineering-Prozess nicht bei einem STL-Datensatz abgebrochen werden kann. Diese Einschränkungen sind im Bereich des klassischen Reverse-Engineering nahezu selbstverständlich. Am Markt sind aber auch

Softwaresysteme verfügbar, die mit STL-Daten Bool'sche Operationen durchführen können. Hierdurch würde sich der Prozess der Digitalisierung und Rückführung des zu verpackendes Objektes sehr vereinfachen. Jedoch wäre es nicht mehr möglich, flexibel Änderungen an einem Rohpolster im STL-Format vorzunehmen.

5.2. Auswahl eines geeigneten Sensorsystems

Zu Beginn des Aufbaus einer durchgehend computergestützten Kette zur Entwicklung komplexer Verpackungspolster steht zunächst die Auswahl eines geeigneten Sensorsystems. Diese ergibt sich zum einen aus den in Kap. 3.2.1, S. 61 ff. vorgestellten Verfahren zur 3D-Digitalisierung (s. Abb. 23, S. 62) und zum anderen aus den in Kap. 5.1, S. 101 ff. postulierten verpackungstechnischen Rahmenbedingungen.

Die verpackungstechnische Praxis zeigt, dass der Kunde in den meisten Fällen das Produkt oder den Prototypen, welchen er dem Verpackungsentwickler kurzzeitig zur Entwicklung der Verpackungslösung überlässt, umgehend nach Abschluss des Projektes wiederhaben möchte, und zwar in einem unversehrten Zustand. Oftmals ist es sogar so, dass Prototypen für die weitere Produktentwicklung beim Kunden von so großer Bedeutung sind, dass der Kunde sie nur für einen sehr kurzen Zeitraum zur Verfügung stellen möchte. Das Abverlangen von Geheimhaltungsvereinbarungen gehört mittlerweile zum täglichen Geschäft zwischen Kunde und Verpackungsentwickler. Somit entfallen sämtliche zerstörenden Aufnahmetechniken. Passive Aufnahmetechniken finden zum größten Teil Anwendung bei der Vermessung sehr großer Gegenstände, wie Gebäuden, Landschaften etc., da hier meistens nur charakteristische Punkte erfasst werden. Demnach reduziert sich die Auswahl eines geeigneten Sensorsystems zunächst auf einen Vertreter aus dem Bereich „Aktive Aufnahmetechnik“.

Die taktilen Sensoren haben den Hauptnachteil, dass die Digitalisierungsgeschwindigkeit sehr niedrig ist, und dass diese Sensoren bei verformbaren Gegenständen nicht angewendet werden können. Taktile Messsysteme sind etwa um eine Größenordnung langsamer als optische Systeme /Bra99/. Zudem greift

das Hauptargument für die weite Verbreitung dieser Sensortypen – die hohe Messgenauigkeit – nicht, da gemäß der aufgestellten Rahmenbedingungen die Genauigkeit von untergeordneterer Bedeutung ist. Somit ist der benötigte Sensortyp in der Gruppe der nicht-taktilen Sensoren zu suchen. Geht man nun davon aus, dass medizinische Aufnahmetechniken – neben dem Nachteil der hohen Anschaffungs- und Unterhaltungskosten – ihre eigentliche Existenzberechtigung beim Reverse-Engineering dadurch haben, dass mit ihnen innere Strukturen eines Bauteils erfasst werden können, so muss man festhalten, dass für die Verpackungsentwicklung lediglich die Oberfläche bzw. Außenhülle eines Bauteils formgebend für die Verpackung ist. Somit erscheint ein Sensor aus der Gruppe der medizinischen Aufnahmetechnik ebenfalls als nicht geeignet für die hier betrachtete Aufgabenstellung.

Sensorsysteme, die nach dem Prinzip der Wellengeschwindigkeit arbeiten, werden vorwiegend – wie die meisten passiven Aufnahmetechniken – für die punktuelle Vermessung sehr großer Objekte eingesetzt oder für die Analyse von Bewegungsvorgängen. Der größte Nachteil ist jedoch darin zu sehen, dass die Gegenwart von Metall in der Messumgebung die Datenaufnahme verhindert oder extrem beeinträchtigt.

Demnach ist ein geeignetes Sensorsystem für den Einsatz in der Verpackungstechnik unter den

- optischen Systemen mit Laser,
- optischen Systemen ohne Laser, mit strukturierter Beleuchtung oder den
- optischen Systemen ohne Laser, die den Moire-Effekt ausnutzen,

zu suchen (s. Abb. 47).

Ein wesentlicher Vorteil der optischen 3D-Messtechnik liegt zudem in der Möglichkeit, die Position des Sensors zum Messobjekt aus den Messdaten selbst zu bestimmen, so dass auf ein hochgenaues Führungssystem verzichtet werden

kann. Dazu können Passmarken bzw. Referenzkörper (z. B. Kugeln) verwendet werden, die am Objekt oder in dessen Umgebung angebracht werden /Bre99/.

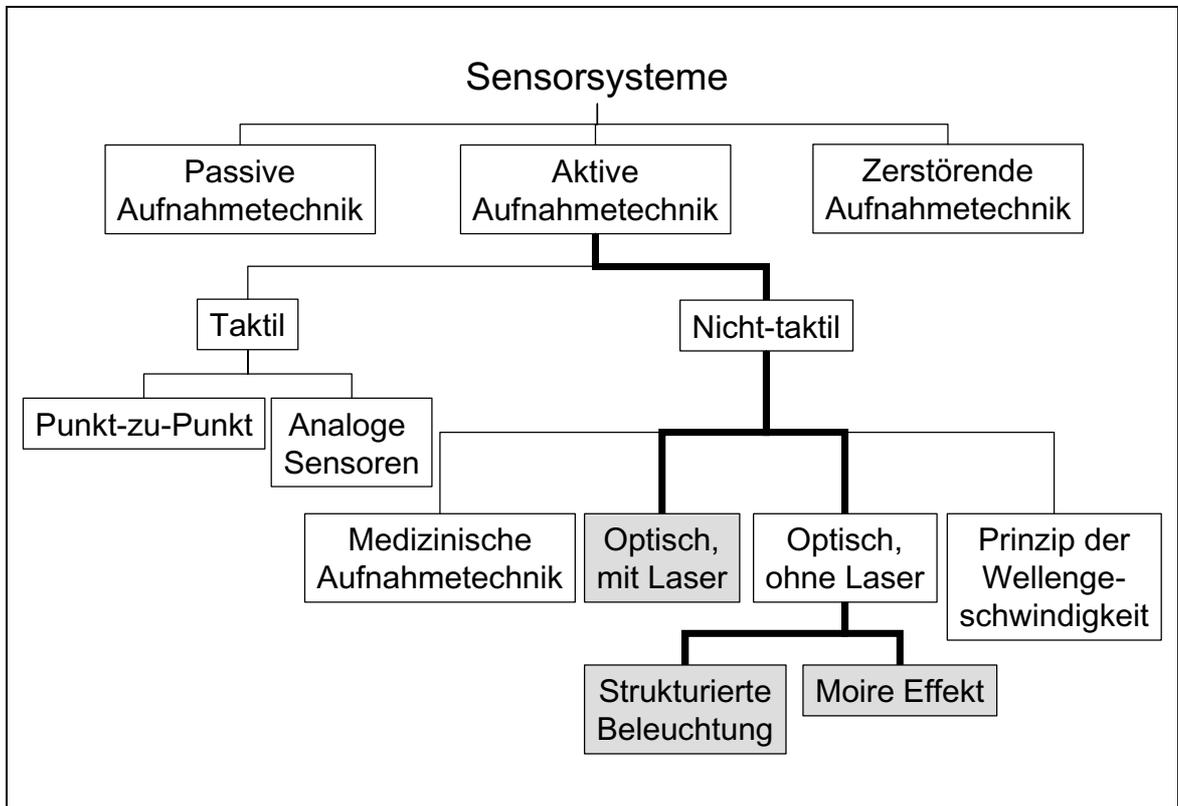


Abb. 47: Systematische Gliederung von Sensorsystemen zur 3D-Digitalisierung nach /Ber99/

5.2.1. Technische Anforderungen an das Sensorsystem

Da das erste Glied in der Kette des Reverse-Engineering-Prozesses das Sensorsystem ist, wird hier auch bereits der Grundstein für das später zu erwartende Ergebnis in Form eines Formnestes in einem komplexen Verpackungspolster gelegt. Das durch das Sensorsystem erzeugte digitale Abbild des zu verpackenden Produktes muss eine Qualität aufweisen, mit der es möglich ist, die im Rahmen der Verpackungstechnik aufgestellten Rahmenbedingungen (s. Kap. 5.1, S. 101 ff.) zu erfüllen. Hierbei ist ein Kompromiss zu finden zwischen den vergleichsweise geringen Anforderungen an die Abweichung zwischen realem Objekt und rückgeführtem Solid (+/- 1 mm wird als aus-

reichend angesehen) und der erforderlichen Qualität des Solids im Hinblick auf die Verwendung für den Werkzeugbau.

Dieser Kompromiss stellt Anforderungen hinsichtlich der technischen Möglichkeiten eines Sensorsystems dar. Ebenso dürfen dabei aber auch wirtschaftliche Aspekte nicht außer Acht gelassen werden. Hierzu zählen zum einen der Anschaffungspreis für ein Sensorsystem, zum anderen aber auch der Workflow innerhalb der gesamten Kette des Reverse-Engineering-Prozesses, der z. T. Einfluss auf den Anschaffungspreis haben kann.

Unter technischen Gesichtspunkten kann ein Sensorsystem zunächst daran gemessen werden, mit welcher Genauigkeit es digitalisieren kann. Ausschlaggebend hierfür ist zum einen das Messvolumen, welches ein Sensorsystem bei einer Messaufnahme erfassen kann, und zum anderen die in diesem Volumen zu erzielende Messauflösung und Messgenauigkeit.

Das Messvolumen setzt sich aus einem Sichtfenster zusammen, worunter eine Fläche (x-, y-Richtung) verstanden wird, die ein Sensor in einer Messeinstellung erfassen kann, und aus einer Tiefenrichtung (z-Richtung), in der die Optik des Sensorsystems das Bild noch scharf abbilden kann (s. Abb. 48).

Die Messauflösung und Messgenauigkeit resultieren aus den optischen Eigenschaften des Sensorsystems und ergeben sich aus dem Auflösungsvermögen seiner Auswerteeinheit. Diese Auswerteeinheit besteht bei den meisten Sensorsystemen aus einer CCD¹⁰-Kamera, auf deren CCD-Chip das Sichtfenster bzw. das Messvolumen abgebildet wird. Der CCD-Chip besteht wiederum aus einer Matrix von lichtempfindlichen Pixeln, wobei die Intensität, mit der jedes Pixel belichtet wurde, digital ausgelesen werden kann. Dem entsprechend wird das Auflösungsvermögen einer CCD-Kamera in Pixeln – jeweils in horizontaler und vertikaler Richtung – ausgedrückt (z. B. 200 x 200 Pixel oder 768 x 512 Pixel).

¹⁰ CCD = Charged Couple Device

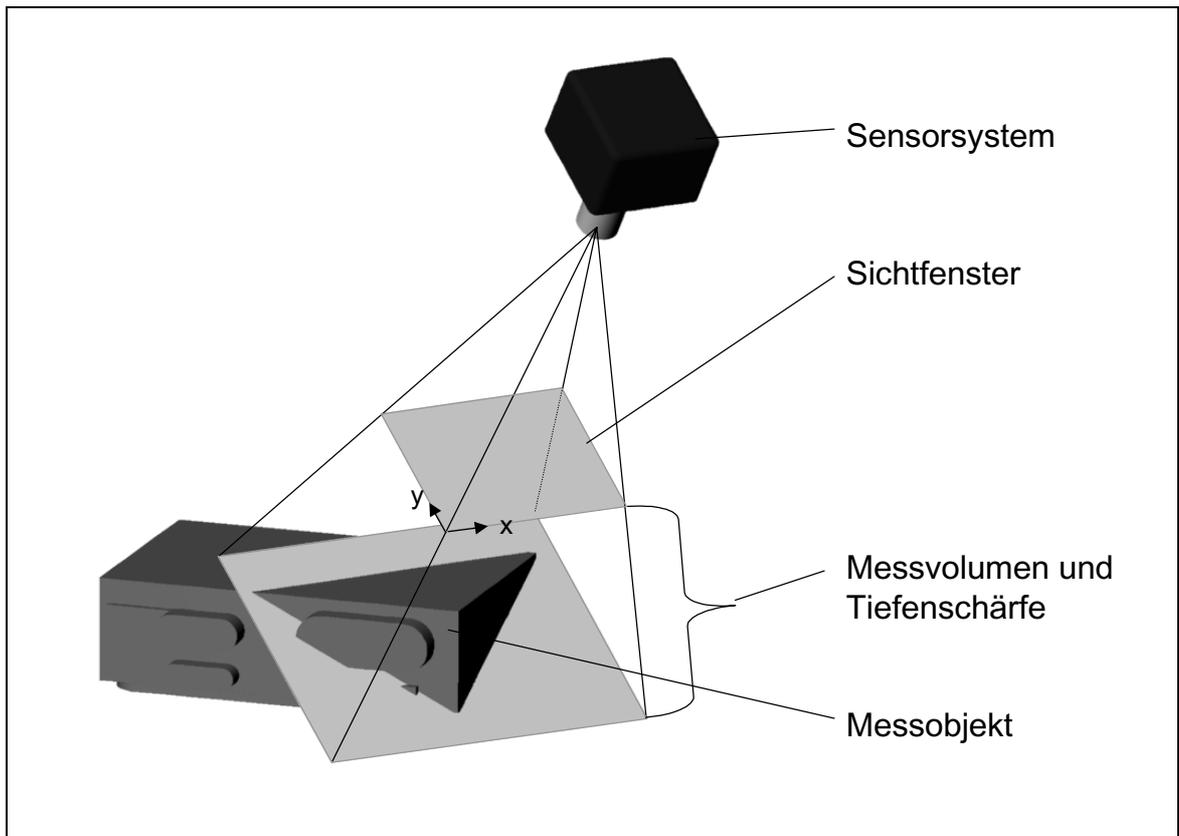


Abb. 48: *Prinzipdarstellung des Messvolumens eines optischen Sensorsystems*

Die Messauflösung eines Sensorsystems wird in der Regel in lateraler Richtung angegeben und beschreibt den Abstand von zwei benachbarten Messpunkten. Die Messgenauigkeit wird in Tiefenrichtung angegeben und beschreibt die Abweichung der gemessenen z-Koordinate von dem tatsächlichen Wert. Vereinfacht lässt sich dieser Zusammenhang in Abb. 49 anhand einer idealen Ebene und den digitalisierten Messpunkten verdeutlichen.

Die Auflösung in lateraler Richtung ergibt sich durch den Abstand zweier benachbarter Messpunkte; die Messgenauigkeit in Tiefenrichtung ergibt sich aus dem Maximum bzw. dem Mittelwert der Abweichung der Messpunkte von der tatsächlichen Ebene.

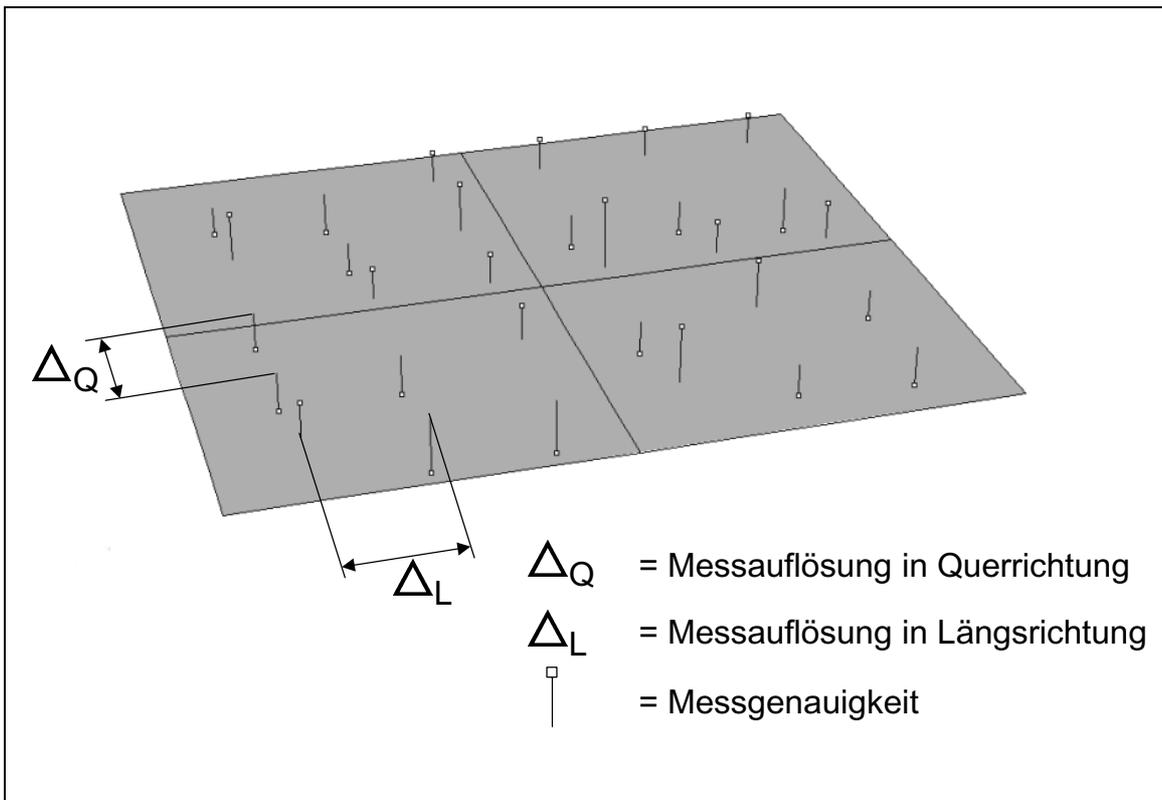


Abb. 49: Prinzipdarstellung der Messauflösung und Messgenauigkeit

Bei vielen optische Sensorsystemen kann das Sichtfeld bzw. das Messvolumen verstellt werden, so dass der Nutzer die Möglichkeit hat, je nach Anwendungsfall oder Objektgröße ein geeignetes Sichtfenster auszuwählen. Da sich die Auswerteeinheit im Sensorsystem nicht ändert, ist verständlich, dass sich die Messauflösung und Messgenauigkeit entsprechend ändern müssen. D. h. je größer das Messvolumen eingestellt wird, um so größer wird der Abstand zweier benachbarter Messpunkte und je größer wird die Messungenauigkeit in Tiefenrichtung. Zudem muss bei optischen Sensorsystemen mit strukturierter Beleuchtung darauf geachtet werden, dass das Objekt über den gesamten Tiefenbereich beim Scanvorgang mit dem optischen Gitter ausgeleuchtet werden kann, da das Messvolumen ansonsten nicht nur durch die Abbildungseigenschaften der eingesetzten Optik bestimmt wird, sondern auch durch Möglichkeit der Beleuchtung eingeschränkt wird (vgl. /Tiz99/). Gute Sensorsysteme lösen dieses Problem dadurch, dass ein und dasselbe optische Gitter

mit mehreren Belichtungszeiten nacheinander erfasst wird. Bei der ersten Belichtungszeit werden die vorne liegenden Objektbereiche erfasst. Für die hinteren Bereiche reicht die Belichtung nicht aus; sie werden nicht erfasst. Bei der nachfolgenden Belichtungszeit werden die vorderen Bereiche überbelichtet und somit nicht erfasst; die in der vorhergehenden Belichtung nicht erfassten hinteren Bereiche des Objektes werden nunmehr aber registriert. Somit kann durch die Wahl mehrerer Belichtungszeiten das komplette Messvolumen in Tiefenrichtung ausgeleuchtet und erfasst werden.

Auf der einen Seite sind nunmehr Rahmenbedingungen von Seiten der Verpackungstechnik vorgegeben worden, auf der anderen Seite stehen technische Parameter eines Sensorsystems (Messvolumen, Messauflösung, Messgenauigkeit etc.), die im Zusammenhang mit diesen verpackungstechnischen Rahmenbedingungen stehen. Es bleibt nunmehr zu klären, in welchen konkreten Bereichen sich die technischen Parameter bewegen müssen, so dass die verpackungstechnischen Rahmenbedingungen erfüllt werden können. Zur Ermittlung dieser technischen Parameter – und damit zum Vergleich der Sensorsysteme untereinander – wurde ein Referenzobjekt ausgewählt und mit verschiedenen Sensorsystemen und technischen Parametern digitalisiert. Die Ergebnisse dieser Digitalisierung wurden anschließend im Hinblick auf die Möglichkeit zur Weiterverarbeitung hin zu einem Solid-Modell bewertet, so dass daraus letztendlich Empfehlungen für die erforderlichen Wertebereiche der technischen Parameter gegeben werden können.

Da die Angaben der Hersteller von Sensorsystemen zu den technischen Parametern oftmals untereinander nicht vergleichbar sind, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein eigenes Verfahren zur Bestimmung der technischen Parameter eingesetzt. Es wurde eine Spiegelkachel benutzt, von der angenommen werden kann, dass sie im Rahmen üblicher Produktionsbedingungen besonders eben, glatt und nicht verzerrt ist, so dass sie einer idealen Ebene recht nahe kommt. Um diese Spiegelkachel digitalisieren zu können, wurde sie mit Sprüh-

kreide behandelt. Die sich hierdurch zwangsläufig ergebende Rauigkeit führt zu einem „Grundrauschen“ in den Digitalisierdaten, welches jedoch im Verhältnis zur erreichbaren Messgenauigkeit vernachlässigt werden kann.

Die so vorbehandelte Spiegelkachel wurde im folgenden mit jedem benutzten Sensorsystem digitalisiert, wobei die Kachel parallel zum Sichtfenster des Sensorsystems ausgerichtet wurde. Aus den Digitalisierdaten konnte anschließend der Abstand der Messpunkte und somit die Messauflösung bestimmt werden. Ebenso wurde der Mittelwert (μ) für den Abstand aller Messpunkte von einer idealen Ebene und die Standardabweichung (σ) berechnet. Die Messgenauigkeit wurde hieraus zu $\pm 3\sigma$ mm bestimmt, wobei durch die Wahl der Intervallgrenze 3σ erreicht wird, dass 99,7 % aller Messwerte in diesem Intervall liegen.

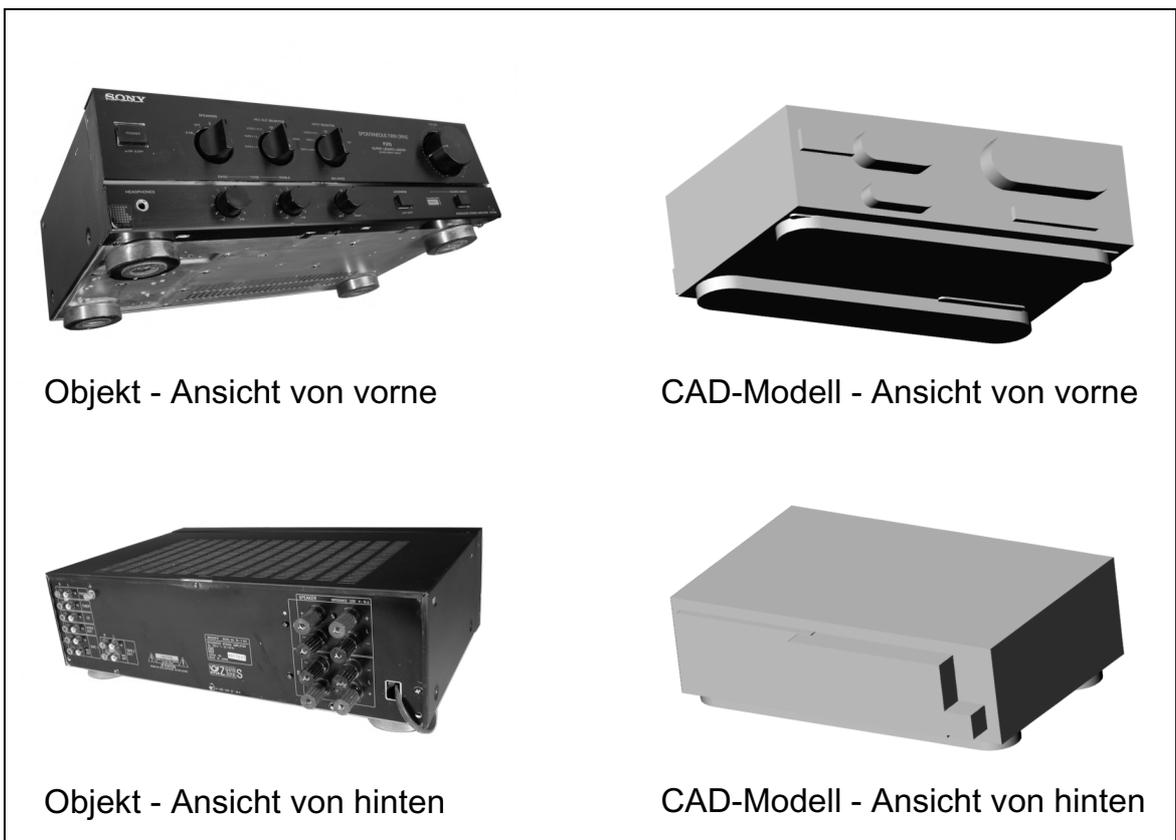
Als Referenzobjekt, an dem die Güte der Digitalisierdaten beurteilt werden soll, wurde ein HiFi-Verstärker (s. Abb. 50) gewählt.



Abb. 50: Referenzobjekt: HiFi-Verstärker

Unter Beachtung der im Rahmen dieser Arbeit verfolgten Zielstellung, möglichst schnell und effektiv einen realen Gegenstand durch einen Reverse-Engineering-Prozess in einen für die Verpackungstechnik verwertbaren 3D-CAD-Daten-

satz (s. Abb. 51) zu wandeln, ist dieses Objekt nur bedingt geeignet. Da dieser Verstärker – abstrakt betrachtet – nur aus Regelgeometrien wie Kuben und Zylindern besteht, würde man hier sicher auf dem konstruktiven Wege, d. h. durch Ausmessen von Längen und Durchmessern und anschließendes Konstruieren und Positionieren in einem geeigneten CAD-System, wesentlich schneller zum Ziel gelangen als durch den Einsatz eines 3D-Scanners.



*Abb. 51: 3D-CAD-Modell des Referenzobjektes unter Berücksichtigung
verpackungstechnischer Rahmenbedingungen*

Dennoch eignet sich dieses Objekt gerade für den Test verschiedener Digitalisiersysteme, da es über wesentliche Merkmale verfügt, die an ein Sensorsystem besonders hohe Anforderungen stellen.

Zum einen ist die Oberfläche metallisch-schwarz, teilweise sogar reflektierend, so dass ohne ein Vorbehandeln bspw. durch weiße Sprühkreide die wenigsten optischen Sensorsysteme überhaupt in der Lage wären, hiervon Daten zu

erfassen. Zum zweiten verfügt das Objekt hauptsächlich über scharfe Kanten, die eine besondere Herausforderung für ein Sensorsystem darstellen (vgl. Kap 3.2.1.2, S. 63 ff.). Und zum dritten bestehen die meisten Flächen aus Ebenen, so dass Messungenauigkeiten hier besonders deutlich auffallen.

Abb. 52 zeigt das Ergebnis einer Digitalisierung mit einem optischen Laser-Sensorsystem, welche mit einem Sichtfenster von 1100 mm x 1100 mm durchgeführt wurde. Die Größe des Sichtfensters ist von Vorteil, da in jeder Orientierung das Objekt komplett vom Sensor erfasst wird. Es müssen also vergleichsweise wenige Orientierungen gewählt werden, um das Objekt rundum zu erfassen. Die aus dem großen Messvolumen resultierende Messauflösung lag bei ca. 5,5 mm bei einer Messgenauigkeit von ca. +/- 3 mm.

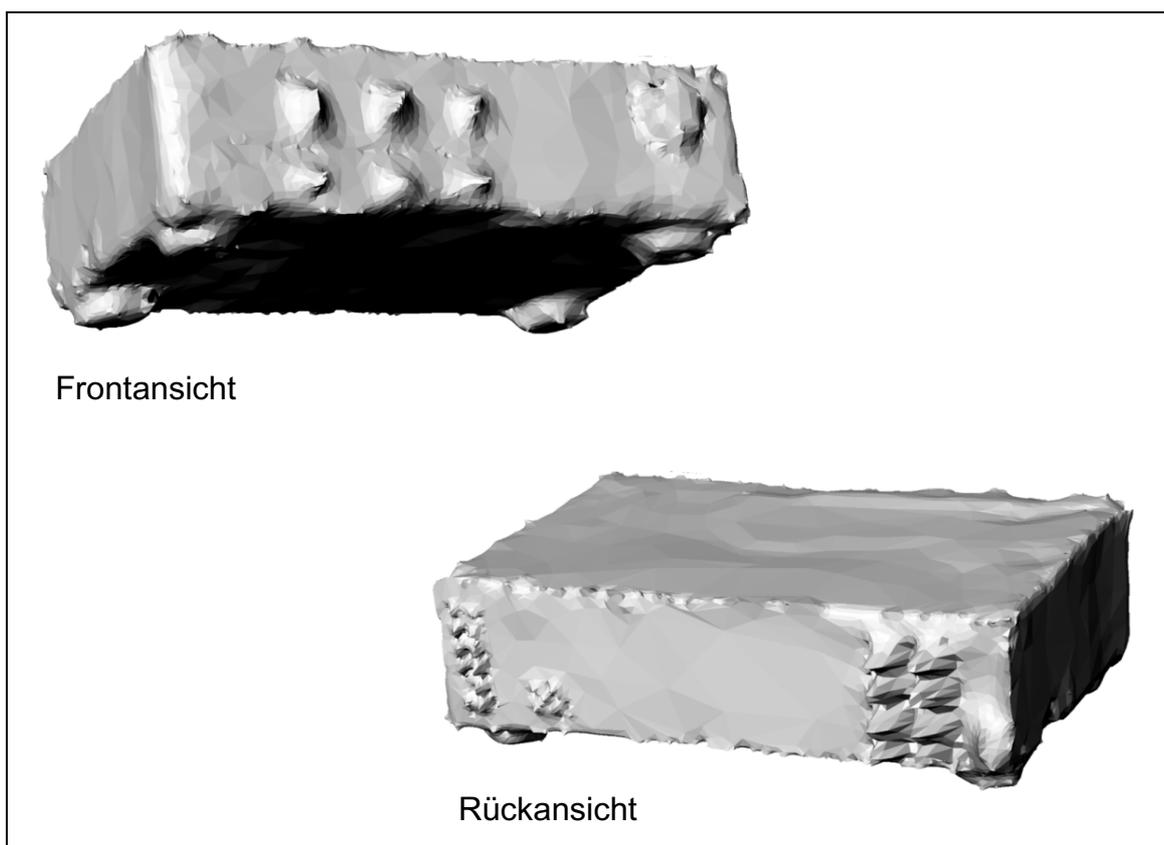


Abb. 52: Digitalisierung mit Sichtfeld 1100 mm x 1100 mm, Messauflösung: ca. 5,5 mm, Messgenauigkeit: ca. +/- 3 mm

Es ist deutlich zu sehen, dass dieses Ergebnis für einen Reverse-Engineering-Prozess nicht verwertet werden könnte. Die Detailauflösung von ca. 5,5 mm insbesondere im Bereich der Bedienelemente und der scharfen Kanten ist in keinem Fall ausreichend. Ebenso sind die Messungenauigkeiten im Bereich der ebenen Flächen deutlich zu sehen.

Die Abbildungen Abb. 53 und Abb. 54 zeigen zum Vergleich die Ergebnisse von Digitalisierungsprozessen am selben Referenzobjekt, wobei hier deutlich die qualitativen Unterschiede im Vergleich zu Abb. 52 zu sehen sind. Diese Digitalisierungen wurden mit einem optischen System auf Basis strukturierter Beleuchtung durchgeführt, wobei das Messprinzip hier keine Auswirkungen auf die Qualität des Ergebnisses hat.

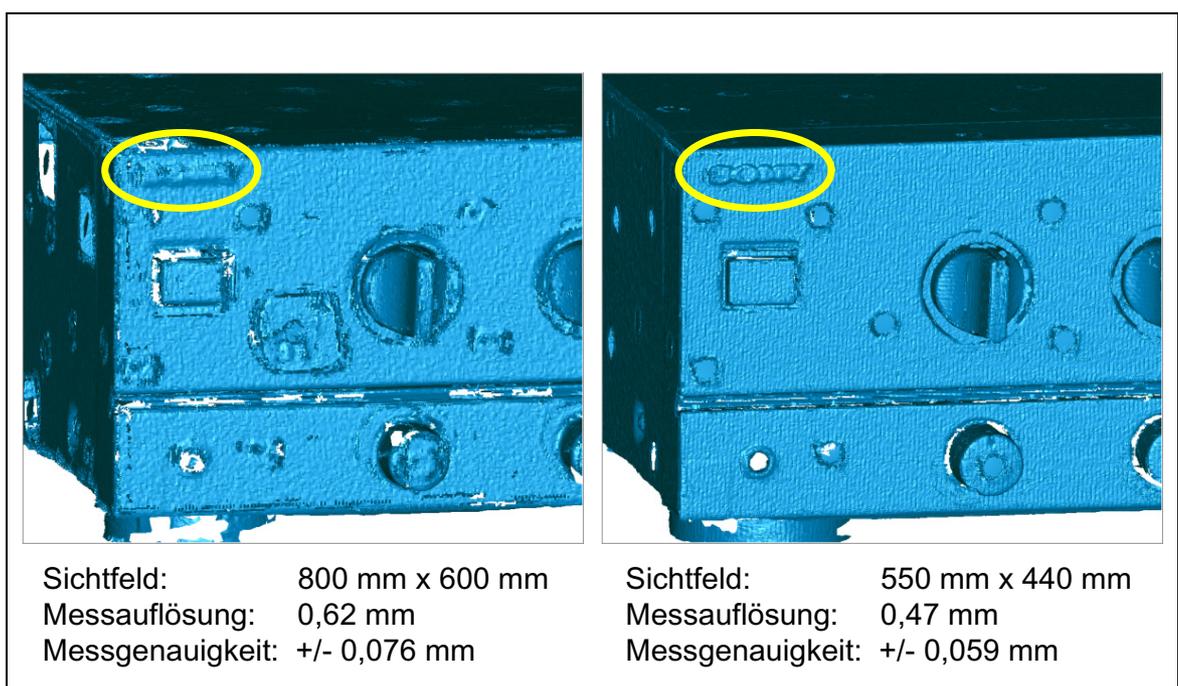


Abb. 53: Digitalisierung mit verschiedenen gröberen Messauflösungen und -genauigkeiten

Selbst die Messauflösung und -genauigkeit der Digitalisierung, die sich bei diesem Sensorsystem aus einem Sichtfeld von 800 mm x 600 mm ergibt, kann im Hinblick auf die verpackungstechnische Zielsetzung noch als vollkommen

ausreichend angesehen werden. Die hier sichtbaren Lücken in der Digitalisierung resultieren prinzipbedingt aus dem resultierenden Winkel zwischen Projektor und Kamera zum Erreichen eines so großen Sichtfensters. Durch den relativ großen Triangulationswinkel ergeben sich häufig Schattenbereiche, die entweder vom Projektor nicht belichtet werden oder umgekehrt von dem Kamerasystem optisch nicht mehr erfasst werden können (vgl. hierzu auch Kap. 3.2.1.2, S. 68).

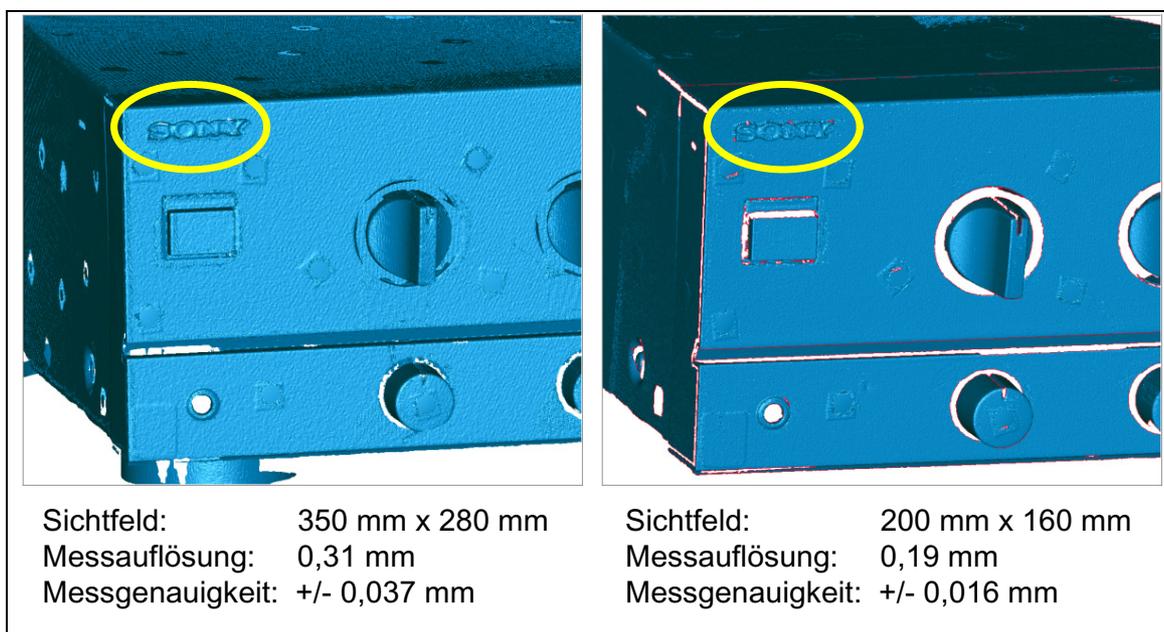


Abb. 54: Digitalisierung mit verschiedenen feineren Messauflösungen und -genauigkeiten

Abb. 54 zeigt die Ergebnisse der Digitalisierung desselben Verstärkers mit noch kleineren Sichtfenstern und sich daraus ergebenden höheren Messauflösungen und -genauigkeiten. Die Erhöhung dieser Parameter kommt einem nachfolgenden Reverse-Engineering-Prozess sicherlich zugute, jedoch führt ein sehr kleines Sichtfenster wie z. B. 200 mm x 160 mm dazu, dass zur Rundumvermessung des gesamten Objektes sehr viele Einzelaufnahmen durchgeführt werden müssen. Da diese Aufnahmen in einem Koordinatensystem vereint werden müssen (Merging, vgl. Kap. 5.3.1, S. 118 ff.), entsteht hierdurch ein sehr hoher Arbeitsaufwand. Selbst wenn der Schritt des Mergens automatisch

anhand von Referenzobjekten (s. Abb. 57, S. 123) durchgeführt wird, resultiert daraus, dass die Referenzobjekte in einer sehr hohen Dichte bzw. geringen Abständen appliziert werden müssen, was wiederum zu einem sehr hohen Vorbereitungsaufwand führt.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass eine Messauflösung im Bereich von 0,5 mm bei einer Messgenauigkeit von $\pm 0,1$ mm - gemessen nach dem zuvor bestimmten Verfahren – für die hier verfolgte Zielstellung als vollkommen ausreichend angesehen werden kann. Prinzipiell ist es von Vorteil, ein möglichst großes Messvolumen bzw. Sichtfenster einsetzen zu können. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass der Triangulationswinkel nicht zu groß wird, so dass sich hierdurch ausgeprägte Schattenbereiche ergeben. Wird der Triangulationswinkel jedoch verkleinert, resultiert daraus automatisch eine Verschlechterung der Messgenauigkeit. Hier ist also ein geeigneter Kompromiss zu finden.

Ideal ist es, wenn es mit den Parametern eines Sensorsystems möglich ist, bspw. ein Handy in ausreichender Genauigkeit zu digitalisieren, aber auch mit relativ wenigen Orientierungen bspw. einen Monitor rundum zu erfassen, ohne das Sensorsystem auf ein größeres Sichtfeld umkalibrieren zu müssen, vorausgesetzt das Sensorsystem bietet überhaupt die Möglichkeit, umkalibriert zu werden.

5.2.2. Anforderungen an das Produkt bzgl. Oberflächenbeschaffenheit und an die Umgebungsbedingungen

Wie fast jedes andere Messverfahren unterliegt auch die optische Messtechnik gewissen Einschränkungen, die aus dem Messprinzip resultieren und die auch durch eine optimale Systemkonzeption nur in begrenztem Maße reduziert werden können. So ist sie – anders als taktile Verfahren – abhängig von den Reflexionseigenschaften der zu vermessenden Oberfläche, z. B. bei metallischen oder keramischen Werkstoffen. Reflektierende Oberflächen können von optischen Systemen kaum erfasst werden. In der Praxis wird dieses Problem

oftmals durch Einsprühen des Messobjektes mit Sprühkreide gelöst. Diese Sprühkreide verleiht dem Objekt eine helle und matte Oberfläche für die Dauer des Messvorganges und kann anschließend ohne große Probleme wieder vom Objekt entfernt werden. Zudem ermöglichen optische Verfahren die Erfassung von Werkstücken mit weicher oder heißer Oberflächenstruktur.

Eine weitere Einschränkung der optischen Messsysteme liegt in der Verwendung von strukturiertem oder gebündeltem/kohärentem Licht, woraus eine Empfindlichkeit gegenüber Umgebungslicht resultiert. In den meisten Fällen können jedoch mit relativ einfachen Mitteln Vorkehrungen getroffen werden, um den Einfluss von Fremdlicht zu reduzieren /Bre99/. In den meisten Fällen beschränkt sich die Beeinträchtigung auf den direkten Einfall von Sonnenlicht, so dass aus praktischen Erfahrungen berichtet werden kann, dass der Einsatz eines optischen Systems selbst unter Ausstellungsbedingungen auf einer Fachmesse einwandfrei möglich war.

5.3. Von den Messwerten zur Punktwolke (pre-prozessing)

Um eine rundum geschlossene Punktwolke eines Objektes zu erhalten, die von der Qualität ist, dass sie als Ausgangsbasis für einen Reverse-Engineering-Prozess geeignet ist, müssen die Messergebnisse zunächst aufbereitet werden. Dieser Schritt wird als pre-prozessing bezeichnet. Mögliche Arbeitsschritte im Rahmen des pre-prozessing werden im folgenden vorgestellt.

5.3.1. Merging

Mit Hilfe eines optischen Sensorsystems kann ein Objekt sehr präzise digitalisiert werden. Sieht man von einigen – sehr teuren – Anlagen ab, so ist es mit typischen Systemkonfigurationen jedoch nicht möglich, ein Objekt in einem Schritt rundum zu erfassen. Um ein komplettes digitales Abbild eines Bauteils zu erhalten, ist es somit notwendig, das Bauteil unter verschiedenen Orientierungen zu digitalisieren, wobei jede Orientierung eine eigene Punktwolke liefert. Vergleichbar sind derartige Sensorsysteme mit einer Fotokamera, wobei das Resultat jedoch Punktwolken und keine Fotos sind.

Alle Punktwolken müssen anschließend in ein Koordinatensystem überführt werden, um eine vollständige Digitalisierung des gesamten Bauteils zu erhalten. Diese Gesamtpunktwolke enthält sämtliche Messpunkte aus den Einzelsichten, wobei sehr viele Messpunkte redundant sind, bspw. durch Bereiche, in denen sich einzelne Punktwolken überlappen /Ber99/.

Die Aufgabe, die Teilpunktwolken der verschiedenen Orientierungen in ein Koordinatensystem zu überführen und damit eine allumfassende Gesamtpunktwolke des zu digitalisierenden Objektes zu erhalten, wird von den einzelnen Softwaresystemen z. T. sehr unterschiedlich gelöst. Dieser Aufgabe kommt im Hinblick auf die in Kap. 5.1, S. 101 ff. beschriebenen verpackungstechnischen Rahmenbedingungen - was die Durchlaufzeiten für einen Reverse-Engineering Prozess angeht - eine besondere Bedeutung zu.



Abb. 55: Kopplung von optischen Sensorsystemen mit positionsbestimmenden Maschinen

Es können prinzipiell drei Ansätze verfolgt werden:

Beim ersten Ansatz wird das optische Sensorsystem mit einer Koordinatenmessmaschine, einer CNC-gesteuerten Fräsmaschine oder anderen linearen

und rotativen Führungselementen gekoppelt (s. Abb. 55), so dass die Orientierung des Sensors zum zu digitalisierenden Objekt stets eindeutig definiert ist. Im einfachsten Fall wird ein einfacher Drehteller benutzt, der digital angesteuert werden kann.

Diese Art der Steuerung eines optischen Sensors hat den Vorteil, dass die Teilaufnahmen der Digitalisierung z. T. automatisch in ein übergeordnetes Koordinatensystem transformiert werden können. Als nachteilig muss angesehen werden, dass es trotzdem nicht möglich sein wird, sämtliche erforderlichen Orientierungen, um ein Objekt rundum zu digitalisieren, mit diesen Positioniersystemen in einer Aufspannung anzufahren. In der Regel haben CMM oder Fräsmaschinen nur drei Bewegungs-Freiheitsgrade, ggf. zuzüglich einem vierten durch einen Drehteller; die Neigung des Sensors zum Objekt könnte jedoch erst durch eine 5-Achsen-Maschine befriedigend eingestellt werden. Selbst damit wäre es jedoch kaum möglich, bspw. die Unterseite des in Abb. 55, rechts, dargestellten Modellautos zu digitalisieren. Das heißt, dass es trotz der erheblichen Kosten für diese „Trägersysteme“ immer noch erforderlich wäre, mehrfach umzuspannen, um eine Rundum-Digitalisierung zu erhalten, und dass immer noch einige Punktwolken vorlägen – jeweils eine pro Orientierung der Umspannung -, die nicht in einem übergeordneten Koordinatensystem zu einer Punktwolke zusammengefasst wären. Zudem können derartige Messsysteme nur stationär betrieben werden.

Unter Beachtung dieser Nachteile und des Kostenaspektes erscheint ein Drehteller noch als kostengünstigste Alternative. Sensorsysteme, die mit einem frei beweglichen Sensor arbeiten und einem Drehteller, der zunächst ohne Bezug zum Sensor im Raum positioniert sein kann, bieten ähnliche Möglichkeiten, ohne jedoch extrem hohe Zusatzkosten zu verursachen; zudem besteht die Möglichkeit, solche Systeme auch mobil einzusetzen. Es ist jedoch erforderlich, vor Beginn des eigentlichen Messprojektes die Position des Drehtellers zum Sensor eindeutig zu bestimmen. Hierzu wird oftmals mit Hilfe von

Referenzkörpern die Rotationsachse des Drehtellers in Bezug zum Sensorsystem einkalibriert. Hierdurch wird ein solches System – gerade unter dem Gesichtspunkt der Mobilität – mechanisch sehr empfindlich. Ein leichter Stoß bereits kann die Position von Drehteller und Sensor zueinander verändern, ohne dass dieses sofort bemerkt werden kann, was zu fehlerhaften Ergebnissen führt. Auch diese Kombination führt aber zu mehreren Teilpunktewolken, die in ein Koordinatensystem überführt werden müssen.

Der zweite Ansatz ist rein softwarebasierend. Hierbei wird gar nicht erst versucht, durch Zusatzeinrichtungen Bezugsinformationen zwischen Sensor und Objekt herzustellen. Das Sensorsystem kann frei relativ zum zu digitalisierenden Objekt bewegt werden. Die aus jeder Orientierung resultierende Teilpunktewolke liegt zunächst als Einzeldatei vor. Mit speziellen Softwaresystemen können diese Teilpunktewolken anschließend manuell in ein übergeordnetes Koordinatensystem überführt werden. Die Vorgehensweise gestaltet sich dabei so, dass ausgehend von einer Teilpunktewolke eine weitere Teilpunktewolke in der Software hinzugeladen wird. Der Anwender muss in jeder dieser beiden Teilpunktewolken mindestens drei charakteristische Referenzpunkte markieren, anhand derer die Software in der Lage ist, beide Teil-Punktewolken annähernd übereinander zu legen. Die Ausrichtung über diese drei Referenzpunkte muss nicht hochgenau erfolgen; sie dient nur als grobe Vorabausrichtung. In einem nachfolgenden Berechnungsschritt werden beide Teil-Punktewolken von der Software feinjustiert, so dass der Fehler zwischen beiden Wolken im Überlappungsbereich minimal wird. Diese Vorgehensweise ist in Abb. 56 dargestellt.

Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass Sensor und zu digitalisierendes Objekt wahllos zueinander orientiert werden können. Dadurch, dass kein Bezug zueinander erzwungen oder beachtet werden muss, muss ein solches System weder kalibriert werden, noch wird es dadurch mechanisch empfindlich. Lediglich zum Zeitpunkt der eigentlichen Aufnahme darf sich die Position zueinander

nicht ändern. Hierdurch eignet sich ein solches System besonders für den mobilen Einsatz.

Als nachteilig kann angesehen werden, dass die Reihenfolge der Orientierungen so gewählt werden muss, dass mindestens drei Referenzpunkte in beiden Teil-Punktwolken wiederzufinden sein müssen. Das heißt, dass sich die Teilpunktwolken jeweils überlappen müssen. Es kann keine Teilpunktwolke zu einer anderen Teilpunktwolke oder einer Menge bereits zueinander orientierter Teilpunktwolken hinzugefügt werden, die keine Überlappungsbereiche hierzu hat.

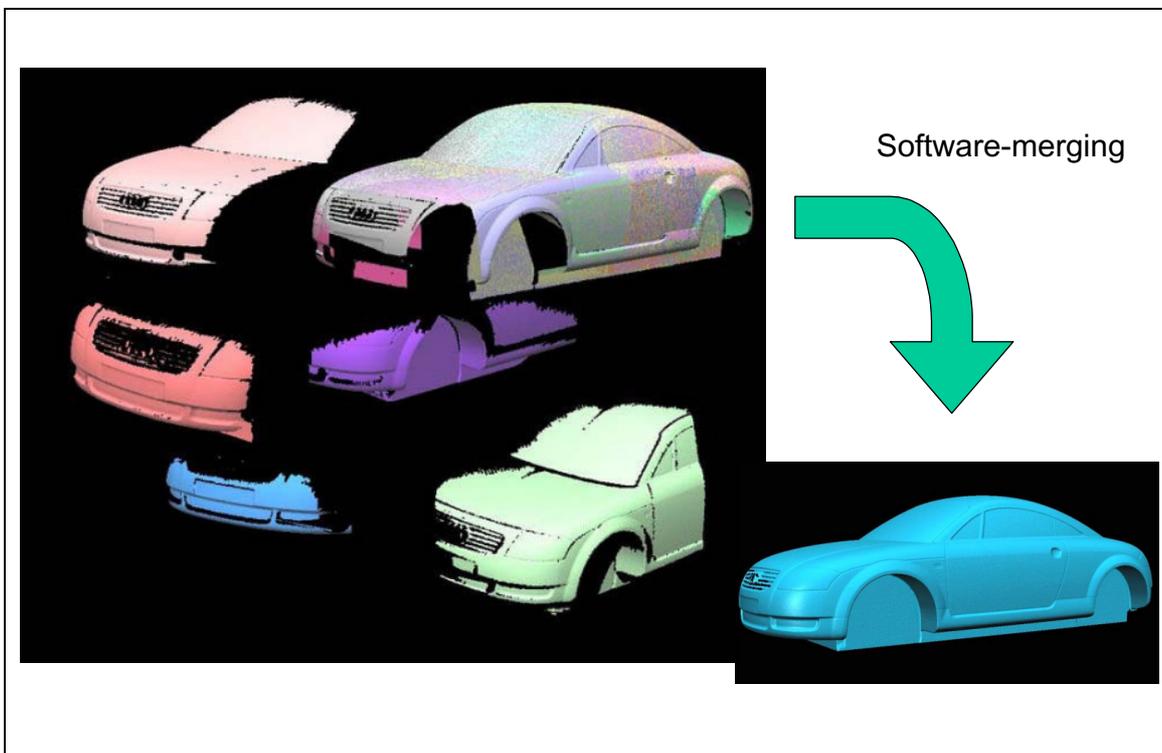


Abb. 56: Software-merging

Das manuelle Zusammenfügen von Teil-Punktwolken ist natürlich auch unter dem zeitlichen Aspekt kritisch zu sehen; bedenkt man, dass die Anzahl von 20 Orientierungen zur vollständigen Rundum-Digitalisierung selbst einfacher Körper sehr schnell überschritten wird, kann dieser Arbeitsschritt schnell einige Stunden Arbeit bedeuten.

Zudem ist diese Methode des Mergens in der Regel ungenauer als eine der anderen. Insbesondere über viele Ansichten, die sich nur in Teilbereichen überlappen, pflanzen sich kleine Fehler zwischen der Ausrichtung von zwei Punktwolken aufgrund der relativen und nicht absoluten Verbindung miteinander über mehrere Wolken fort, so dass zum Teil verhältnismäßig große Abweichungen entstehen können.

Über diese Vorgehensweise kann jedoch auch sehr leicht kontrolliert werden, ob der Datensatz, der manuell zusammengefügt wird, Digitalisierungslücken aufweist. Ggf. kann dann sofort eine entsprechende Orientierung gewählt und hinzugefügt werden, um diese Lücke zu schließen.

Bei der Anschaffung eines Sensorsystems muss berücksichtigt werden, ob die Möglichkeit zum Mergen von Punktwolken im Systempreis inbegriffen ist oder zusätzlich kalkuliert werden muss.

Im dritten Ansatz wird der Arbeitsschritt des Zusammenfügens vollautomatisch gleichzeitig mit der Digitalisierung des Objektes durchgeführt. Um dieses zu ermöglichen, müssen um das Objekt herum (s. Abb. 57, links) oder besser am Objekt (s. Abb. 57, rechts) Referenz-Markierungen appliziert werden.

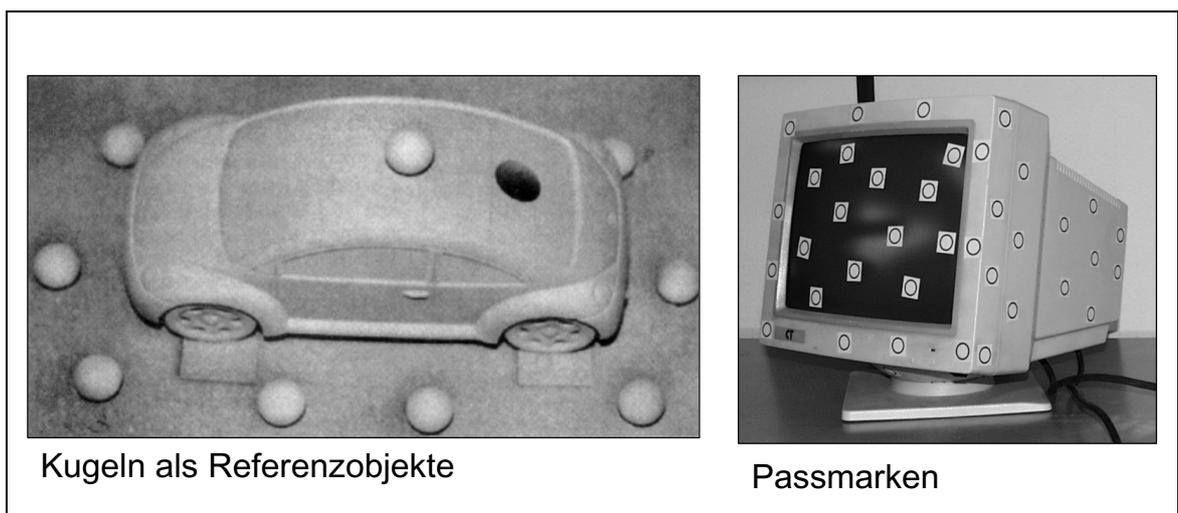


Abb. 57: Referenzobjekte und Passmarken

Ebenso wie sämtliche anderen Koordinatenwerte der Oberfläche des zu digitalisierenden Objektes kann die exakte Position der einzelnen Referenz-Markierungen ebenfalls bestimmt werden. Zudem ist die Software in der Lage, die Positionen der einzelnen Referenz-Markierungen zueinander wiederzuerkennen. Praktisch heißt das, dass bei einer Aufnahme aus einer neuen Orientierung die Position aller darin enthaltenen Passmarken mit den bereits zuvor gefundenen Passmarken verglichen wird. Kann eine Übereinstimmung von mindestens 3 Passmarken in der einzufügenden Orientierung und den bereits zusammengefügte Orientierungen gefunden werden, kann die neue Teilpunktewolke automatisch in das vorhandene Projekt eingepasst werden.

Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass weder teure Positionierelemente eingesetzt werden müssen, noch ein zusätzlicher Arbeitsschritt wie es beim softwarebasierenden Ansatz erforderlich ist. Gleichzeitig ist ein solches Verfahren mechanisch sehr unempfindlich, da Sensor und zu digitalisierendes Objekt lediglich zum Zeitpunkt der Aufnahme einen festen Bezug zueinander beibehalten müssen. Derartige Sensorsysteme sind für den mobilen Einsatz besonders geeignet. Über den automatischen Aufbau der gesamten Punktewolke hat der Anwender bereits zum Zeitpunkt der Digitalisierung die Möglichkeit, Lücken im Datensatz zu erkennen und ggf. durch eine andere Orientierung diese Lücke zu schließen.

Nachteilig an diesem Verfahren ist, dass vor der eigentlichen Digitalisierung die Referenzmarken am Objekt appliziert werden müssen. Der Zeitaufwand hierfür kann jedoch als sehr gering eingeschätzt werden. Auch bei diesem Verfahren muss die Reihenfolge der Orientierungen so gewählt werden, dass mindestens drei Referenzmarken der neuen Orientierung in den bereits zusammengefügte Teil-Punktewolken wiederzufinden sein müssen. Das heißt, dass sich die Teilpunktewolken überlappen müssen. Mit ein wenig Routine stellt diese Einschränkung jedoch keinen wesentlichen Nachteil dar.

Im Gegensatz zum softwarebasierenden Ansatz muss ein vollautomatischer Ansatz stets zum Lieferumfang des Sensorsystems gehören, da die entsprechenden Algorithmen zur Erkennung der speziellen Referenzmarken in der

Steuerungssoftware des Sensorsystems hinterlegt sein müssen. Gibt es für softwarebasierende Ansätze mehrere Softwareprodukte am Markt, so ist die vollautomatische Lösung nur in Verbindung mit dem speziellen Sensorsystem einsetzbar. Bei den Anschaffungskosten eines Sensorsystems muss dieser Aspekt entsprechend berücksichtigt werden.

5.3.2. Datenreduktion

Ein mit einem optischen Sensorsystem digitalisierter Gegenstand erzeugt – je nach Größe – eine Punktwolke von mehreren Millionen Messpunkten in Form von x-, y- und z-Koordinaten. Die Vielzahl der Messwerte ergibt sich zum einen aus der notwendigen hohen Detailauflösung des Messsystems, aber auch aus redundanten Daten, wie sie im Überlappungsbereich von Teil-Punktwolken entstehen. Werden allein diese Messwerte im Überlappungsbereich durch Anwendung entsprechender Softwarealgorithmen entfernt, so kann die gesamte Punktwolke nicht selten schon auf 50 % der ursprünglichen Datenmenge reduziert werden. Dennoch liegt die verbleibende Messpunkteanzahl noch in einem Bereich, der auch von sehr guten PC-Systemen nicht mit vertretbaren Reaktionszeiten verarbeitet werden kann. Praktische Versuche im Rahmen der für diese Arbeit durchgeführten Reverse-Engineering Projekte haben ergeben, dass ca. 100.000 Messpunkte häufig ein guter Kompromiss zwischen Antwortzeit des PC-Systems und notwendiger Detailauflösung des Objektes sind. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, eine Punktwolke von mehreren Millionen Messwerten auf ca. 100.000 zu reduzieren, ohne zu große Zugeständnisse an die Detailauflösung machen zu müssen.

Prinzipiell gibt es mehrere Wege, die Punkteanzahl in einer komplexen Datenwolke zu reduzieren. Einer der einfachsten Wege besteht darin, eine rechteckige Hüll-Box um die Punktwolke zu legen und diese Box in Richtung aller drei Koordinatenachsen in kleine Volumenwürfel (sog. Voxel) zu zerlegen. Anschließend werden in jedem Voxel alle vorhandenen Messpunkte bis auf einen gelöscht. Hierbei kann der Einfachheit halber ein Punkt im Zentrum des Voxels erzeugt werden, oder der Mittelwert aller Messpunkte im Voxel wird als

neuer Messpunkt generiert. Durch die Wahl der Größe der Voxel kann die Detailauflösung bzw. der Fehler der Datenreduktion aber auch die letztendlich verbleibende Datenmenge gesteuert werden. Kritisch an diesem Verfahren ist, dass in Bereichen mit starken Krümmungsänderungen ebenso viele (oder wenige) Messpunkte übrigbleiben, wie in Bereichen mit sehr geringer Krümmungsänderung. Damit wird gerade in Bereichen, in denen eine hohe Detailauflösung erforderlich ist, die Datenmenge zu stark ausgedünnt.

Nach einem ähnlichen Prinzip arbeitet die zweite Methode. Hier werden virtuelle Schnittebenen in Richtung aller drei Koordinatenebenen durch die Punktwolke gelegt. Es verbleiben nur die Messpunkte in der reduzierten Punktwolke, die – mit einer minimalen Toleranz – auf diesen Schnittebenen liegen. Durch die Wahl des Abstandes der Schnittebenen kann der Faktor der Datenreduktion und ebenso die Detailauflösung festgelegt werden. Prinzipiell hat diese Methode dieselben Nachteile wie die zuvor beschriebene.

Eine weitere Methode nutzt die krümmungsabhängige Datenreduktion, die letztendlich dazu führt, dass in Bereichen mit höherer Krümmungsänderung mehr Messpunkte verbleiben und relativ flache Bereiche um so stärker ausgedünnt werden. Der Anwender hat die Möglichkeit, eine Toleranz zu bestimmen, in der die Abweichung/der Fehler der neuen Punktwolke von dem Originaldatensatz liegen darf. Durch diese Methode ist es möglich, eine Punktwolke sehr stark auszudünnen und gleichzeitig die notwendige Detailauflösung beizubehalten.

Für eine Beschreibung der unterschiedlichen Verfahren bzw. Algorithmen zur Ausdünnung von Punktwolken wird auf /Bra98/ verwiesen.

Abb. 58 zeigt eine gleichförmige im Vergleich zu einer krümmungsabhängigen Datenreduktion von 2,5 Mio. auf eine Endzahl von 50.000 Messpunkten. Der Qualitätsunterschied im polygonisierten Datensatz ist deutlich zu erkennen.

Im Rahmen der für diese Arbeit durchgeführten Reverse-Engineering Projekte hat sich die Möglichkeit zur krümmungsabhängigen Datenreduktion als sehr vorteilhaft erwiesen. Ebenso war die Möglichkeit sehr hilfreich, den Reduktions-

faktor vor der Ausdünnung vorzugeben und damit die letztendlich verbleibende Anzahl an Messpunkten. Viele Softwaresysteme gehen den umgekehrten Weg: Der Anwender hat die Möglichkeit, den maximalen Punktabstand und die Fehlertoleranz vorzugeben. Hier kann der Anwender erst nach der – teilweise langwierigen – Prozedur der Datenreduktion erkennen, wie viele Messpunkte bei den von ihm gewählten Einstellungen übriggeblieben sind, um sich dann ggf. mit geänderten Toleranzangaben iterativ an die gewünschte Anzahl an Messpunkten heranzutasten, wobei für jeden Iterationsschritt dieselbe (langwierige) Berechnung durchgeführt werden muss.

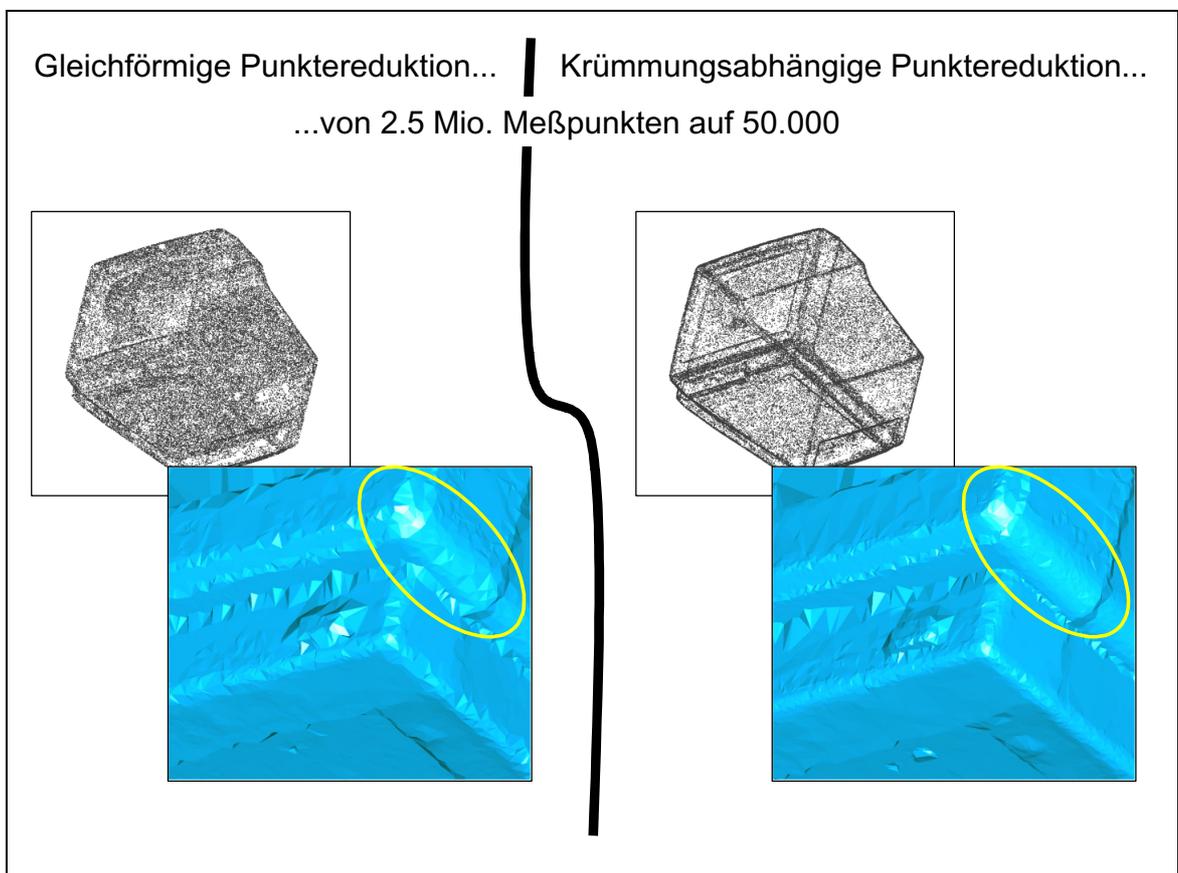


Abb. 58: Datenreduktion

5.4. Von der Punktwolke zum 3D-CAD-Volumenmodell (surface fitting)

Nachdem die Phase des pre-prozessing abgeschlossen ist und als Ergebnis davon eine rundum geschlossene Punktwolke mit einer verarbeitbaren Anzahl

an Punkten vorliegt, beginnt nun der eigentliche Arbeitsschritt, diese Punktwolke in ein für CAD-Systeme bearbeitbares Format umzuwandeln. Zunächst gilt es also, ein Flächenmodell aus der Punktwolke abzuleiten, um daraus ein wasserdicht geschlossenes Volumenmodell zu erzeugen.

Um diesen Arbeitsschritt durchzuführen, wird ein kommerzielles Softwarepaket benötigt, welches genau diese Aufgabe erfüllen kann, da die meisten CAD-Systeme mit komplexen Punktwolken nicht umgehen können /Ker97/.

Es existieren prinzipiell zwei Ansätze kommerzieller Systeme zur CAD-Flächenrückführung. Zunächst gibt es Erweiterungen zu CAD-Systemen, die über die benötigten Funktionalitäten verfügen, das Problem zu lösen. Derartige Systeme haben den Vorteil, dass es sehr leicht möglich ist, zwischen Funktionen zur Flächenrückführung und CAD-Funktionen zu wechseln. Der Nachteil dieser Systeme liegt darin, dass ein bestimmtes CAD-System angeschafft werden muss, ggf. sogar ergänzend zu einem bereits im Unternehmen eingeführten System.

Zum anderen sind Systeme am Markt verfügbar, die unabhängig von einem CAD-System arbeiten. Hier wird die Verbindung zu einem beliebigen CAD-System über systemunabhängige Schnittstellen wie IGES oder VDA-FS erreicht. Hier ist es jedoch schwieriger und zeitaufwendiger, zwischen Funktionen zur Flächenrückführung und CAD-Funktionen zu wechseln /Wei97/.

Kommerzielle Systeme verfügen über spezielle Funktionalitäten insbesondere im Hinblick auf die manuellen Interaktionen, die erforderlich sind, um CAD-Flächen aus Punktwolken zu erzeugen. Da es vermutlich niemals automatisch möglich sein wird, die logische Abfolge des Konstruktionsprozesses nachzuvollziehen, verfügen Flächenrückführungssysteme über intelligente Algorithmen, die den Anwender bei der Minimierung des manuellen Aufwandes unterstützen. Es werden Funktionalitäten gefordert, die typische geometrische Elemente wie Lücken, Kanten oder Verrundungen mit konstantem Radius erkennen. Die Anzahl und Qualität dieser Funktionalitäten bei kommerziellen Systemen variieren jedoch sehr stark /Wei97/.

Der Vollständigkeit halber soll ein weiterer Ansatz erwähnt werden, der darin besteht, einen STL-Datensatz direkt in ein Volumenmodell zu konvertieren. Hierbei wird jedes Dreieck eines STL-Datensatzes in eine einzelne NURBS-Fläche umgewandelt, so dass ein Flächenmodell aus sehr kleinen Dreiecksflächen entsteht. Die entstehende Datenmenge ist jedoch so groß, dass ein befriedigendes Arbeiten hiermit nicht möglich ist. Zudem ist die Detailauflösung sehr schlecht und die Dreiecke sind im Modell oder Werkzeug sehr deutlich zu sehen.

Im nachfolgenden Kapitel werden die Problembereiche vorgestellt, die im Rahmen der Verpackungstechnik eine wesentliche Rolle spielen.

5.4.1. Arten von Problembereichen

Nachdem ein Objekt vollständig digitalisiert wurde, ist seine Oberfläche und Struktur in Form einer dichten Punktwolke im Computer hinterlegt. Die Messwerte repräsentieren die Oberfläche des Objektes je nach verwendetem Sensorsystem bzw. je nach eingestellten Messparametern mit einer Genauigkeit und Detailauflösung, die bis hin zur Erfassung der Rauigkeit einer Oberfläche reichen kann. Dieses Auflösungsvermögen kann aber im Rahmen der Verpackungsentwicklung zu nicht gewünschten Detailauflösungen führen, so dass eine Nachbearbeitung des Datensatzes nahezu immer erforderlich ist, um eine Basis für eine Flächenrückführung zu schaffen.

Im folgenden werden am Beispiel eines digitalisierten Monitors (s. Abb. 59, links) mögliche Mängel an einem Datensatz aufgezeigt, die sich zu einem Teil aus sensorspezifischen Eigenschaften ergeben, zum anderen aus Forderungen der verpackungstechnischen Rahmenbedingungen. Um die Problematik einfacher nachvollziehen zu können, zeigt Abb. 59, rechts, bereits das Endergebnis des Reverse-Engineering Prozesses in Form des 3D-CAD-Datensatzes. Es ist deutlich zu sehen, welche Abstraktionen im Vergleich zum realen Produkt durchgeführt wurden. Diese Abstraktionen resultieren daher, dass sämtliche Details des realen Objektes, welche für die Funktionserfüllung des Ver-

packungspolsters keinerlei Bedeutung haben, im 3D-CAD-Datensatz entfernt wurden. Um ein derart abstrahiertes 3D-CAD-Modell zu erhalten, müssen die digitalisierten Daten entsprechend aufbereitet werden.

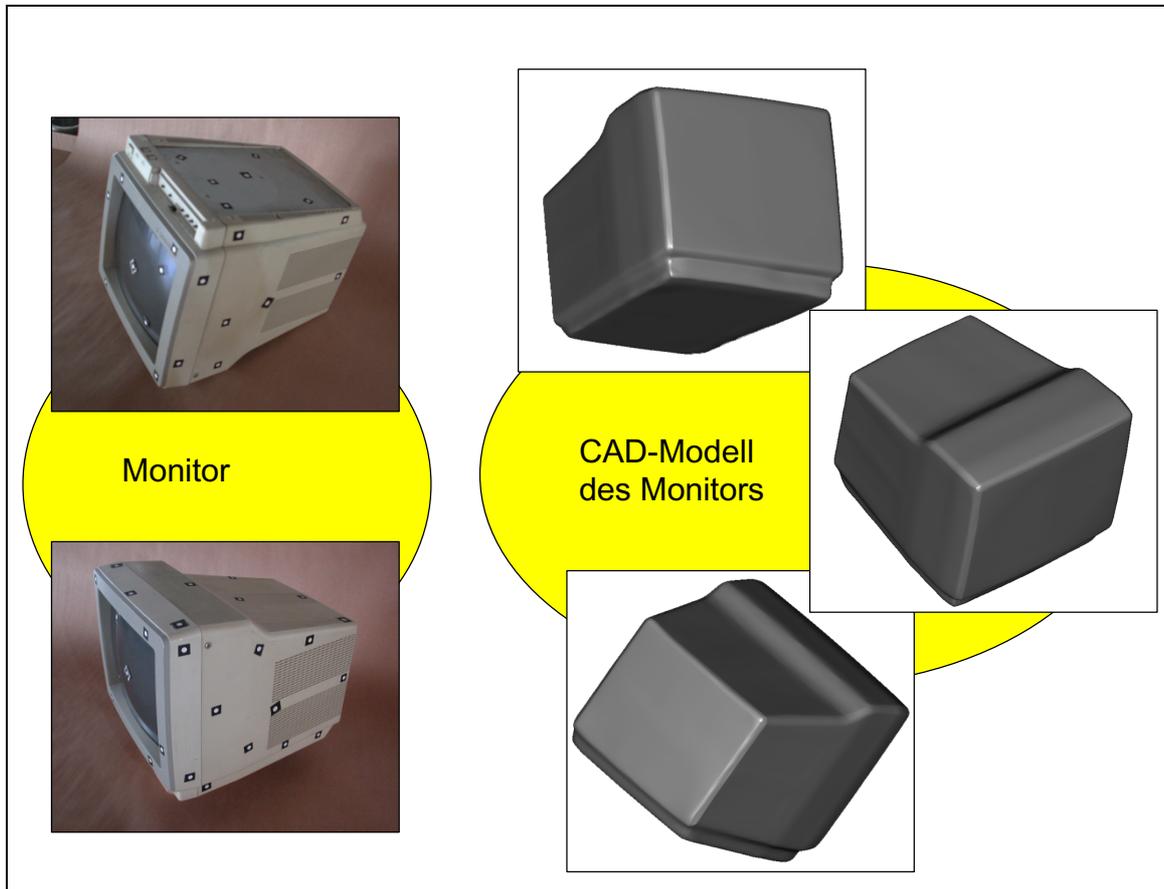


Abb. 59: Beispielmodell Monitor als reales Produkt und abstrahiertes 3D-CAD-Modell

Geht man davon aus, dass zunächst immer – unabhängig von der gewählten Methode zur Erzeugung von Flächen – eine Polygonisierung der Punktwolke durchgeführt wird (d. h. es wird ein STL-Datensatz erzeugt), so treten hier bereits häufig Fehler im STL-Datensatz auf, die zum einen aus Detektionslücken bestehen oder aus Fehlern beim Prozess der Polygonisierung resultieren können. Detektionslücken treten häufig bei Sensorsystemen auf, die Passmarken zur automatischen Zusammenführung von Teilpunktwolken verwenden (s. Abb. 60). Ebenso treten Detektionslücken an den Stellen des

Objektes auf, die vom Sensorsystem nicht hinreichend ausgeleuchtet werden können oder dort, wo keine eindeutige Messung vorgenommen werden kann. An einer Mattscheibe eines Monitors (s. Abb. 60) kann von einem Sensorsystem – wenn diese nicht entsprechend präpariert wurde – nicht unterschieden werden, ob die Glasoberfläche oder die dahinter liegende Beschichtung erfasst wurde. Hier spielen zudem Effekte der Lichtbrechung eine entscheidende Rolle.

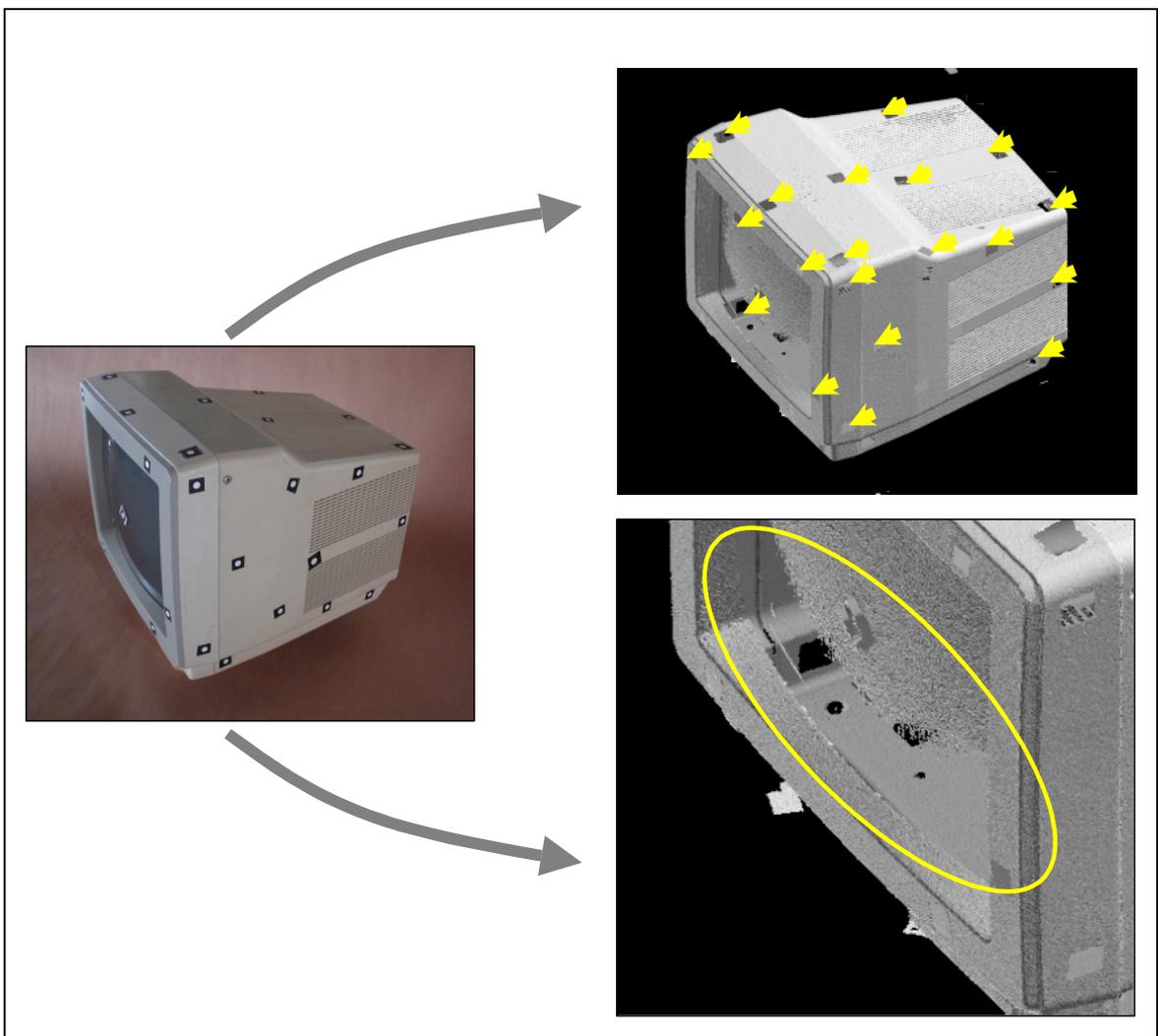


Abb. 60: Detektionslücken im digitalisierten Datensatz

Die zurückversetzte Mattscheibe des Monitors stellt zudem eine Hinterschneidung dar, die zu einer Nicht-Entformbarkeit des Verpackungspolsters führen würde, ginge man bspw. von Verpackungspolstern in Form von bei Monitoren

typischerweise eingesetzten Seitenpolstern aus. Diese Hinterschneidung muss entsprechend entfernt werden, weshalb in diesem konkreten Fall auf eine Vorbehandlung der Mattscheibe bewusst verzichtet wurde. Selbiges gilt für hervorstehende Bauteile, wie Bedienelemente (s. Abb. 61).

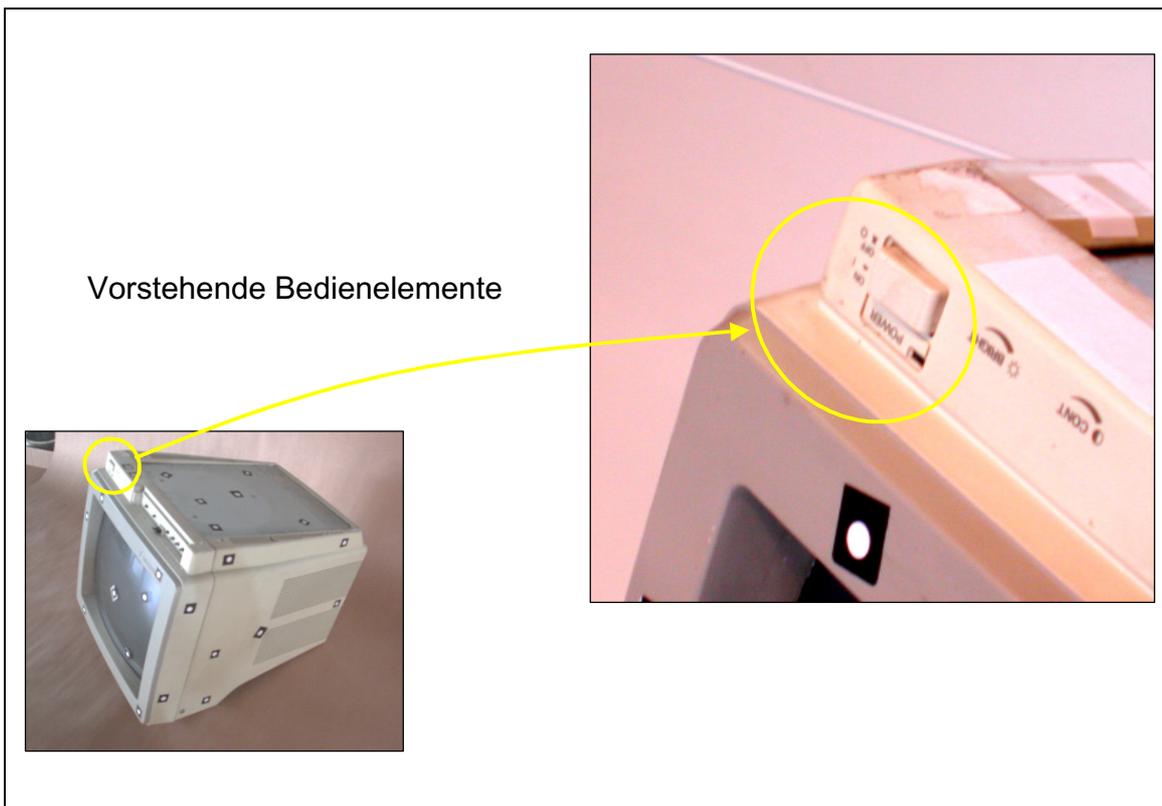


Abb. 61: Hinterschneidungen durch hervorstehende Bedienelemente

Ein weiterer Problembereich folgt aus dem im einen Fall geforderten, in diesem Fall aber ungewollt hohen Auflösungsvermögen des Sensorsystems. Daraus resultiert, dass selbst Bohrlöcher oder Lüftungsgitter etc. (s. Abb. 62) detailliert erfasst werden. Derartige Details werden jedoch nicht in ein Verpackungsformteil übernommen und stellen somit überflüssige Details dar, die z. T. aufwendig nachbearbeitet werden müssten. Ebenso müssen auch größere Details – wie in Abb. 62 dargestellt – nachbearbeitet werden.

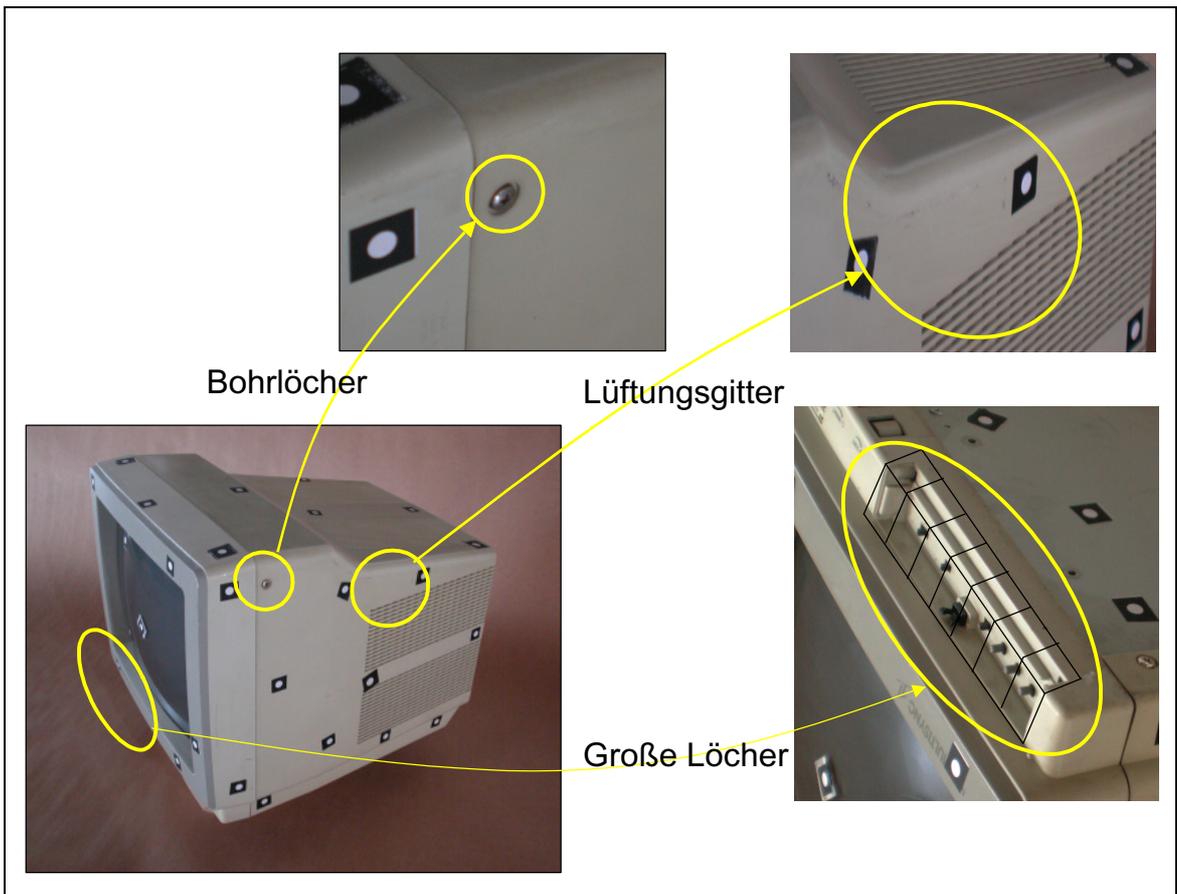


Abb. 62: Überflüssige Details (Bohrlöcher etc.)

Das Formnest in einem Verpackungspolster ist in den meisten Fällen im Vergleich zu dem zu verpackenden Produkt vereinfacht bzw. abstrahiert. Neben sehr kleinen Details (siehe o. g. Bohrlöcher, Lüftungsgitter etc.), die nicht in die Verpackungskonstruktion übernommen werden, wird das Formnest auch an den Stellen abstrahiert, wo eine aufwendige Herausarbeitung von Details lediglich Modellieraufwand bedeuten würde, das Ergebnis jedoch keine Bedeutung für die Funktionserfüllung des Formteils in Richtung Schutzwirkung hätte. Hierunter fallen bspw. Kanten, wie sie in Abb. 63 dargestellt sind.

Zur Bearbeitung der genannten Problembereiche müssen entsprechende Werkzeuge benutzt werden, die im folgenden – je nach gewählter Vorgehensweise – beschrieben werden.

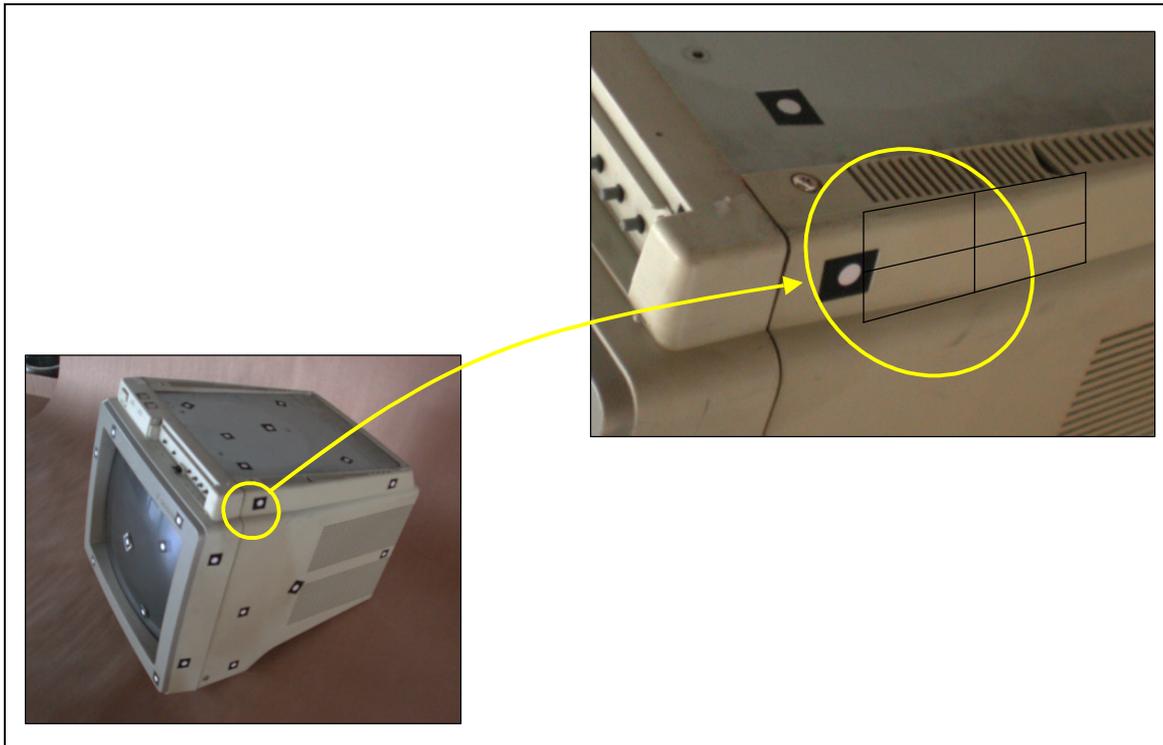


Abb. 63: Überflüssige Kanten

5.4.2. Konstruktive Flächenrückführung

Die konstruktive Vorgehensweise der Flächenrückführung richtet sich zunächst nach der in Kap. 3.2.2.2, S. 78 ff. beschriebenen klassischen Vorgehensweise. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist der, dass markante Bereiche eines digitalisierten Objektes sehr schnell erfasst und für die Verpackungsentwicklung ausreichen approximiert werden können. Die zuvor beschriebenen Problembereiche lassen sich durch Funktionalitäten eines Flächenmodellierers i. d. R. sehr einfach lösen, so dass zunächst keine vorbereitenden Arbeiten am STL-Datensatz erforderlich sind. Nachteilig an dieser Vorgehensweise ist die Notwendigkeit des Einsatzes eines zusätzlichen CAD-Paketes, welches über geeignete Funktionalitäten zur Flächenmanipulation verfügt. In der Regel wird die Anschaffung eines Flächenmodellierers kaum zu umgehen sein. Nachfolgend wird die konstruktive Vorgehensweise zur Flächenrückführung sowie die Möglichkeiten zur Beseitigung der in Kap. 5.4.1, S. 129 ff. beschriebenen Problembereiche vorgestellt.

5.4.2.1. Der konstruktive Prozess der Flächenrückführung über feature-lines

Die wesentlichen Merkmale der konstruktiven Vorgehensweise der Flächenrückführung bestehen darin, dass der Anwender die Punktwolke bzw. den STL-Datensatz zunächst durch Kurvenzüge (feature-lines) in geeignete Bereiche unterteilt, wobei durch die Wahl des Verlaufes der Kurvenzüge bereits markante Datensegmente voneinander abgeteilt werden, die für eine anschließende Flächenrückführung eine geeignete Struktur aufweisen. Ist bekannt, dass es sich bei entsprechenden Kurvenverläufen um Geraden handelt, ist die Funktionalität einer Schnittebene besonders hilfreich, durch die exakt gerade Schnitte beliebig durch eine Punktwolke oder einen STL-Datensatz gelegt werden können.

Die so erzeugten Kurvenzüge werden anschließend mit CAD-Funktionalitäten eines Flächenmodellierers zu Flächendatensätzen und nachfolgend zu den gewünschten Volumendatensätzen aufbereitet.

Hilfreich für diese Vorgehensweise ist ein Softwaresystem, welches dem Anwender die Möglichkeit bietet, Kurvenzüge auf einer Punktwolke oder einem STL-Datensatz zu „malen“. In Abb. 64 wird am Beispiel eines Monitors eine konstruktive Vorgehensweise zur Flächenrückführung verdeutlicht.

Zunächst werden geeignete feature-lines von Hand auf dem STL-Datensatz gezeichnet, wobei die Oberfläche und deren Krümmungsverlauf – je nach Komplexität des digitalisierten Objektes – bereits mit wenigen feature-lines ausreichend genau erfasst werden kann. Diese feature-lines können dann entweder über neutrale Datenschnittstellen in einen Flächenmodellierer zur Weiterverarbeitung exportiert werden, oder – wenn möglich – im selben Softwarepaket mit Funktionalitäten eines Flächenmodellierers weiterbearbeitet werden.

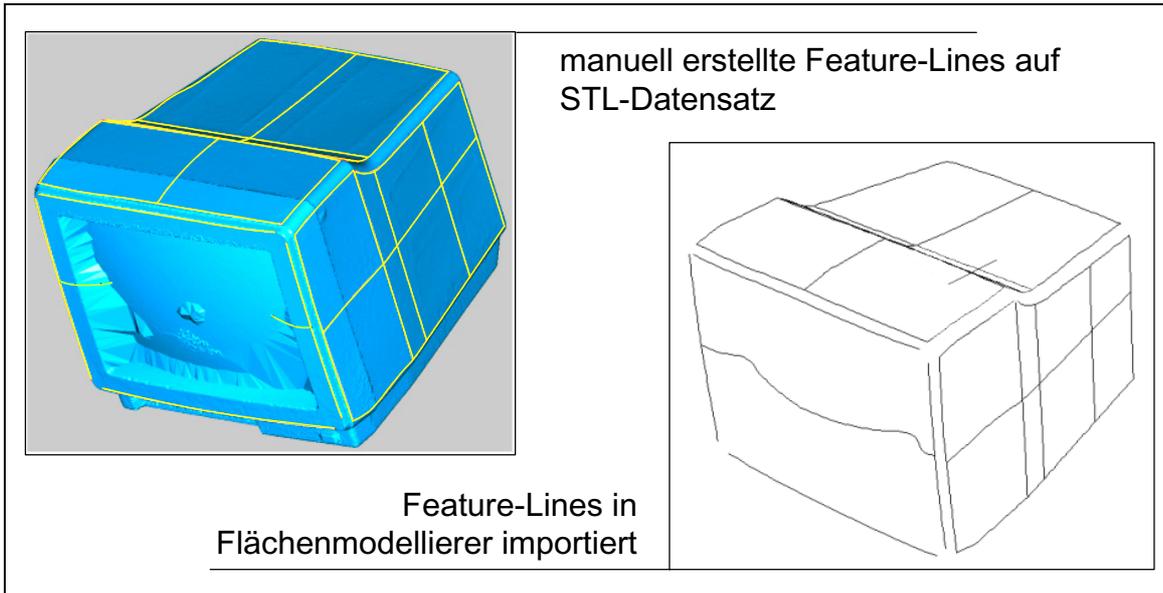


Abb. 64: Feature-lines auf Monitor

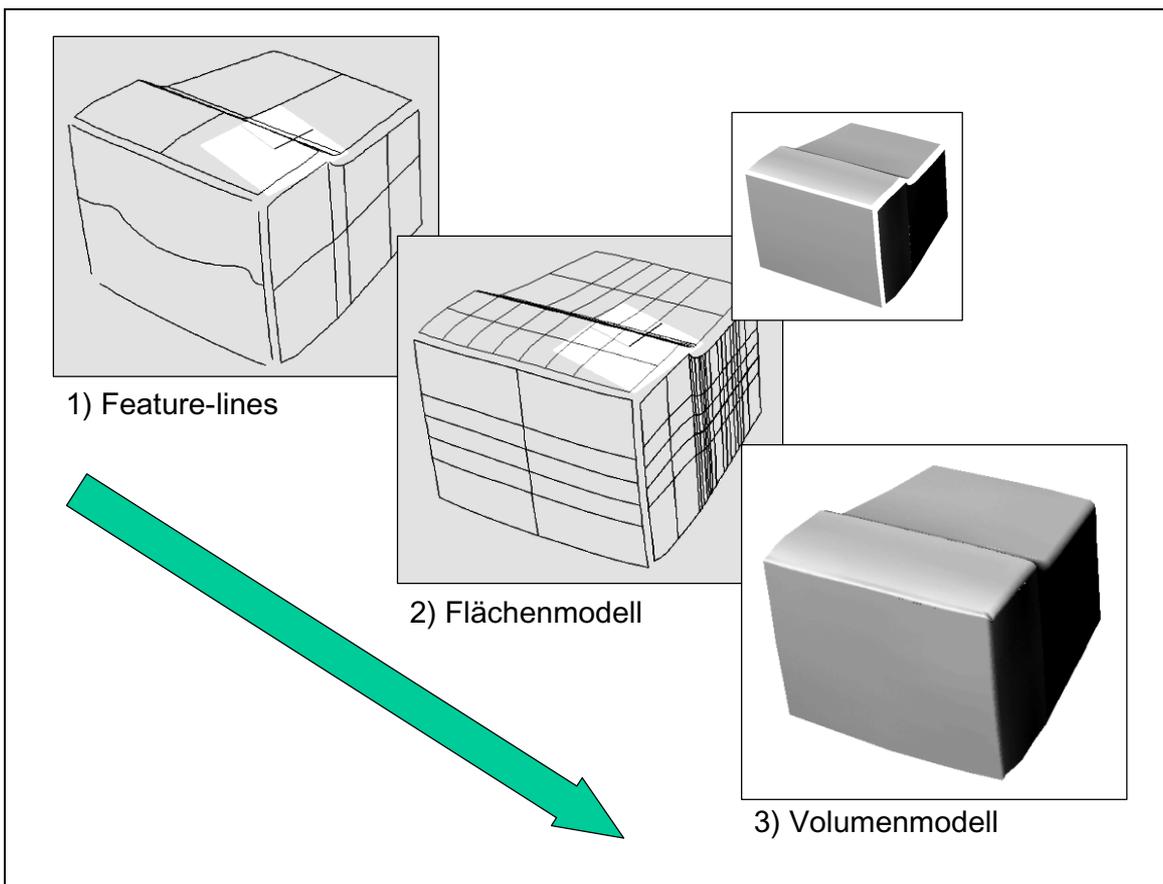


Abb. 65: Von feature-lines über Flächendaten zum Volumenmodell

Abb. 65 verdeutlicht, wie aus den feature-lines Flächendaten erzeugt werden können. Durch gegenseitiges trimmen (d. h. trennen an ihren jeweiligen Schnittkanten) aller Flächen entsteht ein exaktes Flächenmodell, welches mit entsprechenden Füllflächen weiter bearbeitet werden kann.

5.4.2.2. Aufbereitung von Problembereichen

In Kap. 5.4.1, S. 129 ff. wurden viele Problemstellungen aufgezeigt, die im Rahmen eines verpackungstechnischen Reverse-Engineering Prozesses gelöst werden müssen. Wird in den sonst üblichen Einsatzgebieten dieser Technologie sehr viel Wert auf Detailreue gelegt, so werden durch die Verpackungstechnik z. T. gegensätzliche Anforderungen gestellt. Nachfolgend werden Möglichkeiten vorgestellt, wie derartige Problembereiche auf konstruktivem Wege mit Funktionalitäten eines 3D-Flächenmodellierers bearbeitet werden können.

Der Vorteil an der konstruktiven Vorgehensweise liegt darin, dass die polygonisierte Punktwolke (STL-Datensatz) nicht manipuliert und modelliert werden muss, um eine verwertbare Flächenrückführung durchführen zu können. Das heißt, dass Problembereiche wie Detektionslücken (s. Abb. 60, S. 131) sowie für die Verpackungsentwicklung überflüssige Details (s. Abb. 62, S. 133) nicht bearbeitet werden müssen. Durch die Nutzung nur weniger beschreibender feature-lines kann in vielen Anwendungsfällen die gesamte Oberfläche eines Objektes so approximiert werden, dass derartige Problembereiche keinerlei Beachtung finden (s. Abb. 66).

Ebenso lassen sich über ein Gerüst von feature-lines und Konstruktionsfunktionalitäten eines Flächenmodellierers Problemstellen wie überflüssige Kanten (s. Abb. 63, S. 134) oder mehrfach gekrümmte Löcher (s. Abb. 64, S. 136) ausreichend exakt bearbeiten (s. Abb. 67 und Abb. 68).

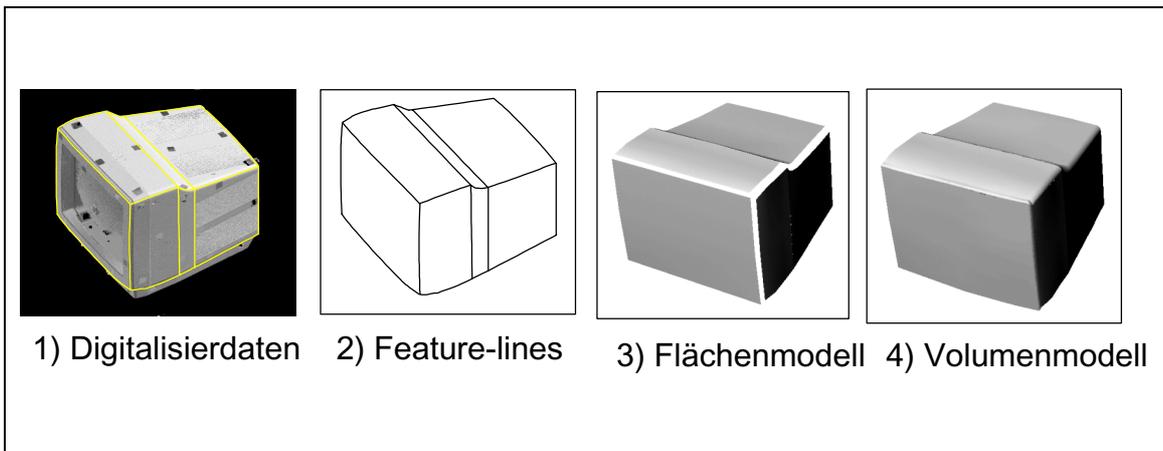


Abb. 66: Konstruktive Behandlung von Lücken und überflüssigen Details

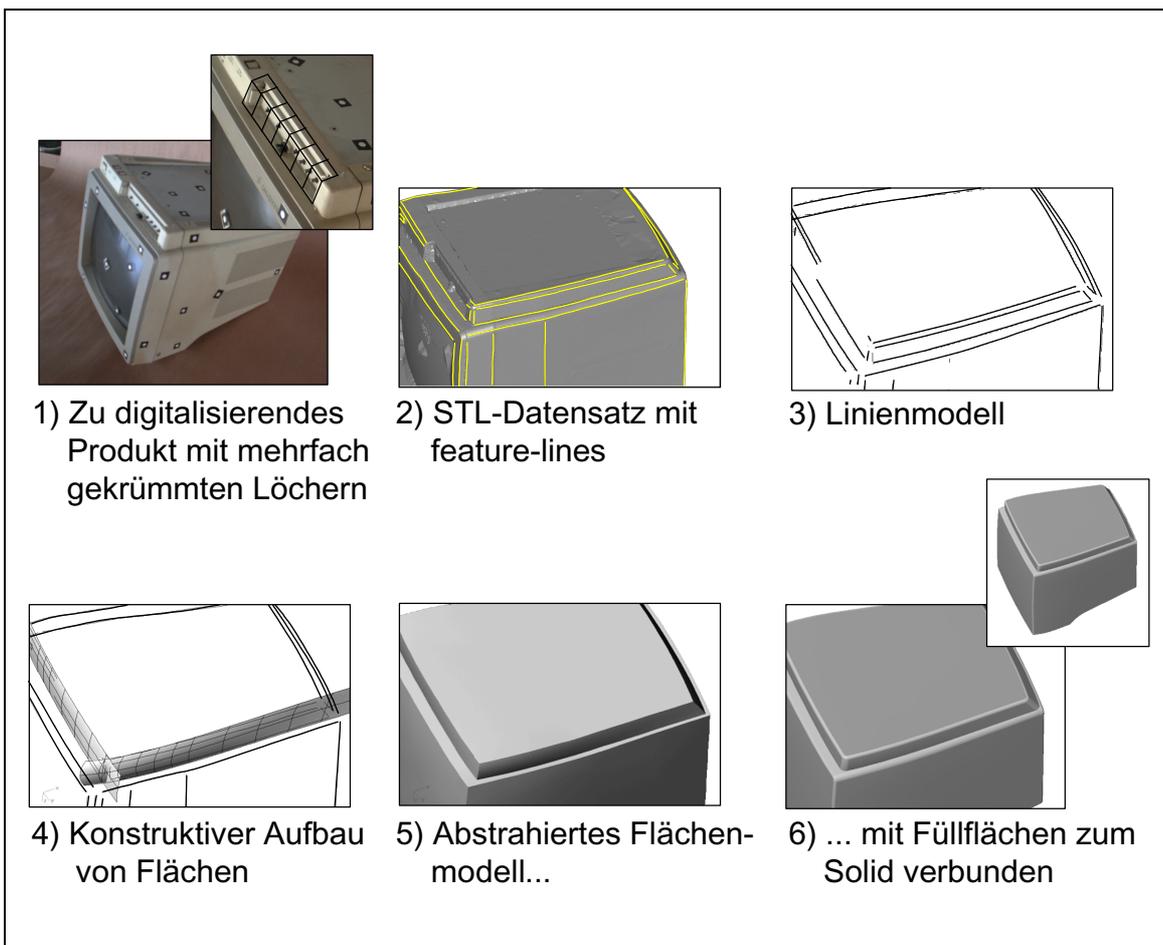


Abb. 67: Bearbeitung mehrfach gekrümmter Löcher

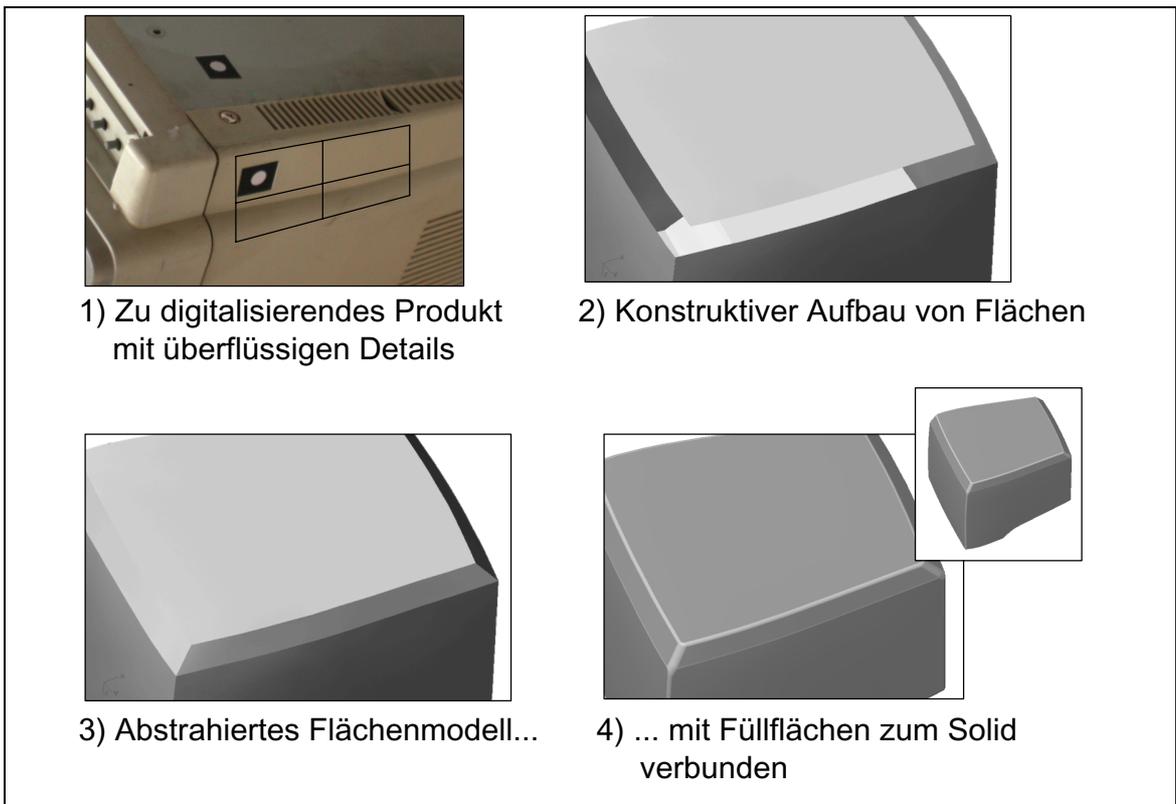


Abb. 68: *Bearbeitung überflüssiger Kanten*

Bei hervorstehenden Bedienelementen, die in einem Verpackungspolster zu Hinterschneidungen führen würden (s. Abb. 61, S. 62) kann ebenfalls über wenige feature-lines ein Gerüst für eine konstruktive Flächenrückführung erstellt werden, wobei durch die konstruktive Vorgehensweise berücksichtigt werden kann, dass das Bedienelement über die gesamte Eintauchtiefe des Verpackungspolsters – es wird von einem seitlich aufgeschobenen Side-Cap ausgegangen – als Formnest im Verpackungspolster vorhanden sein muss (s. Abb. 69)

Somit ergeben sich durch die Kombination mit einem geeigneten Flächenmodellierer vielfältige Möglichkeiten, eine für die Verpackungstechnik ausreichend detaillierte Flächen- bzw. Volumenrückführung durchzuführen. Es muss jedoch beachtet werden, dass ein zusätzliches CAD-System in Form eines Flächen-

modellierers angeschafft werden muss, dessen Funktionalitäten ebenfalls beherrscht werden müssen.

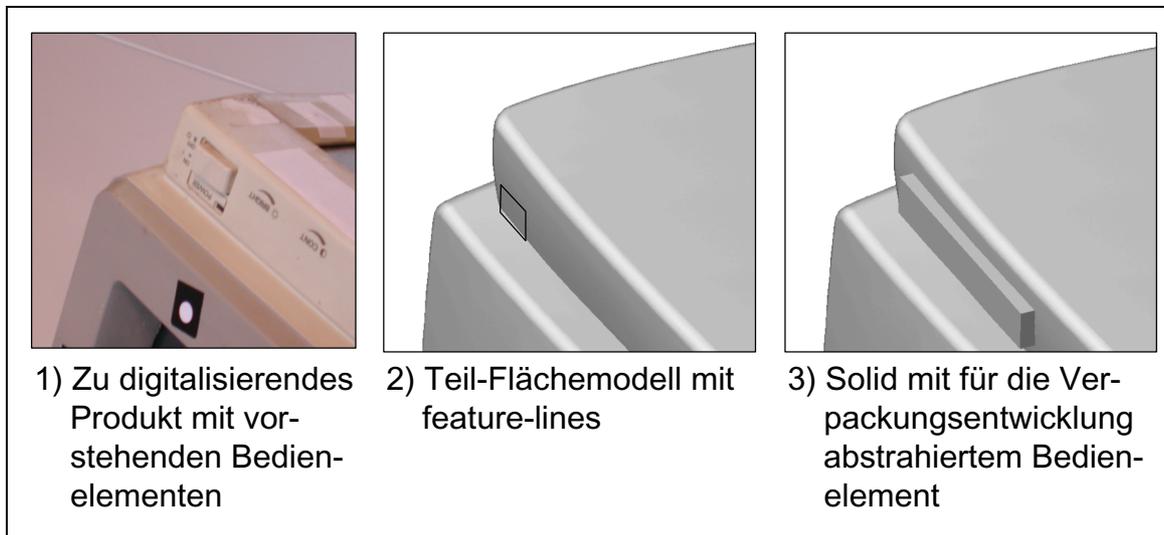


Abb. 69: *Bearbeitung vorstehender Bedienelemente*

Geeignet ist diese Vorgehensweise oftmals nur für einfache Objekte, die vorwiegend aus Regelgeometrien aufgebaut sind und vorzugsweise Kanten enthalten, die sich zur Erzeugung von feature-lines eignen. Für Objekte, die vorwiegend aus stetigen Freiformflächen bestehen, ist die konstruktive Vorgehensweise aufgrund des wachsenden hohen Aufwandes bei der Konstruktion häufig nicht geeignet.

Eine geeignete Vorgehensweise für derartige Objekte wird im folgenden Kapitel beschrieben.

5.4.3. Halbautomatische Flächenrückführung

Neben der rein konstruktiven Vorgehensweise, die gerade im Bereich komplexer Flächen oder Freiformflächen sehr zeitaufwendig sein kann, existieren am Markt Softwaresysteme, die eine halbautomatische Vorgehensweise unterstützen. Der Vorteil besteht darin, dass die entstehenden Flächen automatisch mindestens tangential stetig (C1-stetig) oder sogar krümmungstetig (C2-stetig)

verbunden sind, so dass bei rundum geschlossenen Modellen ein stetiges Volumenmodell entsteht.

Es gibt dabei unterschiedliche Ansätze zur automatischen Flächengenerierung, wobei für eine Zusammenfassung auf /Ber99b/ verwiesen wird. Basis dieser Verfahren ist jedoch stets das STL-Modell, welches als Träger für das teilweise automatisch erstellte Flächenmodell dient, wobei das Flächenmodell mit einer Haut verglichen werden kann, die sich exakt an dieses STL-Gerüst anschmiegt. Demzufolge muss – um die Vorzüge der automatischen und stetigen Flächengenerierung nutzen zu können – das STL-Modell so modelliert werden, dass es bereits die endgültige und vollständige Form des entstehenden Flächenmodells hat. Das wiederum heißt, dass der Schwerpunkt der Arbeiten zur Flächenrückführung – insbesondere im Hinblick auf die verpackungstechnischen Rahmenbedingungen (s. Kap. 5.1, S. 101 ff.) – auf die Modellierung des STL-Modells hin zur endgültigen Form verlagert wird.

Somit müssen die in Kap. 5.4.1, S. 129 vorgestellten Problembereiche, die im Rahmen des Reverse-Engineerings gelöst werden müssen, bereits am STL-Modell modelliert werden.

Im folgenden Kapitel werden Möglichkeiten vorgestellt, mit welchen Funktionalitäten derartige Problembereiche behandelt werden können. Zunächst werden softwaretechnische Lösungsmöglichkeiten beleuchtet, um anschließend handwerkliche Techniken zu diskutieren, mit Hilfe derer die Schwächen der softwaretechnischen Möglichkeiten ergänzt werden können.

5.4.3.1. Aufbereitung von Problembereichen

Bei den softwaregebundenen Werkzeugen zur Problemstellenbehandlung wird zunächst vorausgesetzt, dass die digitalisierte Punktwolke bereits zu einem STL-Datensatz polygonisiert wurde. Es wird davon ausgegangen, dass die Software, die diesen Schritt übernimmt, zum einen in der Lage ist, rundum geschlossene 3D-Punktwolken zu polygonisieren; viele Softwaresysteme, die vorwiegend auf die Verarbeitung von Punktwolken ausgelegt sind, die über CMM oder Fräsmaschinen-Lösungen akquiriert werden, sind nur für die Aufbe-

reitung von $2^{1/2}$ D-Daten ausgelegt. Zum anderen wird vorausgesetzt, dass diese Softwarelösung in der Lage ist, die vorhandenen Messpunkte fehler- und hinterschnittfrei zu verbinden oder zumindest Werkzeuge bereitstellt, dieses ohne großen Zeitaufwand nachzubearbeiten.

Sind diese Voraussetzungen erfüllt, so besteht der erste Arbeitsschritt bei der Nachbereitung eines STL-Datensatzes im Schließen von Detektionslücken. Die Software sollte in der Lage sein, Löcher in einem STL-Datensatz automatisch zu erkennen und anzuzeigen. Löcher im Polygonnetz sind von den entsprechenden Algorithmen dadurch zu erkennen, dass die umliegenden Dreiecke mindestens eine Kante haben, an der kein weiteres Dreieck angrenzt. Die Algorithmen erkennen diese unverbundenen Kanten; die meisten Software-systeme können diese Kanten farblich hervorheben, so dass der Anwender diese Fehlstellen deutlich erkennt. Einige Systeme schließen Detektionslücken bereits im Zuge der Bildung des Polygonnetzes oder können alle entdeckten Löcher automatisch in einem Arbeitsgang füllen, so dass von vornherein ein rundum geschlossenes Netz entsteht, wobei das automatische Schließen der Löcher oftmals nicht in der Qualität erfolgt, wie es vom Anwender gewünscht wird, so dass auch hier Nacharbeiten erforderlich sind. Dieses wird am Beispiel des zuvor vorgestellten Monitors besonders deutlich (s. Abb. 70).

Der abgebildete Monitor weist im Bereich der Mattscheibe große Detektionslücken auf, die im Zuge der Polygonisierung der Punktwolke automatisch geschlossen wurden. Da die Mattscheibe zudem eine großflächige Hinterschneidung darstellt, ist es erforderlich, diesen Bereich großflächig nachzubereiten, indem alle Dreiecke im Bereich der Mattscheibe gelöscht werden, um das so entstehende Loch plan zu verschließen.

Die Software sollte vielfältige Möglichkeiten bieten, zu löschende bzw. zu bearbeitende Polygone zu markieren. Hilfreich sind Werkzeuge wie ein Markierungsfenster, mit dem großflächige Bereiche rechteckig markiert werden können. Noch besser geeignet ist eine „Lasso“-Funktion, durch die der Anwen-

der ein geschlossenes Polygon mit beliebig vielen Eckpunkten auf dem STL zeichnen kann, dessen innenliegende Dreiecke markiert werden. Mit dieser Funktion kann gekrümmten Verläufen wesentlich besser gefolgt werden.

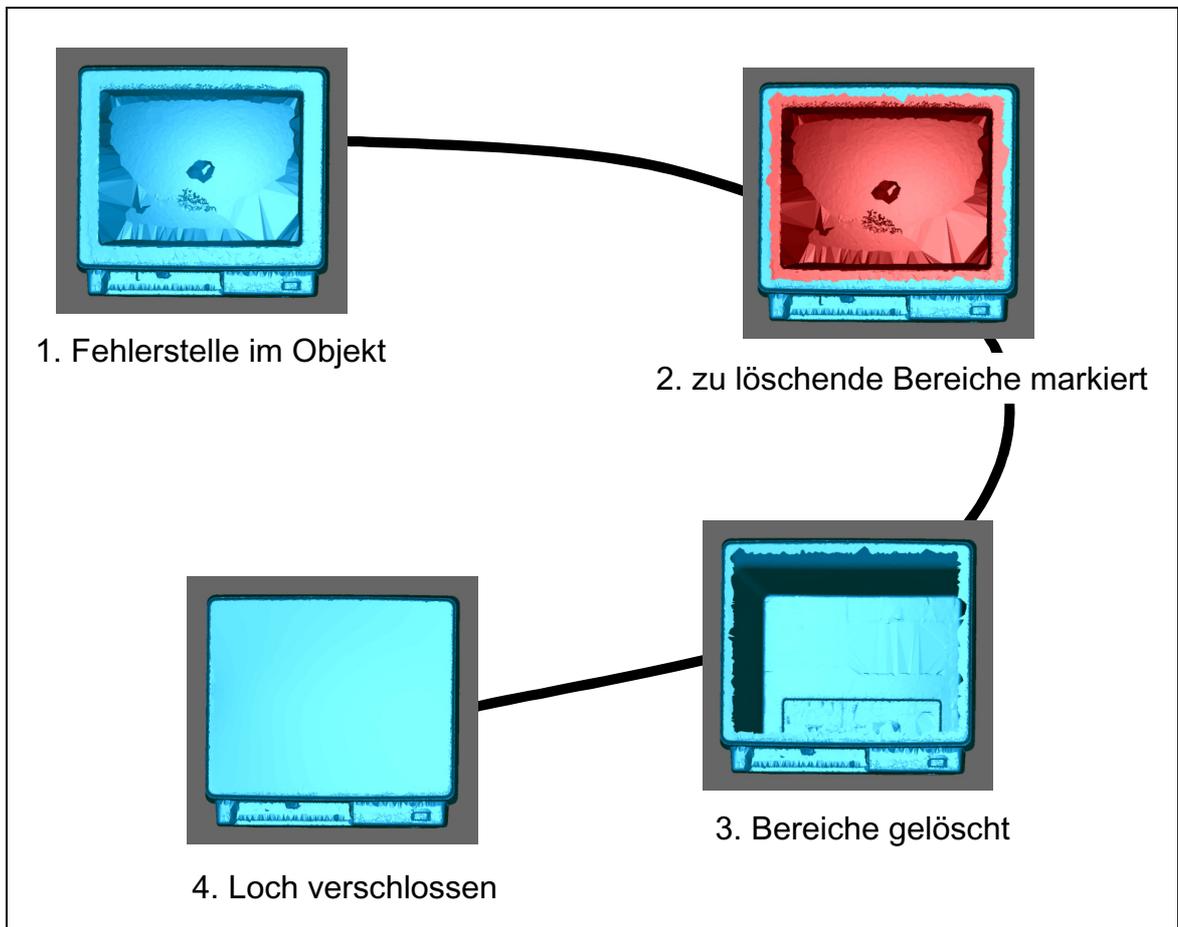


Abb. 70: Reparieren großer Löcher bzw. Beseitigung von Hinterschnitten

Für die gezielte Auswahl kleiner Bereiche bis hin zu einzelnen Dreiecken ist eine „Pinsel“-Funktion sehr gut geeignet. Die Auswahl geschieht hier wie mit einem Pinsel in der Hand durch einen Mauszeiger in Form eines Kreises mit einstellbarem Durchmesser, der per Maus über die Dreiecke geführt wird. Alle Dreiecke, über die dieser Kreis hinweggeführt wird, werden markiert. Ebenso nützlich ist eine „Linien“-Funktion zur Markierung exakter Kanten, mit der ein Anfangs- und ein Endpunkt auf dem Netz bestimmt wird. Alle Dreiecke, die von

der erzeugten Linie (mit einstellbarer Linienbreite) geschnitten werden, werden markiert.

Mit all diesen Hilfsmitteln – z. T. in Kombination miteinander – ist es möglich, einen großflächigen Bereich wie die Mattscheibe exakt zu selektieren. Anschließend werden die selektierten Dreiecke entfernt, so dass ein großflächiges Loch im Datensatz entsteht, dessen Umrandung der Software jedoch bekannt ist. Das entstehende Loch kann anschließend durch die Software stetig geschlossen werden.

Das Schließen von Löchern stellt eine besondere Herausforderung an das Leistungsvermögen der Software dar. Insbesondere im Hinblick auf die Möglichkeit zum Modellieren von Problemstellen werden einige wesentliche Funktionalitäten benötigt, die am Beispiel des in Abb. 71 dargestellten Schwingschleifergehäuses verdeutlicht werden. Der STL-Datensatz enthält einige für die Verpackung überflüssige Details, die entfernt werden sollen.

Zunächst wurden die zu entfernenden Dreiecke mit den zuvor beschriebenen Funktionen markiert und anschließend gelöscht, so dass ein Loch entsteht, welches über einen stark gekrümmten Bereich verläuft. Die Aufgabe der Software ist es, dieses Loch automatisch zu schließen.

Im einfachsten Fall ist der Algorithmus lediglich in der Lage, das Loch über kürzeste Entfernungen flach zu schließen. Das Bild, welches sich dann ergibt, erinnert an eine Folie, die über dieses Loch geklebt wurde (s. Abb. 72). Dieses Ergebnis stellt keine befriedigende Lösung dar.

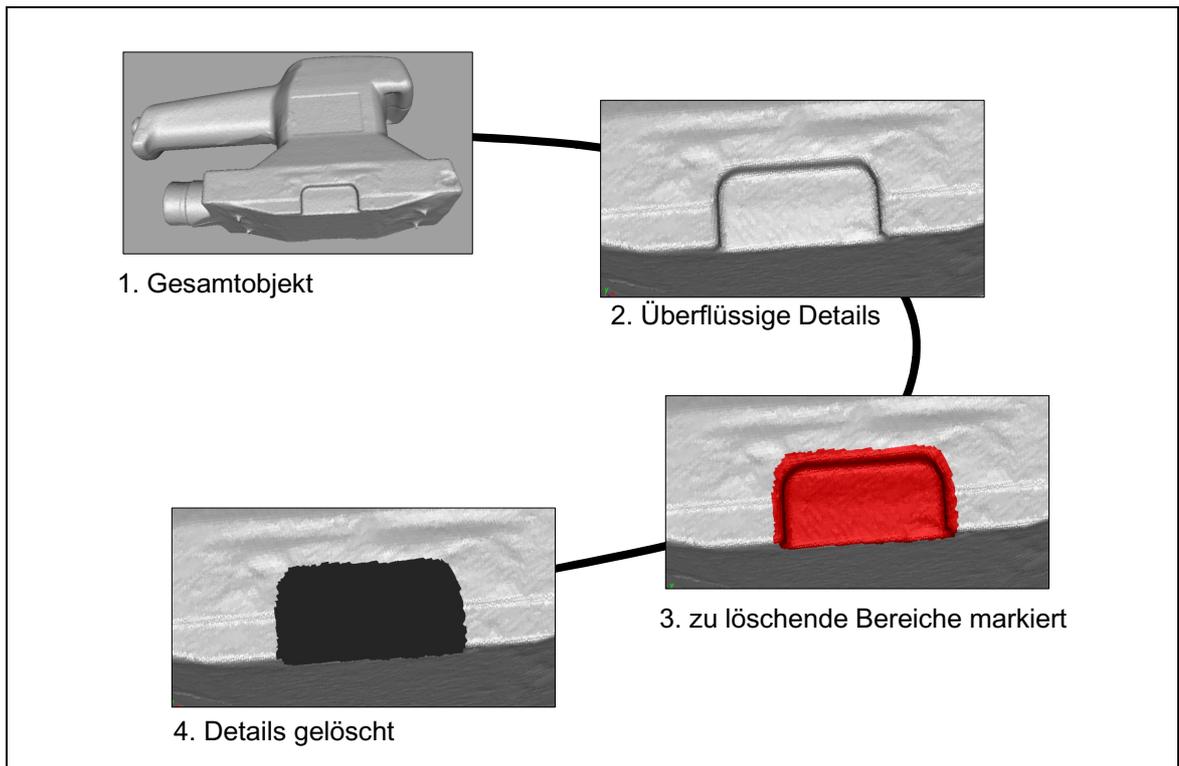


Abb. 71: Löcher über mehrfach gekrümmten Bereichen

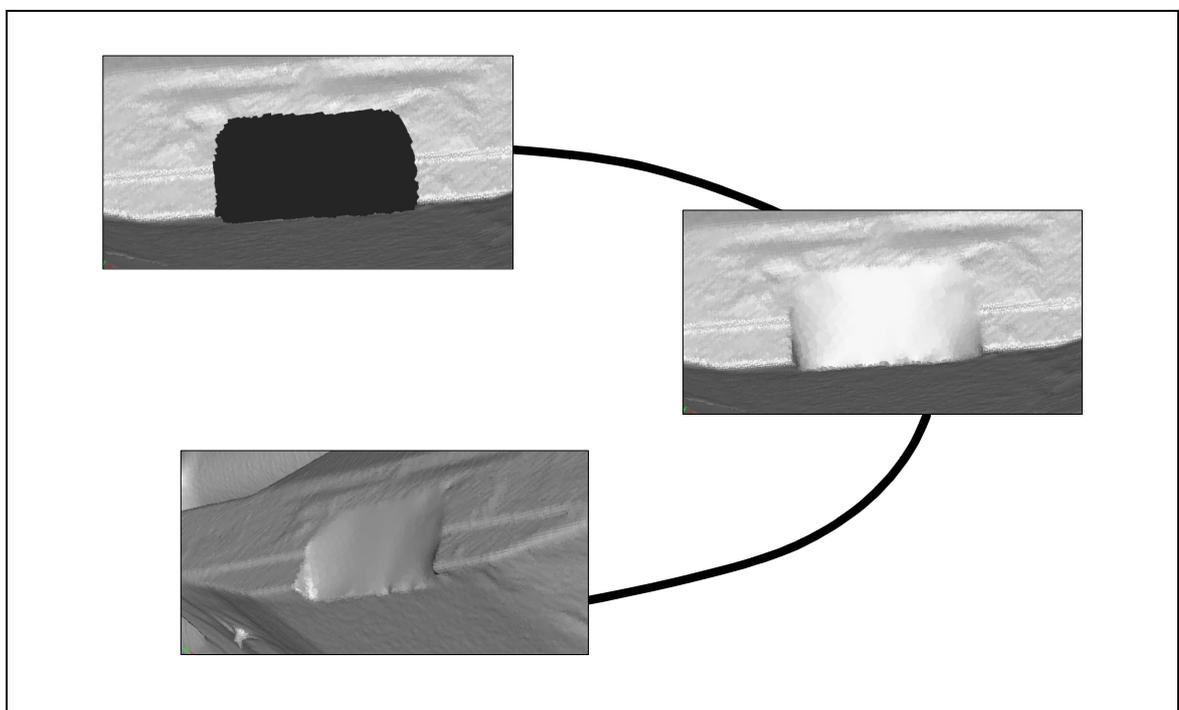


Abb. 72: Loch eben geschlossen

Eine verbesserte Funktion zum Schließen von Löchern arbeitet krümmungsstetig, d. h. die Umgebung eines Loches wird untersucht und beim Verschließen des Loches mit berücksichtigt, so dass ein stetiger Übergang entsteht. Diese Funktion ist bei leicht gekrümmten Flächen sehr hilfreich, stößt bei sehr stark oder mehrfach gekrümmten Bereichen aber auch an ihre Grenzen (s. Abb. 73).

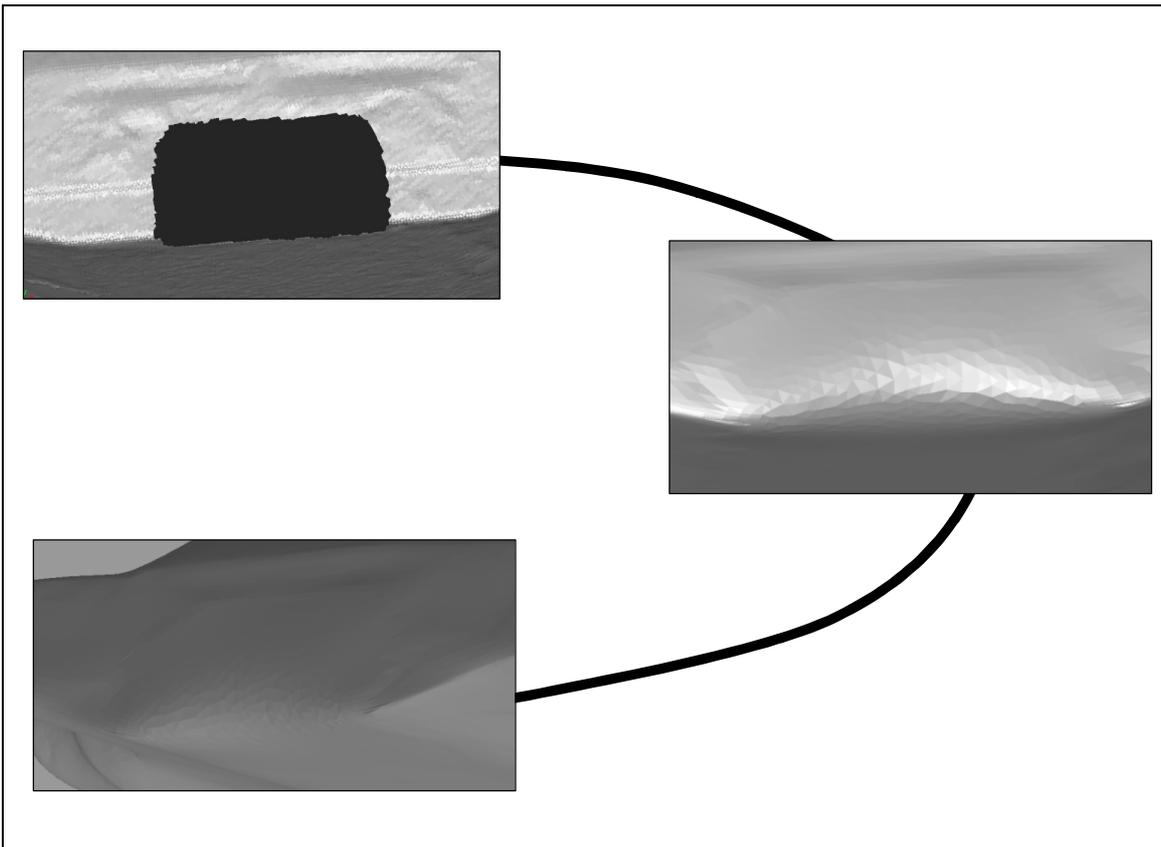


Abb. 73: Loch krümmungsstetig geschlossen

Um dieses Problem zu lösen und zu einem nutzbaren Ergebnis zu kommen, gibt es einen sehr einfachen Ansatz, der jedoch nicht von allen untersuchten Softwaresystemen effektiv umgesetzt wurde: Durch das manuelle Einfügen einzelner Dreiecke ist es hier möglich, ein Loch durch einen sehr schmalen Verbindungssteg zu überbrücken. Mit dieser Funktion ist es sehr leicht möglich, ein Loch durch Erstellen von mehreren „Brücken“ in mehrere Löcher aufzuteilen. Durch geschickte Wahl der Brücken entstehen dann Löcher, die mit

hinreichender Genauigkeit eben oder krümmungsstetig geschlossen werden können, und somit ein sehr brauchbares Ergebnis liefern (s. Abb. 74).

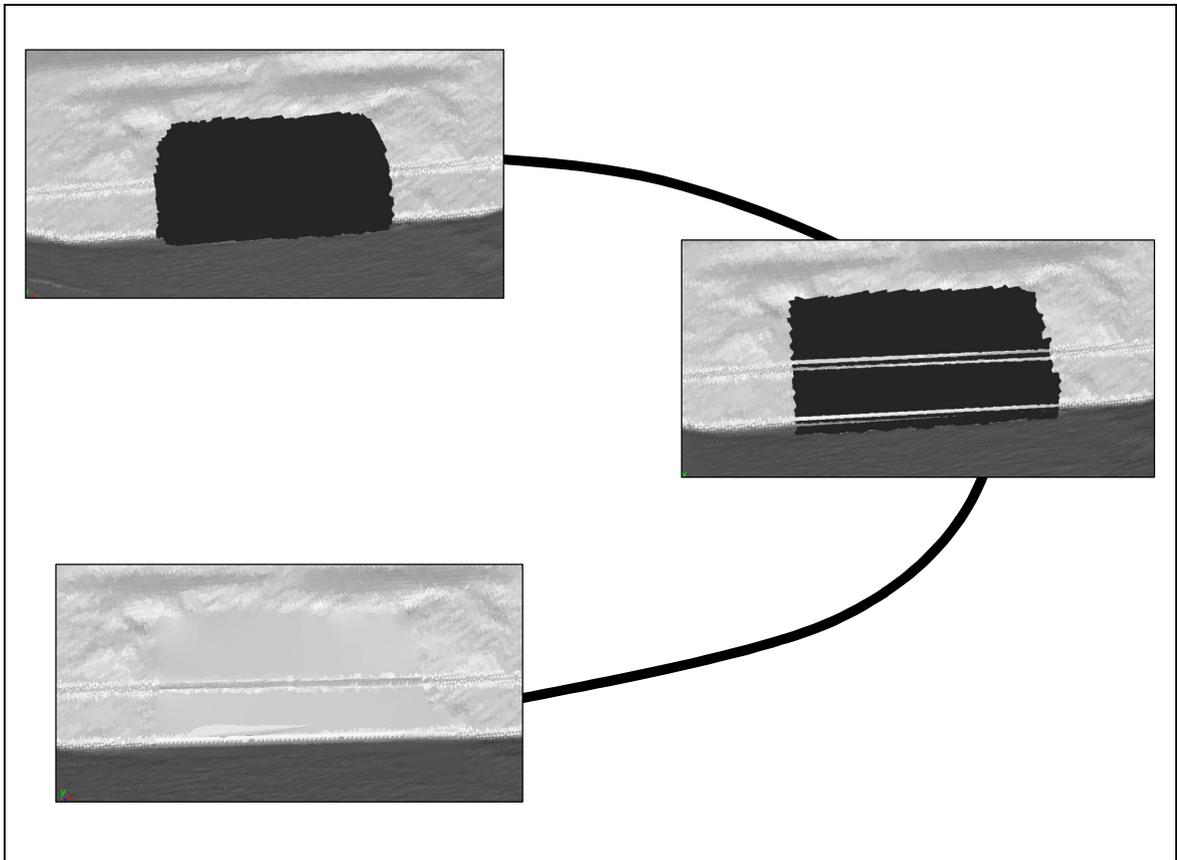


Abb. 74: Loch geschlossen durch geschicktes Hinzufügen einzelner Dreiecke als Brücke

Eine weitere Softwarelösung, die auf die Bearbeitung von STL-Datensätzen spezialisiert ist und keine Funktionen zur Erstellung von Flächendaten bietet, ist in der Lage, STL-Flächenpatches ähnlich einer NURBS-Fläche zu erzeugen. Die Stützpunkte dieser Flächenpatches liegen in der Umgebung um das Loch auf dem Plygongitter, können aber auch wie bei einer NURBS-Fläche modelliert werden. Hierdurch ergeben sich die besten Möglichkeiten, große oder mehrfach gekrümmte Bereiche individuell zu verschließen.

Das Bearbeiten von Problemstellen am STL-Datensatz beschränkt sich somit in erster Linie auf das geschickte Erzeugen und Wiederverschließen von Löchern,

wobei die Funktionalitäten der Softwaresysteme, die hierzu in der Lage sind, sehr unterschiedlich sind.

Darüber hinaus ist es derzeit so, dass die – nach praktischen Erfahrungen – drei wichtigsten und effektivsten Funktionalitäten (krümmungsstetiges Schließen, manuelles Hinzufügen von Dreiecken und NURBS-ähnliche STL-Patch-Generierung) auf mindestens zwei unabhängige Softwaresysteme verteilt sind. Will man alle drei Funktionalitäten nutzen können, bleibt derzeit nur die Alternative, zwei Systeme zu erwerben, wobei mit Anschaffungskosten in Höhe von ca. DM 25.000 für eines und ca. DM 40.000 für das andere Softwarepaket gerechnet werden muss. Viele andere und ggf. günstigere Softwaresysteme scheitern in der Regel bereits an den im Rahmen der Flächenrückführung üblichen großen Datenmengen.

Einzelne Softwarepakete verfügen jedoch zusätzlich über hilfreiche Werkzeuge, die ein „echtes“ Modellieren des Datensatzes ermöglichen. Hierbei werden formgebende Werkzeuge softwaretechnisch simuliert. Beispielsweise ist eine Funktion zu nennen, bei der der Mauszeiger in eine Kugel verwandelt wird. An allen Stellen des STL-Datensatzes, die mit dieser Kugel überstrichen werden, wird der Datensatz „eingedrückt“. Neben dem Durchmesser der Kugel kann auch die „Andruckkraft“ eingestellt werden, so dass sich hierdurch vielfältig Effekte erzielen lassen. Erweitert wurden diese Art von Funktionalitäten durch die Möglichkeit, dass die überstrichenen Bereiche des STL-Modells nicht eingedrückt, sondern herausgezogen werden können. Diese Funktionalitäten eignen sich jedoch vorwiegend für die Modellierung von komplexen Freiformflächen und weniger für einfachere Flächen oder Regelgeometrien. Mit dem System von Sensable /NN01/ werden diese Funktionalitäten um einen wesentlichen Schritt ergänzt: Der Mauszeiger wird hier durch einen externen Arm ersetzt, der von der Benutzerhand geführt wird. Hierdurch wird versucht, ein reales Werkzeug nachzuempfinden und in die virtuelle Welt zu übertragen. Dieses Hilfsmittel ist für eine Modellierung von STL-Datensätzen sicherlich sehr

hilfreich. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten müssen jedoch Anschaffungskosten in Höhe von ca. DM 50.000 berücksichtigt werden.

Es bleibt somit festzuhalten, dass die Softwarewerkzeuge zur Modellierung von STL-Datensätzen oftmals nicht die vielfältigen Möglichkeiten bieten, wie es Flächenmodellierer zur Bearbeitung von Flächendaten tun. Für die meisten Anwendungsfälle im Rahmen der Verpackungstechnik sind diese jedoch ausreichend. Durch Anschaffung zusätzlicher – oftmals sehr kostspieliger – Softwarepakete besteht jedoch zumindest die Möglichkeit, sämtliche Bearbeitungsmöglichkeiten verfügbar zu machen.

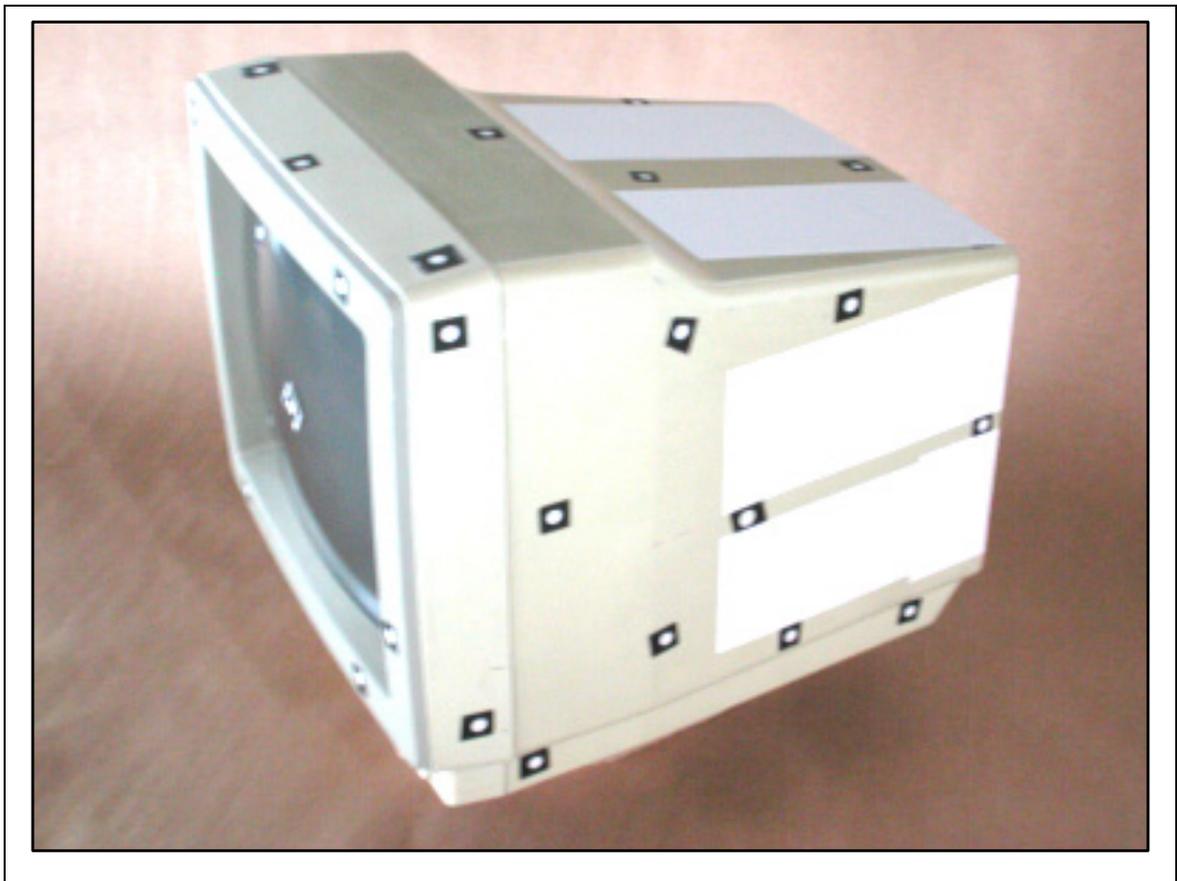


Abb. 75: Überklebte Bohrungen und Lüftungsschlitze

Auf der anderen Seite können durch einfache handwerkliche Manipulationen die zu digitalisierenden Objekte bereits vor dem Scan-Vorgang so präpariert

werden, dass zum einen die Kosten für zusätzliche Softwarepakete reduziert werden können. Zum anderen lassen sich damit zeitaufwendige softwaretechnische Manipulationen und Modellierarbeiten vermeiden. Praktische Untersuchungen haben gezeigt, dass der softwaretechnische Bearbeitungsaufwand am STL-Modell hierdurch zum Teil wesentlich reduziert werden kann. Bereits durch das Abkleben von Bohrlöchern und Lüftungsschlitzen (s. Abb. 75) lassen sich große Zeiteinsparungen erzielen.

Hingegen wäre es überflüssig, bspw. die Mattscheibe mit einer Folie abzukleben. Diese großflächige und ebene Fehlstelle kann mit der einfachsten Funktion zum Schließen von Löchern wesentlich einfacher softwaretechnisch bearbeitet werden (s. Abb. 70, S. 143). Beim Abkleben von Problembereichen muss jedoch beachtet werden, dass die applizierten Hilfsmittel auch wieder rückstandslos und insbesondere ohne großen Arbeitsaufwand entfernt werden können, da der Kunde oftmals keine Manipulationen an einem Prototypen wünscht. Insbesondere bei der Auswahl von Klebern ist in diesem Fall besondere Sorgfalt zu beachten.

Klebestreifen oder Label eignen sich oftmals besonders zum Überkleben von Problembereichen. Bei großflächigen Bereichen eignet sich die Methode des Überklebens nur bedingt, da sich hier oftmals Falten bilden, die selbst durch Wärmebehandlung nicht befriedigend – beachtet man das Detailauflösungsvermögen eines Sensorsystems – beseitigt werden können. Ebenso lassen sich bei stark oder mehrfach gekrümmten Problembereichen (s. Abb. 71, S. 145) keine befriedigenden Ergebnisse erzielen.

In diesen Fällen ist aber ein gezieltes Applizieren von schmalen Klebestreifen sehr hilfreich. Durch geschicktes Anbringen können hierdurch mehrfach gekrümmte Problembereiche in einfach gekrümmte Löcher unterteilt werden, die somit besonders leicht softwaretechnisch verschlossen werden können.

Wesentlich mehr Möglichkeiten zum Vorbereiten eines Objektes ergeben sich dann, wenn die rückstandslose Entfernung von Hilfsmitteln nicht beachtet

werden muss. In dem Fall kann durch Arbeiten mit formbaren Werkstoffen ein Objekt schnell und einfach manuell derart modelliert werden, dass es die endgültige Form bereits komplett vor dem Digitalisiervorgang erreicht hat. Die Materialauswahl reicht hier von Gips über PU-Schäume und Silikone bis hin zu Plasteline oder Modell-Clay, wobei letztere Materialien besonders gut manuell formbar sind. Abb. 76 zeigt am Beispiel eines Schwingschleifergehäuses eine manuelle Vorbehandlung bis hin zur endgültigen Formgebung.

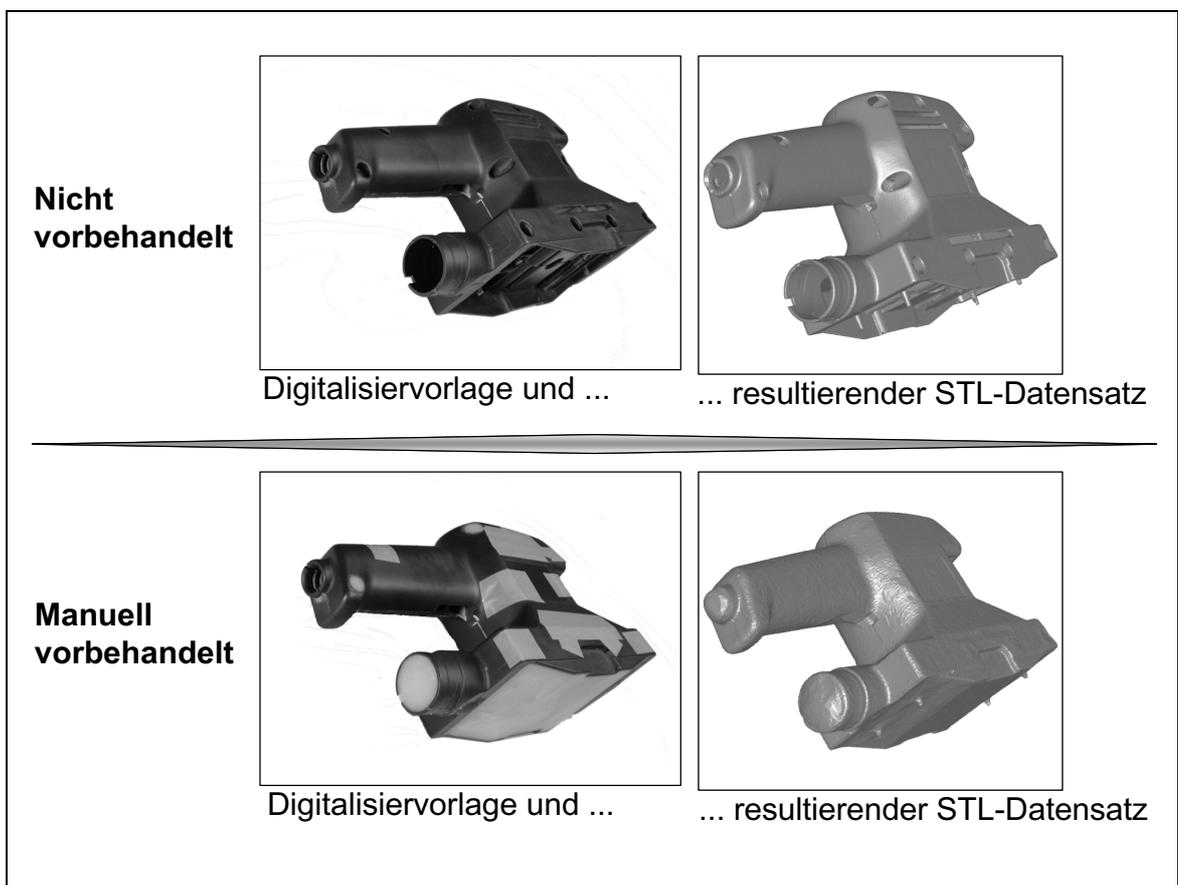


Abb. 76: Schleifer: Problembereiche durch manuelle Vorbereitungen vermindert

Durch manuelle Vorbereitungen lassen sich aufwendige Nachbearbeitungen in der Software vermeiden; Grenzen stellen hier jedoch die Anforderungen des Kunden hinsichtlich der Reversibilität der manuellen Maßnahmen dar.

5.4.3.2. Der halbautomatische Prozess der Flächenrückführung

Es gibt einige wenige Softwaresysteme am Markt, die in der Lage sind, halb-automatisch ein NURBS-Flächennetz über ein STL-Modell zu legen. Dieses Flächenmodell ist mindestens tangential stetig, so dass – wenn das STL-Modell rundum geschlossen ist – ein 3D-Volumenmodellierer in der Lage ist, aus diesem wasserdicht geschlossenen Flächenmodell ein echtes SOLID zu errechnen.

Die Arbeitsweise dieser Systeme ist relativ ähnlich und läuft nach folgenden Schritten ab:

Zunächst wird ein Kurvengitter über den STL-Datensatz gelegt, durch das der Datensatz in Felder eingeteilt wird, die jeweils von vier Umrandungskurven begrenzt werden. Im zweiten Schritt wird von der Software jedes Feld automatisch unterteilt und mit kleineren Flächenpatches nach einem $n \times m$ -Muster gefüllt. Die Anzahl der Unterteilungen n und m kann entsprechend der gewünschten Detailauflösung vom Anwender gewählt werden.

Unterschiede bei den Softwaresystemen gibt es im Rahmen des ersten Schrittes. Einige Softwarepakete sind bedingt in der Lage, markante Kanten und Übergänge (feature-lines) zu erkennen, also Bereiche mit größeren Krümmungsänderungen. Dementsprechend wird das Kurvengitter möglichst entlang der gefundenen feature-lines gelegt. Der Anwender hat zudem die Möglichkeit, das Kurvengitter über entsprechende Gitterpunkte frei zu bewegen und exakt an Konturverläufe anzupassen. Praktische Erfahrungen zeigen, dass Korrekturen an dem von der Software automatisch erstellten Gitternetz kaum zu vermeiden sind (s. Abb. 77), um ein optimales Ergebnis zu erhalten. Bei Objekten, die vorwiegend aus Freiformflächen bestehen und nur wenige stärkere Krümmungsänderungen aufweisen, führt die automatische Flächengenerierung jedoch in sehr schneller Zeit zu dem für die Verpackungstechnik gewünschten Ergebnis, da von vornherein stetige Übergänge zwischen den einzelnen Flächenpatches erzeugt werden.

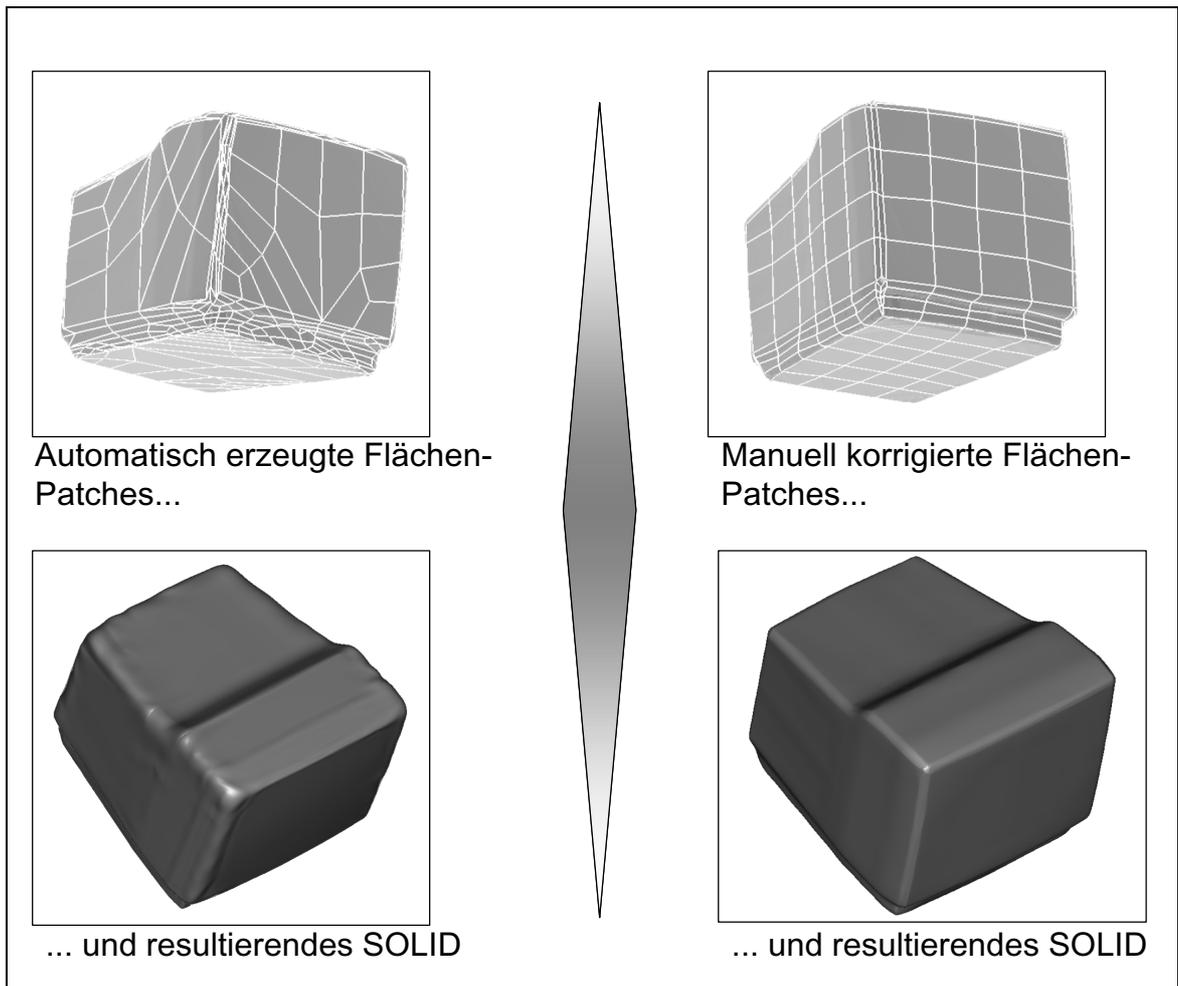


Abb. 77: Automatische Flächenpatcherzeugung

Andere Softwaresysteme bieten diesen Automatismus nicht, sondern ermöglichen es dem Benutzer, durch „malen“ von Kurvenzügen auf dem STL-Datensatz diesen eigenhändig zu segmentieren. Anschließend wird jedoch von der Software dieses vom Anwender erzeugte Gitternetz automatisch mit stetigen Flächenpatches gefüllt.

Der Anwender muss bei der manuellen Unterteilung des STL-Datensatzes jedoch bei den meisten Systemen darauf achten, dass stets ein Gitter mit exakt vier Umrandungslinien entsteht, damit automatisch NURBS-Flächen eingepasst werden können. Diese Einschränkung führt – wenn ein Datensatz rundum unterteilt werden muss – oft zu Problemen. Als sehr hilfreich in diesem Zusammenhang hat sich erwiesen, wenn das Softwaresystem auch in der Lage ist, ein

durch nur drei Umrandungskurven unterteiltes Feld mit Flächenpatches zu füllen. In der Praxis tritt der Fall sehr häufig ein, dass nach der manuellen Unterteilung mit Feldern, die durch vier Umrandungskurven abgegrenzt sind, Felder übrigbleiben, die nur drei Randkurven besitzen. Hier ist es sehr hilfreich, wenn dieses Feld ebenfalls automatisch mit Flächenpatches gefüllt wird. Noch wesentlich unkomplizierter ist es jedoch, wenn der Anwender die Anzahl der Umrandungskurven beliebig wählen kann. Hierdurch hat er die Möglichkeit, großflächige Bereiche, die durch ein Flächenpatch beschrieben werden sollen, beliebig abzuteilen. Beim Erzeugen des nächsten Flächenpatches muss die Software dann aber auch in der Lage sein, die Stetigkeit (C0, C1 oder C2) an jeder Berandungskurve, die von zwei Flächenpatches benutzt wird, nach Benutzerangaben einzustellen. Das Flächenrückführungsmodul von CATIA V5 bspw. arbeitet nach diesem Prinzip.

Der Vorteil der manuellen Vorgehensweise ist der, dass der Anwender von vornherein den Verlauf der Berandungskurven bestimmen kann. In praktischen Versuchen hat sich oft gezeigt, dass der von Beginn an manuelle Weg schneller zum Ziel führte, als der automatische Weg mit anschließender Anpassung der durch die Software gefundenen Umrandungskurven an die tatsächlichen Konturverläufe des STL-Datensatzes.

Es ist bei der Vorgehensweise von Softwaresystemen deutlich zu unterscheiden, ob diese es – wie zuvor beschrieben – unterstützen, dass der Anwender das STL-Modell zunächst mit Kurvenzügen – automatisch oder manuell – segmentiert, um dann anschließend automatisch alle Flächenpatches zu erzeugen, die ein rundum geschlossenes, stetiges Flächenmodell ergeben, oder ob der Anwender Fläche für Fläche durch Vorgabe von exakt vier Randkurven sequentiell erzeugen muss, um bei jeder neu erzeugten Fläche den Flächenübergang zu benachbarten Flächen vorzugeben. Nach letztgenanntem Prinzip arbeiten die meisten Softwaresysteme, um ein STL-Modell mit Flächenpatches zu überziehen. Diese Vorgehensweise ist in der Regel langwieriger, als einer der halbautomatischen Wege.

5.4.4. Kombinierte Vorgehensweise

Sowohl die konstruktive als auch die halbautomatische Vorgehensweise haben Vor- und Nachteile.

Bietet die konstruktive Vorgehensweise hauptsächlich den Vorteil, dass die Daten aus dem Digitalisiersystem in Form einer Punktwolke oder eines STL-Datensatzes direkt, d. h. ohne vorgeschaltete Modellierarbeiten, zur Flächenrückführung benutzt werden können, so wird dieser Vorteil dadurch erkauft, dass zusätzlich ein 3D-Flächenmodellierer eingesetzt werden muss, in dessen Bedienung der Anwender ebenso geschult sein muss. Insbesondere das stetige Verbinden der erzeugten Teilflächen zu einem wasserdichten Solid verlangt z. T. viel Erfahrung.

Die halbautomatische Vorgehensweise bietet hier den Vorteil, dass ein stetiges und geschlossenes Flächenmodell nahezu automatisch über den STL-Datensatz gelegt wird, wobei die Qualität der Flächendaten in der Regel so gut ist, dass ein Volumenmodellierer diese als Solid interpretieren kann, was letztendlich das endgültige Ziel ist. Als Nachteil muss gesehen werden, dass die Punktwolke bzw. der STL-Datensatz soweit modelliert werden muss, dass er bereits der endgültigen Form des gewünschten Flächen(Volumen)modells entspricht. Nicht alle Softwaresysteme, die überhaupt in der Lage sind, automatisch ein geschlossenes Flächenmodell zu erzeugen, verfügen jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt über ausreichend geeignete Funktionalitäten, diese Aufgabe zu lösen.

Des weiteren richtet sich die Wahl der Vorgehensweise nicht unerheblich nach der Formgebung des rückzuführenden Objektes. Eignet sich die konstruktive Vorgehensweise mehr für Objekte, die vorwiegend aus Regelgeometrien bestehen, so ist die halbautomatische Vorgehensweise vorwiegend für Freiformflächen-Objekte geeignet.

Um die Vorteile beider Vorgehensweisen nutzen zu können, empfiehlt sich bei vielen Objekten – insbesondere unter Beachtung der vielfältigen Formgebung

zu verpackender Produkte im Rahmen der Verpackungsentwicklung – eine kombinierte Vorgehensweise.

Zunächst sollte man die Möglichkeit ausnutzen, den nicht weiter modellierten Rohdatensatz des Digitalisiersystems zu verwenden, um darüber ein geschlossenes Netz von feature-lines zu legen, so dass diese automatisch mit Flächenpatches gefüllt werden. Durch geschickte Führung der feature-lines ist es möglich, Bereiche abzutrennen, von denen angenommen werden kann, dass sie durch den automatischen Prozess der Flächenanpassung nicht ausreichend genau wiedergegeben werden können. Der so erzeugte stetige und geschlossene Flächendatensatz kann anschließend in einem Flächenmodellierer an einigen wenigen Stellen gezielt nachbereitet werden, indem die zuvor vernachlässigten bzw. bewusst ausgegrenzten Problembereiche durch eine konstruktive Vorgehensweise beseitigt werden.

5.5. Manuelle oder softwaretechnische Aufbereitung von Problembereichen

Zur Klärung der Fragestellung, ob es effektiver ist, ein Objekt vor dem Digitalisieren manuell soweit vorzubereiten, dass es bereits die für die Verpackungsentwicklung optimale Form besitzt, oder sämtliche Problembereiche nachträglich mit Softwarefunktionen zu bearbeiten, wurden Digitalisierungen an zwei ausgewählten Objekten durchgeführt. Bei diesen Objekten handelt es sich zum einen um einen Matrixdrucker und zum anderen um einen Industriestaubsauger (s. Abb. 78).

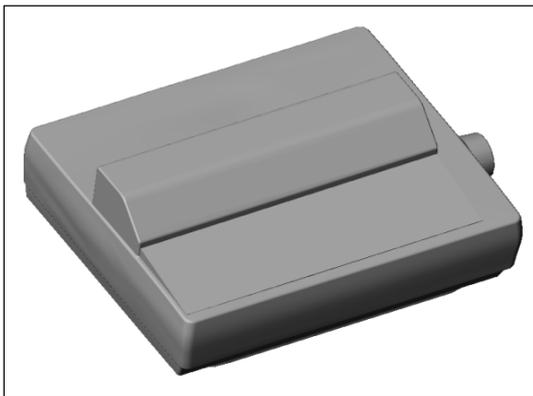
Beide Produkte sind realistische Beispiele für den Einsatz von Verpackungsformteilen aus EPS und enthalten die wichtigsten Problembereiche, die im Rahmen eines Reverse-Engineering-Prozesses unter verpackungstechnischen Gesichtspunkten zu beachten sind.



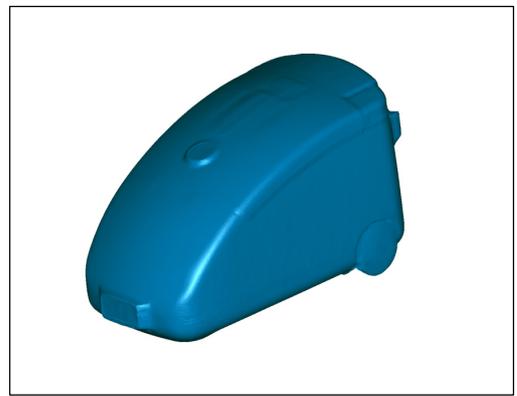
Objekt - Matrixdrucker



Objekt - Staubsauger



CAD-Modell - Matrixdrucker



CAD-Modell - Staubsauger

Abb. 78: Ausgewählte Versuchsobjekte als reales Objekt und CAD-Datensatz

Die Praxis hat jedoch gezeigt, dass eine strikte Trennung zwischen rein manueller Vorbereitung oder rein softwaregestützter Nachbereitung nicht sinnvoll ist. Demzufolge ist ein zeitlicher Vergleich beider Verfahren nicht praxisgerecht. Es kann vielmehr pauschal gesagt werden, dass, wenn eine Softwarefunktion zum krümmungsstetigen Schließen von Löchern vorhanden ist, diese einem großflächigen Abkleben entsprechender Problembereiche (bspw. s. Abb. 79) vorzuziehen ist. Im umgekehrten Fall, wenn diese Funktion nicht verfügbar ist, muss zuvor versucht werden, diesen Bereich möglichst optimal manuell vorzubereiten.

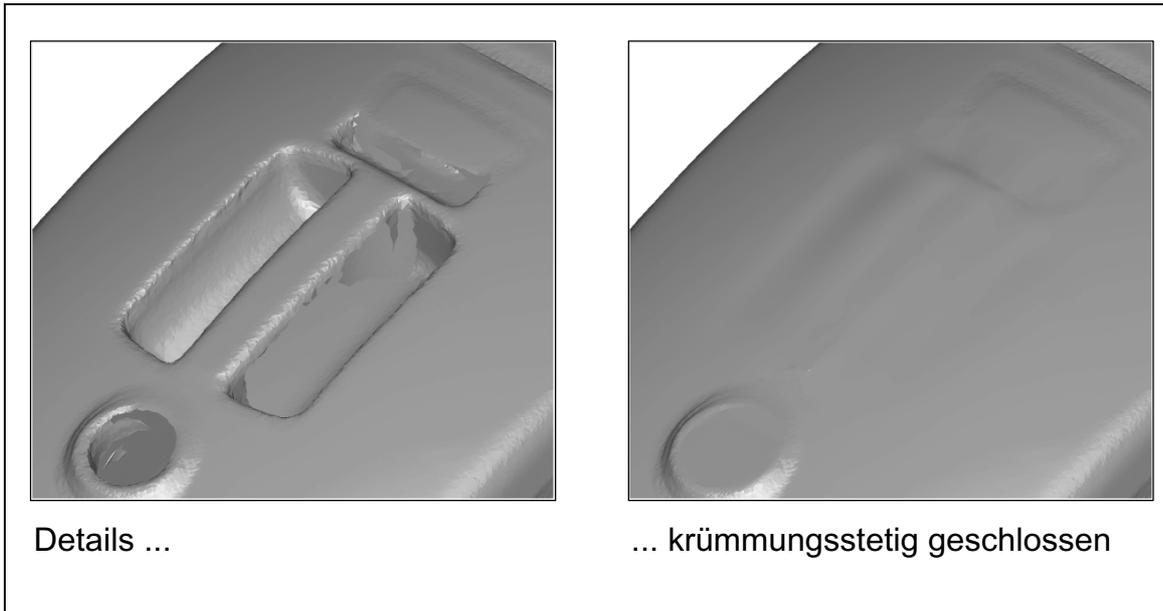


Abb. 79: Krümmungsstetiges Entfernen von Details (Bsp. Staubsauger)

Bei großflächigen und mehrfach gekrümmten Flächen wird eine manuelle Vorbehandlung zunehmend schwieriger, wohingegen softwaretechnisch durch gezieltes Einfügen von Dreiecken derartige Problembereiche sehr schnell mit ausreichender Genauigkeit beseitigt werden können (s. Abb. 80).

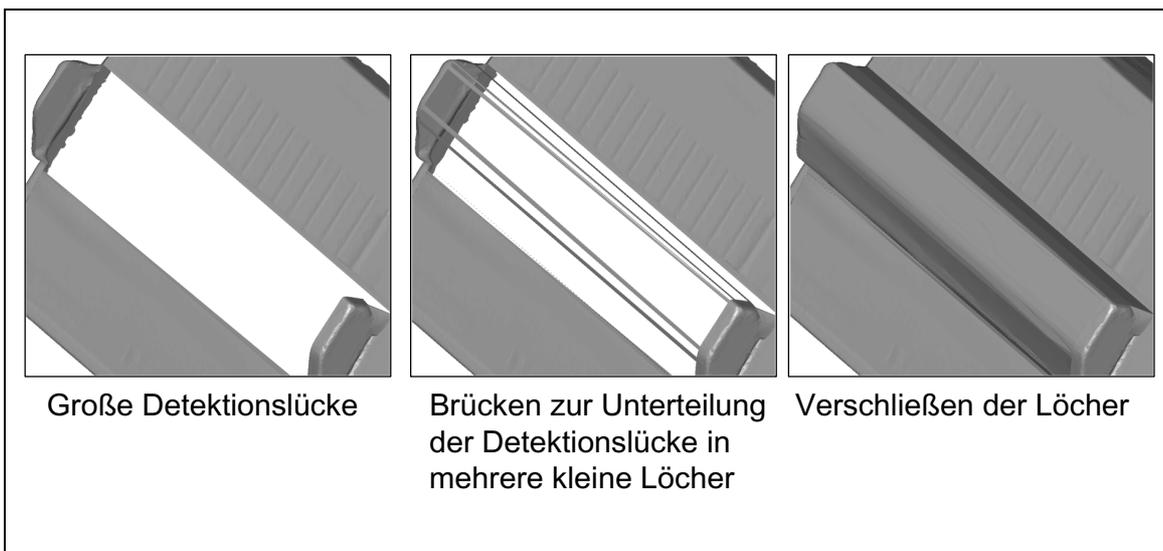


Abb. 80: Bearbeiten großer Löcher (Bsp. Matrixdrucker)

Ein manuelles Abkleben jedoch ist dann sinnvoll, wenn eine Vielzahl kleiner Löcher auf engem Raum zu bearbeiten sind (s. bspw. Abb. 81). Lüftungsschlitze, insbesondere wenn sie in eine gekrümmte Fläche eingebracht sind, sind softwaretechnisch oftmals nur schwer nachzubearbeiten.



Abb. 81: Vielzahl von Bohrlöchern und Lüftungsschlitzen

Zusammenfassend muss gesagt werden, dass keine pauschalen Empfehlungen gegeben werden können, wann welche Vorgehensweise bzgl. manueller Vorbereitung oder softwaretechnischer Nachbearbeitung oder einer Kombination von beidem vorzuziehen ist. Die Wahl der Vorgehensweise hängt weitestgehend von der Gestaltung des betrachteten Objektes ab, wobei die Geschwindigkeit von der Erfahrung des Anwenders bestimmt wird.

5.6. Fazit zum Einsatz des Reverse-Engineering

Aufgrund der Vielzahl im Rahmen dieser Arbeit praktisch durchgeführten Flächen- bzw. Volumenrückführungen von zu verpackenden Objekten kann festgehalten werden, dass keine Empfehlung für die eine oder die andere Vorgehensweise ausgesprochen werden kann. Die Vielzahl der geometrischen Formgebungen zu verpackender Objekte lässt es nicht zu, sich auf nur eine

Vorgehensweise zu beschränken. Es gibt in der betrieblichen Praxis Objekte, bei denen die rein konstruktive Vorgehensweise am schnellsten zum Ziel führt; ebenso gibt es Objekte, bei denen die halbautomatische Vorgehensweise die schnellste ist; bei anderen Objekten wiederum eignet sich eine kombinierte Vorgehensweise am besten. Dementsprechend muss auch bei jedem neuen Objekt von neuem entschieden werden, welche Vorgehensweise gewählt wird. Danach richtet sich auch, ob das Vorbereiten eines Objektes vor der Digitalisierung bspw. durch Abkleben von Details sinnvoll ist, oder ob die Aufgabe softwaretechnisch schneller und einfacher durchzuführen ist.

Eines hat sich im Rahmen der Praxis jedoch sehr deutlich gezeigt: Um das Thema Reverse-Engineering unter Beachtung der verpackungstechnischen Rahmenbedingungen erfolgreich in der Praxis umsetzen zu können, erscheint die Anschaffung eines geeigneten 3D-Flächenmodellierers als unumgänglich. Dieser 3D-Flächenmodellierer wird zusätzlich zu einem Softwarepaket benötigt, welches in der Lage ist, Punktwolken zu verarbeiten. Dieses wiederum sollte über Funktionalitäten verfügen, feature-lines auf Punktwolken bzw. STL-Datensätzen zu „malen“ und diese automatisch mit Flächenpatches zu füllen.

Zur Verdeutlichung der unterschiedlichen Vorgehensweisen – abhängig vom zu digitalisierenden Objekt – werden in Kap. 6.2.3, S. 196 ff. einige Praxisbeispiele vorgestellt.

5.7. Checkliste zum Aufbau einer Reverse-Engineering-Kette für die Entwicklung von Verpackungspolstern

Die nachfolgende Checkliste gibt einen Überblick über die wichtigsten Anforderungen zum Aufbau einer computergestützten Kette von der 3D-Digitalisierung hin zu einem 3D-SOLID unter verpackungstechnischen Gesichtspunkten.

Sie ist als ein Hilfsmittel zu verstehen, wobei eine Bewertung der einzelnen Optionen und ihre Auswirkungen auf die Effektivität dieser Kette nicht vorgenommen wird. Es wird erwartet, dass der Anwender dieser Checkliste mit den

grundlegenden Zusammenhängen und der Bedeutung und Gewichtung der einzelnen Optionen vertraut ist. Zu jedem Punkt der Checkliste ist ein Verweis auf das entsprechende Kapitel vorhanden, in dem dieser Punkt näher erläutert wird.

Was die Anforderungen an die Hardwarekomponenten des PC-Systems betrifft, auf dem die entsprechenden Softwarepakete installiert werden sollen, wird im Detail auf die Empfehlungen der Softwarehersteller verwiesen. Allgemein kann jedoch gesagt werden, dass der Prozessor unbedingt auf dem neuesten Stand sein sollte und dass ein Hauptspeicher von mind. 512 MByte (besser 1 GByte) und eine besonders leistungsfähige OpenGL-Grafikkarte benötigt wird.

Sensorsystem:

Tab. 9: Checkliste „Sensorsystem“

| Checkpunkt | Optionen | Kapitel |
|--|---|-------------------------|
| Nach welchem Prinzip arbeitet das Sensorsystem ? | <input type="radio"/> Optisch, mit Laser <input type="radio"/> Optisch, ohne Laser, mit strukturierter Beleuchtung <input type="radio"/> Optisch, ohne Laser, mit Moire-Effekt | 3.2.1 ff., S. 61 ff. |
| Welche Umgebungsbeleuchtung muss eingehalten werden ? | <input type="radio"/> Arbeitet bei Tageslicht <input type="radio"/> Arbeitet bei Raumbeleuchtung <input type="radio"/> Arbeitet unter abgedunkelten Messbedingungen | 5.2.2, S. 117 |
| Ist das Messvolumen einstellbar ? | <input type="radio"/> Ja <input type="radio"/> Nein | 5.2.1, S. 107 |
| Bei welchem Messvolumen bzw. Sichtfenster ist eine Messauflösung < 0,5 mm und eine Messgenauigkeit < 0,1 mm erreichbar ? | <input type="radio"/> < 200 mm x 200 mm <input type="radio"/> > 200 mm x 200 mm <input type="radio"/> > 400 mm x 400 mm <input type="radio"/> > 600 mm x 600 mm <input type="radio"/> Sonstige... | 5.2.1, S. 107 |

| | | |
|---|---|---|
| Wie groß ist der Triangulationswinkel bei optimalem Messvolumen ? | | 5.2.1, S. 107 |
| Welche Zeit wird für einen Messdurchgang (= Digitalisierung unter einer Orientierung) benötigt ? | | |
| Wieviele Belichtungszeiten werden unterstützt, um die komplette Objektiefe zu erfassen ? (nur relevant für optische Systeme ohne Laser) | <input type="radio"/> 1 Belichtungszeit <input type="radio"/> 2 Belichtungszeiten <input type="radio"/> 3 Belichtungszeiten <input type="radio"/> >3 Belichtungszeiten | 5.2.1, S. 107 |
| Verfügt das zum Sensor mitgelieferte Softwarepaket über Funktionen zur STL-Erstellung und –Manipulation ? | <input type="radio"/> Ja, STL-Erstellung <input type="radio"/> Ja, STL-Manipulation (z. B. Löschen, Schließen von Löchern etc.) <input type="radio"/> Nein | 3.2.2.1, S. 70 5.4.3.1, S. 141 |
| Verfügt das zum Sensor mitgelieferte Softwarepaket über Funktionen zur Reduktion der Datenmengen ? | <input type="radio"/> Ja, für gleichförmig Reduktion <input type="radio"/> Ja, für krümmungsabhängige Reduktion <input type="radio"/> Nein | 5.3.2, S. 125 |
| Kann die gewünschte Ziel-Datenmenge (z. B. Anzahl der Punkte) vor dem Reduktionsvorgang vom Anwender vorgegeben werden ? | <input type="radio"/> Ja <input type="radio"/> Nein | 5.3.2, S. 125 |

| | | |
|---|--|--|
| Welche Datenschnittstellen werden unterstützt ? | <input type="checkbox"/> IGES <input type="checkbox"/> VDA <input type="checkbox"/> ASCII (x-, y- und z-Koordinaten) <input type="checkbox"/> STL (ASCII / binär) | 3.2.2.1, S. 70 3.2.2.3, S. 80 |
|---|--|--|

Bearbeitung / Manipulation der Digitalisierdaten

Tab. 10: Checkliste „Bearbeitung / Manipulation der Digitalisierdaten“

| Checkpunkt | Optionen | Kapitel |
|--|---|------------------|
| Können Datenmengen mit mehr als 5 Mio. Messpunkten ohne Probleme bearbeitet werden ? | <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein | 5.3.2, S. 125 |
| Wird das Mergen von verschiedenen Teil-Punktewolken durch das Sensorsystem unterstützt ? | <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein (=> Zusatzsoftware erforderlich !) | 5.3.1, S. 118 |
| Wie wird das Mergen von verschiedenen Teil-Punktewolken durchgeführt ? | <input type="checkbox"/> Kopplung an CMM oder CNC-Fräse <input type="checkbox"/> Softwarebasierend <input type="checkbox"/> Über Referenzobjekte oder –marken | 5.3.1, S. 118 |
| Sind Funktionen zur Reduktion der Datenmengen vorhanden ? | <input type="checkbox"/> Ja, für gleichförmige Reduktion <input type="checkbox"/> Ja, für krümmungsabhängige Reduktion <input type="checkbox"/> Nein | 5.3.2, S. 125 |
| Kann die gewünschte Ziel-Datenmenge (z. B. Anzahl der Punkte) vor dem Reduktionsvorgang vom Anwender vorgegeben werden ? | <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein | 5.3.2, S. 125 |

| | | |
|--|--|--------------------|
| Können ausgewählte Polygone gelöscht werden? | <input type="radio"/> Ja <input type="radio"/> Nein | 5.4.3.1, S. 141 |
| Welche Hilfsmittel stehen zum Auswählen von Polygonen zur Verfügung? | <input type="radio"/> Fenster <input type="radio"/> Linie <input type="radio"/> Pinsel <input type="radio"/> Lasso <input type="radio"/> Sonstige ... | 5.4.3.1, S. 141 |
| Sind Funktionen zum Schließen von Löchern vorhanden ? | <input type="radio"/> Ja, Löcher werden über Ebenen verschlossen <input type="radio"/> Ja, Löcher werden krümmungsstetig verschlossen <input type="radio"/> Nein | 5.4.3.1, S. 141 |
| Können einzelne Polygone über ein Loch hinweg eingefügt werden ? | <input type="radio"/> Ja <input type="radio"/> Nein | 5.4.3.1, S. 141 |
| Sind Funktionen zum Formen von STL-Datensätzen vorhanden (z. B. Glätten, Eindrücken, Herausziehen...)? | <input type="radio"/> Ja <input type="radio"/> Nein | 5.4.3.1, S. 141 |
| Können Punktwolken schattiert dargestellt werden ? | <input type="radio"/> Ja <input type="radio"/> Nein | |
| Kann ein „wasserdichtes“ und fehlerfreies STL-Modell von Rundum-Digitalisierungen generiert werden ? | <input type="radio"/> Ja <input type="radio"/> Nein | 5.4.3.1, S. 141 |

| | | |
|---|--|---|
| Welche Schnittstellen werden für den Datenaustausch unterstützt ? | <ul style="list-style-type: none"> o IGES (Kurven) o VDA (Punkte) o ASCII (x-, y- und z-Koordinaten) (Punkte) o STL (Polygone) o Andere ... | <p>3.2.2.1, S. 70</p> <p>3.2.2.3, S. 80</p> |
|---|--|---|

Erzeugung von Flächendaten

Tab. 11: Checkliste „Erzeugung von Flächendaten“

| Checkpoint | Optionen | Kapitel |
|---|---|--|
| Wie werden Flächen aus den Digitalisierdaten erzeugt ? | <ul style="list-style-type: none"> o Weitestgehend automatisch über die gesamten Digitalisierdaten o Weitestgehend automatisch nach (manueller) Erzeugung eines Gitters aus feature-lines o Manuell, Fläche für Fläche o Export von Schnittkurven in einen Flächenmodellierer | <p>5.4.2 ff., S. 134</p> <p>5.4.3 ff., S. 140</p> <p>5.4.4 ff., S. 155</p> |
| Können Daten durch Zeichnen von feature-lines segmentiert werden und werden diese feature-lines bei der Erzeugung von Flächen berücksichtigt? | <ul style="list-style-type: none"> o Ja, Zeichnen von Hand möglich, Endpunkte und Linien werden automatisch gefangen o Ja, feature-lines werden an Stellen großer Krümmungsänderungen automatisch erzeugt o Nein | <p>5.4.3.21 52</p> |
| Müssen die erzeugten feature-lines ein geschlossenes Maschennetz ergeben ? | <ul style="list-style-type: none"> o Ja o Nein, auch einzelne Bereiche können gezielt segmentiert werden | <p>5.4.3.2, S. 152</p> |

| | | |
|---|---|--------------------|
| Welche Geometrien innerhalb des erzeugten Netzes von feature-lines werden unterstützt ? | <input type="radio"/> Vier Umrandungslinien <input type="radio"/> Drei Umrandungslinien <input type="radio"/> Sonstige... | 5.4.3.2, S. 152 |
| Können feature-lines auch nachträglich manipuliert werden ? | <input type="radio"/> Ja <input type="radio"/> Nein | 5.4.3.2, S. 152 |
| Können feature-lines in CAD-Systeme exportiert werden (z. B. über IGES) ? | <input type="radio"/> Ja <input type="radio"/> Nein | 5.4.3.2, S. 152 |
| Können Schnitte durch den Datensatz gelegt werden (bspw. über Ebenen durch 3 Punkte) ? | <input type="radio"/> Ja <input type="radio"/> Nein | 5.4.2.1, S. 135 |
| Kann die Stetigkeit der Flächenübergänge festgelegt werden ? | <input type="radio"/> Ja, für alle Flächen einheitlich <input type="radio"/> Ja, für jede Fläche einzeln <input type="radio"/> Nein | 5.4.3.2, S. 152 |
| Welche Stetigkeiten können gewählt werden ? | <input type="radio"/> C0 <input type="radio"/> C1 <input type="radio"/> C2 | 5.4.3.2, S. 152 |
| Ist das erzeugte Flächenmodell „wasserdicht“ und wird in einem parametrischen Volumenmodellierer direkt als SOLID erkannt ? | <input type="radio"/> Ja <input type="radio"/> Nein | 3.2.2.1, S. 70 |
| Welche Art Flächendaten werden erzeugt ? | <input type="radio"/> NURBS <input type="radio"/> Andere ... | 3.2.2.1, S. 70 |

| | | |
|---|--|--|
| Welche Schnittstellen stehen zum Austausch der Flächendaten zur Verfügung ? | <ul style="list-style-type: none">o IGESo VDA-FSo STEPo Direktschnittstellen zu verschiedenen CAD-Systemen...o Andere... | 3.2.2.1, S. 70 3.2.2.3, S. 80 |
|---|--|--|

6. Wirtschaftlichkeitsrechnung

6.1. Grundlagen

Die Anschaffung sowie der Einsatz einer durchgehend computergestützten Entwicklungskette für Verpackungsformteile ist für ein Verpackungsunternehmen mit kapitalintensiven Investitionen verbunden, die eine betriebswirtschaftliche Analyse der Situation und der Konsequenzen einer derartigen Investition erfordern.

Für Investitionsentscheidungen stehen den Verpackungsunternehmen dabei zahlreiche Methoden zur Auswahl, deren generelle Vorgehensweise gleich ist. Es wird der Einsatz von finanziellen Mitteln dem sich in der darauffolgenden Zeit ergebenden Nutzen gegenübergestellt. Die Unterschiede der Methoden beruhen zum einen auf den Kriterien für die Wirtschaftlichkeit (Zielsetzung des Investors) und zum anderen auf den Eigenschaften der verfügbaren Datenbasis, die entweder auf sicheren Erwartungen oder wegen Unsicherheiten auf Wahrscheinlichkeiten beruhen.

Für die Analyse von Entscheidungen, deren Nutzen sich monetär bewerten lässt, bieten sich die Methoden der traditionellen Wirtschaftlichkeitsanalyse an.

In der Fachliteratur wird bei der traditionellen Wirtschaftlichkeitsanalyse weiter zwischen statischen und dynamischen Investitionsverfahren unterschieden. Zu den statischen Verfahren zählen im wesentlichen¹¹:

- die Kostenvergleichsrechnung,
- die Gewinnvergleichsrechnung,
- die Rentabilitätsvergleichsrechnung sowie
- die statische Amortisationsrechnung.

¹¹ Vg. Hüttner, M. (1995), S. 234-235 /Hüt95/.

Zu den wichtigsten dynamischen Verfahren gehören¹²:

- die Kapitalwertmethode,
- die Annuitätenmethode,
- die Methode des internen Zinsfußes sowie
- die dynamische Amortisationsrechnung.

6.1.1. Statische Investitionsrechenverfahren

Bei den statischen Verfahren wird angenommen, dass die Zielsetzung des Investors sich nicht an den Zielsetzungen der Einkommens- oder Vermögensmaximierung orientiert, sondern an Zielsetzungen wie Gewinnmaximierung, Kostenminimierung und Rentabilitätsmaximierung. Als Datenbasis dieser Verfahren werden nicht Zahlungs-, sondern Erfolgsgrößen in Form von Erlösen und Kosten herangezogen. Dabei vernachlässigen die statischen Investitionsrechnungen den Zeitbezug der Zielsetzungen der Investoren, da sie die zeitliche Struktur der eingesetzten Erfolgsgrößen nicht berücksichtigen, sondern mit durchschnittlichen Erfolgsgrößen rechnen. Bei den Verfahren der Kosten-, Gewinn- und Rentabilitätsvergleichsrechnung wird der Zeitbezug in der Weise weiter ausgeklammert, dass der Bezugszeitraum der Rechnung von dem Planungszeitraum des Investors abweicht, indem sich die Rechnungen auf eine Abrechnungsperiode der Buchhaltung in der Höhe eines Jahres beziehen und mit periodisierten Erfolgsgrößen gearbeitet wird.

Kostenvergleichsrechnung

Bei der Beurteilung von Investitionen auf der Grundlage einer Kostenvergleichsrechnung wird die negative Erfolgskomponente in Form der Kosten untersucht bzw. mit den Kosten der anderen Alternativen verglichen, so dass das Entscheidungskriterium die minimalen durchschnittlichen Kosten sind. Voraussetzung für einen Vergleich mehrerer Investitionsalternativen ist, dass die Höhe der Er-

¹² Vgl. Kruschwitz, L. (1990), S. 43 /Kru90/.

löse identisch sind bzw. bei einer Produktion die Produkte die gleichen quantitativen sowie qualitativen Eigenschaften aufweisen.

In der Kostenvergleichsrechnung sind alle Kosten zu berücksichtigen, die sich aufgrund der Entscheidung ändern (Prinzip der relevanten Kosten). Zu den relevanten Kosten zählen die Betriebskosten, insbesondere Material- sowie Personalkosten, Betriebsmittel- und Betriebshilfsmittelkosten und alle Kapitalkosten meist in Form von kalkulatorischen Abschreibungen und Zinsen.

Die Ermittlung der kalkulatorischen Abschreibung erfolgt durch eine lineare Periodisierung der *Anschaffungskosten* über die *Nutzungsdauer in Jahren*, wobei der *Restwert_n* des Investitionsobjektes am Ende der Nutzungsdauer nicht als Kostenfaktor berücksichtigt werden darf. Folglich wird die kalkulatorische Abschreibung nach folgender Gleichung bestimmt¹³:

$$\text{Kalkulatorische Abschreibung} = \frac{\text{Anschaffungskosten} - \text{Restwert}_n}{\text{Nutzungsdauer in Jahren}} \quad (6-1)$$

Mit den kalkulatorischen Zinsen werden die Finanzierungskosten des durchschnittlich gebundenen Kapitals berücksichtigt. Wie der Gleichung 6-2 zu entnehmen ist, wird ein Mittelwert aus den Anschaffungskosten und dem Restwert des Investitionsobjektes im letzten Nutzungsjahr mit dem kalkulatorischen Zinssatz p bewertet.

$$\text{Kalkulatorische Zinsen} = \frac{\text{Anschaffungskosten} + \text{Restwert}_{n-1}}{2} \cdot \frac{p}{100} \quad (6-2)$$

Die alleinige Anwendung dieses Verfahrens zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit einer durchgehend computergestützten Entwicklungskette ist nicht ausreichend. Es kann mit dieser Vorgehensweise das Verfahren ermittelt werden, das bei vorher festgelegten Annahmen die geringsten Kosten aufweist, jedoch kann keine Aussage getroffen werden, ob das Verfahren mit den geringsten Kosten

¹³ Vgl. Manz, K. und Dahmen, A. (1993), S. 10 /Man93/.

überhaupt Gewinn abwirft. Dazu muss entweder die Rentabilitätsvergleichsrechnung mit herangezogen oder die Gewinnvergleichsrechnung angewendet werden.

Gewinnvergleichsrechnung

Das Verfahren der Gewinnvergleichsrechnung verwendet als Entscheidungskriterium den maximalen durchschnittlichen Gewinn. Dabei errechnet sich der Gewinn aus der Differenz zwischen den durchschnittlichen Erlösen und den durchschnittlichen Kosten. Dieses Verfahren sollte im Rahmen von Auswahlentscheidungen nur dann angewendet werden, wenn es sich um Investitionen mit gleicher Nutzungsdauer sowie mit gleichem Kapitaleinsatz handelt, da es sonst zu Fehlentscheidungen führen könnte. Gründe für diese Voraussetzungen sind zum einen, dass bei unterschiedlicher Nutzungsdauer Folgeinvestitionen nicht berücksichtigt werden, und zum anderen, dass bei unterschiedlichem Kapitaleinsatz die Investition des Differenzbetrages nicht erfasst wird¹⁴.

Die Anwendung dieses Verfahrens auf die beiden Alternativverfahren (manuell gegen computergestützt) ist dann zu empfehlen, wenn an Stelle des relevanten Umsatzes resultierend aus dem Einsatz des jeweiligen Verfahrens die Kostenersparnisse betrachtet werden. Probleme aufgrund unterschiedlicher Nutzungsdauer dürften in diesem Fall auch nicht auftreten, da davon ausgegangen werden kann, dass ein Unternehmen bei dieser Investitionsplanung keine unterschiedliche Nutzungsdauer ansetzt.

Rentabilitätsvergleichsrechnung

Die Rentabilitätsvergleichsrechnung setzt den durchschnittlichen Gewinn bzw. die durchschnittliche Kostenersparnis ins Verhältnis zum durchschnittlichen Kapitaleinsatz und bestimmt somit die Durchschnittsverzinsung eines Investitionsobjektes. Das Entscheidungskriterium ist bei diesem Verfahren die maximale durchschnittliche Rentabilität. Bei der Errechnung der Rentabilität ist zu

¹⁴ Vgl. Wöhe, G. (1990), S. 774 /Wöh90/.

beachten, dass hier im Gegensatz zur Gewinnvergleichsrechnung die kalkulatorischen Zinsen nicht gewinnmindernd verrechnet werden, um eine Vergleichsmöglichkeit dieser Kennzahl mit der geforderten Mindestverzinsung, dem kalkulatorischen Zinssatz, zu haben. Folglich kann der funktionelle Zusammenhang wie folgt beschrieben werden¹⁵:

$$\text{Rentabilität} = \frac{\phi \text{ Gewinn bzw. } \phi \text{ Kostenersparnis vor Zinsen}}{\phi \text{ Kapitaleinsatz}} \quad (6-3)$$

Um eine Vergleichbarkeit mehrerer, sich ausschließender Alternativen durchführen zu können, sollten zwei Voraussetzungen erfüllt sein. Zum einen sollte die Nutzungsdauer der Alternativen gleich sein oder die untersuchten Investitionen sind beliebig oft wiederholbar. Zum anderen sollte der Kapitaleinsatz der Alternativen identisch sein.

Bei der Anwendbarkeit dieses Verfahrens auf die zu untersuchenden alternativen Entwicklungsverfahren bietet sich an, die durchschnittlichen Kostenersparnisse der Verfahren als Erfolgskomponente zu nehmen.

Statische Amortisationsrechnung

Das Amortisationsrechnungsverfahren, auch pay-off Rechnung genannt, errechnet den Zeitpunkt, an dem die angefallenen Ausgaben für die Investitionsalternative durch die investitionsbedingten Einnahmen ausgeglichen sind. Nach diesem Verfahren ist die Investitionsalternative vorzuziehen, welche die kürzeste Amortisationszeit aufweist.

Dabei sind zwei Varianten der Amortisationsrechnung hinsichtlich der Ermittlung der laufenden Einnahmen und Ausgaben zu unterscheiden¹⁶:

- Kumulationsmethode und
- Durchschnittsmethode.

¹⁵ Vgl. Schierenbeck, H. (1983), S. 293-294 /Sch83/.

¹⁶ Vgl. Manz, K. und Dahmen, A. (1993), S. 13 /Man93/.

Bei der Kumulationsmethode werden Erwartungswerte über die Höhe der anfallenden Einnahmen und Ausgaben für jedes Nutzungsjahr bestimmt und anschließend miteinander verrechnet. Die Differenzbeträge werden kumuliert und dem Kapitaleinsatz für jedes Nutzungsjahr gegenübergestellt. Diese Variante ist insbesondere dann anzuwenden, wenn große Unterschiede bei den jährlichen Rückflüssen zu erwarten und quantifizierbar sind.

Dahingegen wird bei der Durchschnittsmethode mit einem durchschnittlichen Rückfluss je Jahr gerechnet. Dabei gilt die Gleichung

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{ursprünglicher Kapitaleinsatz}}{\phi \text{ Rückfluß je Jahr}} \quad (6-4)$$

Unter der Annahme, dass die Erlöse eines Jahres im gleichen Jahr zu Einnahmen werden und dass alle Kosten mit Ausnahme der kalkulatorischen Abschreibungen und der kalkulatorischen Zinsen auch gleichzeitig Ausgaben sind, kann folgende Vereinfachung der Gleichung (6-4) vorgenommen werden¹⁷:

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{ursprünglicher Kapitaleinsatz}}{\phi \text{ Jahresgewinn} + \phi \text{ kalk. Abschreibungen} + \phi \text{ kalk. Zinsen je Jahr}} \quad (6-5)$$

Anstatt des durchschnittlichen Gewinns pro Jahr bietet es sich bei diesem Verfahren an, diesen durch die durchschnittlichen Kostenersparnisse pro Jahr zu ersetzen.

Bei der Anwendung dieses Verfahrens sollte insbesondere immer beachtet werden, dass das Verfahren nichts über die Höhe des monetär bewertbaren Nutzens aussagt.

¹⁷ Vgl. Däumler, K.-D. (1989), S. 157-162 /Däu89/.

6.1.2. Dynamische Investitionsrechenverfahren

Im Gegensatz zu den statischen Investitionsverfahren orientieren sich die dynamischen Investitionsverfahren an mehrperiodigen Zielsetzungen wie beispielsweise Vermögensstreben oder Einkommensstreben. Dabei werden hier keine Erfolgsgrößen als Datenbasis, sondern Größen aus der Zahlungsebene in Form von Ein- sowie Auszahlungen verwendet. Ferner handelt es sich nicht um periodisierte Durchschnittsgrößen, sondern die gesamte Zahlungsstruktur bzw. Reihe wird bei den dynamischen Verfahren berücksichtigt. Die zu den unterschiedlichen Zeitpunkten anfallenden Zahlungen werden mit Hilfe der Zinseszinsrechnung auf einen gemeinsamen Vergleichszeitpunkt ab- oder aufgezinst. Aufgrund der vorgenommenen Ab- bzw. Aufzinsung sowie der Berücksichtigung der zeitlichen Struktur der Zahlung kann ein realitätsnäheres bzw. genaueres Ergebnis erzielt werden.

Bei der Anwendung der dynamischen Verfahren ist im Vorfeld zu entscheiden, welcher Kalkulationszinsfuß anzusetzen ist. Hierbei sind zwei Möglichkeiten denkbar. Entweder wird ein vollkommener Finanzmarkt, bei dem der Soll-Zins gleich dem Haben-Zins ist, oder ein unvollkommener Finanzmarkt, bei dem der Soll-Zins größer als der Haben-Zins ist, betrachtet. Im Rahmen der Arbeit wird unter Berücksichtigung der derzeitigen Situation am Finanzmarkt und möglicher Prognosefehler bei der Bestimmung einiger Daten davon ausgegangen, dass eine Gleichsetzung der beiden Zinsen vertretbar ist¹⁸.

Kapitalwertmethode

Die Kapitalwertmethode ist ein Spezialfall der Endwertmaximierungsmodelle. Hierbei wird die Kenngröße „Kapitalwert“ ermittelt, indem alle Zahlungsüberschüsse e_t durch Multiplikation mit dem Abzinsungsfaktor $(1+i)^{-t}$ jeweils auf den Zeitpunkt $t=0$ abgezinst und addiert werden. Somit kann der Kapitalwert K in seiner Grundform mit folgender Gleichung errechnet werden¹⁹:

¹⁸ Vgl. Adam, D. (2000), S. 118-119 /Ada00/.

¹⁹ Vgl. Süchting, J. (1995), S. 304-311 /Süc95/.

$$K = \sum_{t=0}^T e_t \cdot (1+i)^{-t} \quad (6-6)$$

wobei T der Nutzungsdauer und i dem Zinsfuß entspricht. Hierbei können analog zu den statischen Verfahren für die Einzahlungen die Auszahlungsersparnisse eingesetzt werden.

Erzielt der Investor am Ende der Nutzungsdauer T durch den Verkauf des Investitionsobjektes einen Liquiditätserlös L , so muss sein Barwertbetrag $L \cdot (1+i)^{-T}$ dem Kapitalwert K hinzuaddiert werden.

Das Entscheidungskriterium für eine projektindividuelle Vorteilhaftigkeit ist bei der Kapitalwertmethode erfüllt, wenn der Kapitalwert größer Null ist. Bei der Wahlentscheidung zwischen mehreren Alternativen ist die mit dem maximalen Kapitalwert den anderen Investitionen vorzuziehen. Dabei ist für die Kapitalwertmethode aufgrund der Abzinsung irrelevant, ob sich die Nutzungsdauer der einzelnen Investitionen unterscheidet.

Wenn anzunehmen ist, dass sich ausgenommen von der Anfangszahlung e_0 die zukünftigen Zahlungsüberschüsse nur geringfügig voneinander unterscheiden, kann eine Vereinfachung der Gleichung (2-6) in der Weise vorgenommen werden, dass folglich bei $e_1=e_2=\dots=e_T=e$ die geometrische Reihe der Abzinsungsfaktoren durch die Summenformel ersetzt wird. Die Summenformel, auch Rentenbarwertfaktor $RBF(T;i)$ genannt, lautet

$$RBF(T;i) = \sum_{t=0}^T (1+i)^{-t} = \frac{1 - (1+i)^{-T}}{i} \quad (6-7)$$

Die Gleichung (6-6) kann dann vereinfacht dargestellt werden:

$$K = e_0 + e \cdot RBF(T;i) \quad (6-8)$$

Hinsichtlich der Anwendung dieses Verfahrens für die wirtschaftliche Betrachtung eines durchgehend computergestützten Entwicklungsverfahrens ist zu beachten, dass die zeitliche Zahlungsstruktur ermittelbar sein muss.

Annuitätenmethode

Die Annuitätenmethode ist ein Spezialfall der Entnahmemaximierungsmodelle. Als Annuität e^* einer Zahlungsreihe e_0, e_1, \dots, e_T wird der Betrag von T gleichbleibenden Zahlungen in den Zeitpunkten $t = 1, 2, \dots, T$ bezeichnet, deren Kapitalwert gleich dem der ursprünglichen Zahlungsreihe ist. Folglich kennzeichnet die Annuität einer Investitionsalternative mit positivem Kapitalwert den konstanten Betrag, um den die Einzahlungsüberschüsse e_1, e_2, \dots, e_T maximal gesenkt werden könnten, bzw. den Betrag, der jede Periode maximal entnommen werden könnte, ohne dass der Kapitalwert negativ wird.

Somit besteht folgender funktionaler Zusammenhang zwischen Annuität und Kapitalwert²⁰:

$$e_0 + \sum_{t=1}^T (e_t - e^*) \cdot (1+i)^{-t} = 0 \quad (6-9)$$

Nach einigen Umformungen ergibt sich dann die Bestimmungsgleichung der Annuität:

$$e^* = \frac{\sum_{t=0}^T e_t \cdot (1+i)^{-t}}{\sum_{t=1}^T (1+i)^{-t}} = \frac{\sum_{t=0}^T e_t \cdot (1+i)^{-t}}{RBF(T; i)} = \left[\sum_{t=0}^T e_t \cdot (1+i)^{-t} \right] \cdot ANF(T; i) \quad (6-10)$$

²⁰ Vgl. Däumler, K.-D. (1989), S. 62-98 /Däu89/.

Aus der Gleichung (6-10) ist zu entnehmen, dass sich die Annuität aus dem Kapitalwert einer Investition multipliziert mit dem Kehrwert des $RBF(T;i)$, auch $ANF(T;i)$ genannt, errechnen lässt.

Bei gleichen Zahlungsüberschüssen $e_1=e_2=\dots=e_T=e$ kann folgende Vereinfachung der Gleichung (2-10) vorgenommen werden:

$$e^* = e + e_0 \cdot ANF(T;i). \quad (6-11)$$

Als Entscheidungskriterium für projektindividuelle Vorteilhaftigkeitsentscheidungen ist die Bedingung $e^* > 0$ anzuwenden. Demnach ist eine Investition vorteilhaft, wenn ihre Annuität positiv ist. Bei Auswahlentscheidungen zwischen mehreren Alternativen, ist die Investition den anderen vorzuziehen, welche die höchste Annuität aufweist. Die Auswahl nach der Annuitätenmethode führt zu identischen Ergebnissen wie die nach der Kapitalwertmethode.

Interner Zinsfuß

Als interner Zinsfuß i^* einer Investition wird der kritische Wert des Kalkulationszinsfußes bezeichnet, auf dessen Basis sich für den Kapitalwert als Funktion des Kalkulationszinsfußes gerade der Wert Null ergibt. Der formale Zusammenhang zwischen Kapitalwert und internem Zinsfuß kann mit folgender Gleichung ausgedrückt werden²¹:

$$\sum_{t=0}^T e_t \cdot (1 + i^*)^{-t} = 0. \quad (6-12)$$

Eine explizite Auflösung der Gleichung (6-12) nach dem internen Zinsfuß kann nicht durchgeführt werden. Die Berechnung des internen Zinsfußes erfolgt iterativ. Jedoch können Bestimmungsprobleme aufgrund der Struktur der

²¹ Vgl. Däumler, K.-D. (1989), S. 103-126 /Däu89/.

Zahlungsreihe auftreten. Diese Probleme beruhen auf der Existenz keines oder mehrerer interner Zinsfüße, so dass eine ökonomische Entscheidung auf Basis dieses Verfahrens nicht oder nur unter Einschränkungen erfolgen kann.

Ökonomisch vertretbare Entscheidungen können nur bei Normalinvestitionen getroffen werden, d. h. bei Investitionen, die mit einem Auszahlungsüberschuss beginnen und daraufhin nur Einzahlungsüberschüsse aufweisen. In diesem Fall kann der interne Zinsfuß als die Verzinsung des durchschnittlich gebundenen Kapitals bzw. als Rendite der Investition interpretiert werden.²²

Eine projektindividuelle Vorteilhaftigkeit ist in dem Falle gegeben, wenn der interne Zinsfuß den Kalkulationszins übersteigt. Eine Auswahlentscheidung auf der Basis von internen Zinsfüßen zur Bestimmung eines optimalen Investitionsprojektes kann nicht getroffen werden. Mit diesem Verfahren wird kein Projekt mit dem maximalen Endvermögen, sondern eine Alternative mit der höchsten Belastbarkeit des Kalkulationszinsfußes ausgewählt. Dabei erfährt der interne Zinsfuß eine Verzerrung zu Ungunsten von Alternativen mit hohem Kapitaleinsatz, langer Anlaufphase und dementsprechend spätem Mittelrückfluss. Dahingegen tritt eine Verzerrung zugunsten von Alternativen mit geringem Kapitaleinsatz und schnellem Mittelrückfluss auf.

Amortisationsdauer

Das dynamische Investitionsverfahren der Amortisationsdauer ermittelt den Zeitpunkt, zu dem der Barwert aller bis dahin angefallenen Auszahlungen von dem Barwert bis dahin angefallener Einzahlungen erstmalig übertroffen wird. Für dieses Verfahren ist folglich die Gleichung (6-13):

$$\sum_{t=0}^{i^*-1} e_t \cdot (1-i)^{-t} \leq 0 < \sum_{t=0}^{i^*} e_t \cdot (1+i)^{-t} \quad (6-13)$$

iterativ zu lösen²³.

²² Vgl. Adam, D. (2000), S. 151-158 /Ada00/.

²³ Vgl. Süchting, J. (1995), S. 322-324 /Süc95/.

Bei einer Normalinvestition ist die Amortisationsdauer der Mindestzeitraum, der für eine vorteilhafte Durchführung einer Alternative erforderlich ist.

Bei einer projektindividuellen Entscheidung muss der Zeitpunkt der Amortisation innerhalb der Investitionslaufzeit liegen, da dort der Kapitalwert positiv ist. Dahingegen kann die Amortisationsdauer nicht für Auswahlentscheidungen herangezogen werden. Mit diesem Verfahren können zwar die Laufzeiten ermittelt werden, aber es können keine Aussagen über die Höhe des maximalen Endvermögens gegeben werden. Dabei werden Alternativen mit höheren Anfangszahlen und längerer Anlaufphase systematisch schlechter beurteilt als Alternativen mit kleinerem Einsatz und relativ schnellerem Mittelrückfluss.

6.2. Kostenvergleichsrechnung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Wirtschaftlichkeitsrechnung auf Basis der Kostenvergleichsrechnung durchgeführt. Die dynamischen Verfahren (s. Kap. 6.1.2, S. 174ff) konnten nicht verwendet werden, da hierfür die genauen Zahlungsströme bzw. sogar deren zeitliche Struktur bekannt sein müssen. Daher sind nur die statischen Verfahren (s. Kap 6.1.1, S. 169 ff.) geeignet, da diese Verfahren nur mit periodisierten Größen rechnen. Von den vier statischen Verfahren ist die Gewinnvergleichsrechnung ungeeignet, da dieses Verfahren die periodisierten Gewinne einer Entscheidung der anderen Alternative gegenüberstellt. Hierfür wird aber vorausgesetzt, dass die Kosten in den Perioden gleich sind. Zudem müssen die periodisierten Gewinne bekannt sein. Dies ist hier nicht der Fall. Auch für die Rentabilitätsrechnung wird vorausgesetzt, dass die Gewinne bekannt sind. Die Amortisationsvergleichsrechnung kann nicht eingesetzt werden, da dieses Verfahren nicht als Entscheidungskriterium zur Auswahl von zwei Alternativen herangezogen werden kann und wie bei den beiden vorgenannten Verfahren die Gewinne bekannt sein müssen. Folglich ist in diesem Fall nur die Kostenvergleichsrechnung geeignet.

6.2.1. Herleitung der Kosten / Ermittlung anzusetzender Stundensätze

Um die Kosten für eine manuelle (Verfahren „Traditionell“) und im Gegensatz dazu eine durchgehend computergestützte Entwicklung (Verfahren „Computergestützt“) von Verpackungspolstern ermitteln zu können, müssen zunächst die relevanten Kostenarten ermittelt werden. Aus diesen Kostenarten werden anzusetzende Stundensätze ermittelt, die zusammen mit kalkulierten Stunden die Gesamtkosten für die entsprechende Vorgehensweise bei der Entwicklung bestimmen. Die Aufteilung der Stundensätze erfolgt zunächst in Mitarbeiter und Maschinen; Gemeinkosten werden in der Regel getrennt davon als Zuschlag berücksichtigt. Da in diesem Fall alternative Verfahren betrachtet werden, wird hier davon ausgegangen, dass die Gemeinkosten für beide Verfahren identisch sind. Demzufolge werden Gemeinkosten – hierzu werden auch die entsprechenden Materialkosten gezählt – im weiteren nicht betrachtet werden.

Für die Ermittlung der Maschinenstundensätze werden die tatsächlich entstehenden Kosten auf die Produktionsstunden umgelegt. Während die fixen Kosten (z. B. Anschaffungskosten, Zinsen, Raummiete) leicht zu beziffern sind, ist die Berechnung variabler Kosten (z. B. Stromkosten, Arbeitsmaterialien wie Schmiermittel etc., Verschleiss) von einer realistischen Einschätzung der Maschinenlaufzeiten abhängig.

Zur Ermittlung des Maschinenstundensatzes werden im wesentlichen folgende Daten benötigt:

- Anschaffungswert [DM]
Hierbei ist zu beachten, dass der Anschaffungswert der Maschine sämtliche Anschaffungs- und Anschaffungsnebenkosten, wie Transport, Kran, Fundament, Spannmittel und Werkzeugergestaltung beinhaltet.
- Restwert [DM]
- Nutzungsdauer [Jahre]
- Sollstundenzahl (Produktionsstunden)
- Instandhaltungs- und Wartungskosten [DM]
- Raumkosten [DM], die sich im wesentlichen aus einem Raumbedarf [qm] und entsprechenden Raumkosten [DM/qm] ergeben.

- Energiekosten [DM], die sich im wesentlichen aus einer durchschnittlichen Leistung [kWh] und entsprechenden Energiekosten [DM/kWh] zusammensetzen.
- Versicherung/Sonstiges [DM]
- Zinssatz [%]

In die Ermittlung des Mitarbeiterstundensatzes fließen alle Lohn- und Lohnnebenkosten mit ein. Bei den beiden hier betrachteten Verfahren zur Entwicklung von Verpackungsformteilen ist zu beachten, dass unter realistischen Bedingungen die Qualifizierung der Mitarbeiter unterschiedlich ist. Betrachtet man das traditionelle Verfahren, so kann davon ausgegangen werden, dass hier ein Facharbeiter als Lohnempfänger anzusetzen ist. Bei Betrachtung der computer-gestützten Vorgehensweise ist ein entsprechend höher qualifizierter Mitarbeiter als Gehaltsempfänger anzusetzen. Dem entsprechend wird es unterschiedliche anzusetzende Stundensätze für beide Mitarbeiter geben. Identisch für beide bleibt jedoch die Berechnung der anzusetzenden Arbeitsstunden pro Jahr. Tab. 12 zeigt deren Berechnung.

Tab. 12: Berechnung der anzusetzenden Arbeitsstunden pro Jahr pro Mitarbeiter /Zwi02/

| Posten | Berechnungsgrundlage | Summe |
|------------------------------|----------------------|----------------------|
| Arbeitszeit [Stunden/Tag] | 7,8 Stunden | |
| Arbeitstage [Tage/Jahr] | 261 Tage | |
| Summe [Arbeitsstunden/Jahr]: | | 2.036 Stunden |
| ./. Feiertage | 11 Tage | 86 Stunden |
| ./. Urlaubstage | 30 Tage | 234 Stunden |
| ./. Krankheitstage | 10 Tage | 78 Stunden |
| Summe: | | 1.638 Stunden |
| ./. unproduktive Zeit | 15 % | 246 Stunden |
| Summe verrechenbarer Stunden | | 1.392 Stunden |

6.2.1.1. Verfahren „Traditionell“

Bei der traditionellen Vorgehensweise kann davon ausgegangen werden, dass ein gelernter Modellbauer auf manuellem Wege Handmuster für Verpackungsteile aus dem vollen Styroporblock herausmodelliert. Die Werkzeuge, die in einer traditionellen Mustermacherei zur Verfügung stehen, beschränken sich auf wenige Handwerkzeuge (Messer etc.), deren Anschaffungskosten hier nicht weiter berücksichtigt werden, da sie im Vergleich zu vernachlässigen sind. Des weiteren verfügt zudem nahezu jede Mustermacherei über eine nicht-computer-gesteuerte Frässtation (s. Abb. 82). Diese Frässtation besteht in der Regel lediglich aus einem Hauptspindeltrieb, in den diverse Fräsköpfe eingespannt werden können und einen großflächigen Auflagetisch, auf dem der Styroporblock von Hand frei bewegt werden kann. Entweder ist der Tisch oder die Hauptspindel in der Höhe verstellbar, so dass alle drei Bewegungs-Freiheitsgrade zur Bearbeitung eines Styroporblocks auf manuellem Wege vorhanden sind.

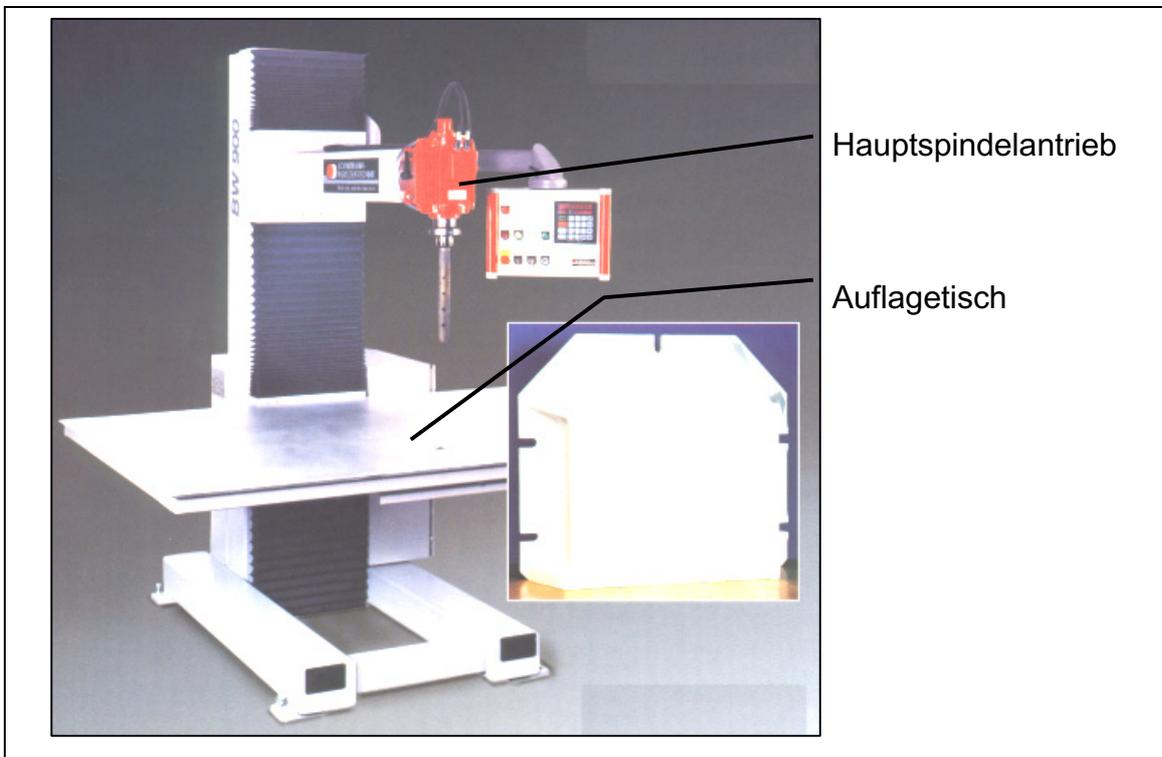


Abb. 82: Nicht-computergesteuerte Frässtation /Bor01/

Zur Berechnung der Stundensätze werden zunächst die Stundensätze für einen Mitarbeiter ermittelt (s. Tab. 13). Die Berechnung beruht im wesentlichen auf Angaben aus /Zwi02/.

Tab. 13: Berechnung des Mitarbeiterstundensatzes (Verfahren „Traditionell“) /Zwi02/

| 1. Direkte Lohnkosten | Berechnungsgrundlage | Summe |
|------------------------------------|-----------------------------|--------------|
| Stundenlohn [DM/Stunde] | 25,17 | |
| Jahresstunden [Stunden/Jahr] | 2.036 | 51.247,00 |
| + VWL [DM] | 52,00 DM/Mon. * 12 Mon. | 624,00 |
| + Urlaubsgeld [DM] | ½ Monatslohn | 2.136,00 |
| + Weihnachtsgeld [DM] | ½ Monatslohn | 2.136,00 |
| Bruttolohn [DM/Jahr] | | 56.143,00 |
| 2. Lohnabhängige Kosten | | |
| + Arbeitgeberanteil [DM] | 20 % Jahresbrutto | 11.229,00 |
| + Berufsgenossenschaft [DM] | 4 % Jahresbrutto | 2.246,00 |
| + Lohnfortzahlungsumlage [DM] | 3 % Jahresbrutto | 1.685,00 |
| ./ Erstattung Lohnfortzahlung [DM] | 70 % Lohnfortzahlungsumlage | - 1.180,00 |
| Summe [DM] | | 13.980,00 |
| Gesamtkosten [DM] | | 70.123,00 |
| Stundensatz [DM/Stunde] | 1.392 Stunden / Jahr | 50,38 |

Maschinenstundensätze sind beim traditionellen Verfahren lediglich für eine Frässtation wie zuvor beschrieben zu ermitteln. Die Berechnung kann Tab. 14 entnommen werden.

Die Anschaffungskosten ergeben sich aus einem Angebot eines führenden Herstellers für Frässtationen zur Bearbeitung von Schaumstoffen /Bor01/ und enthalten zudem einen Kostenanteil zur Anschaffung einer Werkzeuggrundausstattung.

Tab. 14: Berechnung des Maschinenstundensatzes für eine Frässtation
(Verfahren „Traditionell“)

| Frässtation (Verfahren „Traditionell“) | |
|--|------------------|
| Kostenart | Summe |
| Anschaffungskosten [DM] | 42.700,00 |
| Restverkaufserlös [DM] | 7.000,00 |
| Nutzungsdauer [Jahre] | 7 |
| Zinssatz [%] | 7 |
| Abschreibung [DM/Jahr] | 5.100,00 |
| Kalkulatorische Zinsen [DM/Jahr] | 1.740,00 |
| Instandhaltung/Wartung [DM/Jahr] | 2.000,00 |
| Raumkosten [DM/Jahr] | 1.920,00 |
| Energiekosten [DM/Jahr] | 1.188,00 |
| Versicherung/Sonstige [DM/Jahr] | 500,00 |
| Werkzeugkosten [DM/Jahr] | 1.000,00 |
| Gesamtkosten [DM/Jahr] | 13.448,00 |
| Planstunden [Stunden/Jahr] | 1.000 |
| Stundensatz [DM/Stunde] | 13,45 |

Der Restverkaufserlös kann aus einer Marktübersicht über Gebrauchtmaschinen dieser Art entnommen werden. Die Instandhaltungs- und Wartungskosten setzen sich im wesentlichen aus Wartungskosten für die Hauptspindel zusammen. In regelmäßigen Abständen müssen hier die Spindellagerungen wegen Verschleiß ausgetauscht werden. Die angesetzten Kosten ergeben sich aus Kostenvoranschlägen für eine Reparatur zzgl. einem Kostenanteil für einen möglichen Nutzungsausfall. Die Raumkosten ergeben sich aus einem angenommenen Raumbedarf von 16 qm bei einem Mietpreis von 10,00 DM/m²/Monat. Hier wurde die untere Grenze marktüblicher Mietkosten pro Quadratmeter zwischen 10 DM/m² und 15 DM/m² /Haa02/ angesetzt. Die Energiekosten können auf Basis einer durchschnittlichen Leistung von 4,4 kW bei einer Laufleistung von 1.000 Stunden pro Jahr abgeschätzt werden. Werden vorwiegend konventionelle Fräswerkzeuge auch zur Schaumbearbeitung

eingesetzt, so ist der Verschleiß verhältnismäßig gering. Die angesetzten Kosten ergeben sich aus den Preisen für einige wenige Fräser pro Jahr. Die angesetzten Planstunden pro Jahr beruhen im wesentlichen auf der Annahme, dass die Maschine von einem Mitarbeiter bedient werden muss, für den gemäß Tab. 12 eine Jahresstundenzahl von 1.392 Stunden abgeschätzt wurde. Berücksichtigt man, dass ein Teil der Modellbauertätigkeit mit einfachen Handwerkzeugen und handwerklicher Tätigkeit durchgeführt wird, so ist eine Planstundenzahl von 1.000 Stunden pro Jahr für eine Frässtation realistisch angenommen.

Gemäß den ermittelten Stundensätzen können nunmehr zwei wesentliche Arbeitsgänge beim traditionellen Verfahren unterschieden werden. Zum einen die rein manuelle Tätigkeit, für die ein Stundensatz von 50,38 DM/Stunde ermittelt wurde, und die Tätigkeit an einer Frässtation, für die ein Stundensatz von 13,45 DM/Stunde für die Maschine zuzüglich 50,38 DM/Stunde für das Bedienpersonal angenommen werden muss.

Tab. 15: Arbeitsgänge und Stundensätze für das traditionelle Verfahren

| Arbeitsgang | Berechnungsgrundlage | Stundensatz [DM/Stunde] |
|--------------------|--|----------------------------|
| Manuelle Tätigkeit | Mitarbeiterstundensatz (50,38) | 50,38 |
| Maschinenfräsen | Mitarbeiterstundensatz (50,38) + Stundensatz Maschine (13,45) | 63,83 |

6.2.1.2. Verfahren „Computergestützt“

Bei der computergestützten Vorgehensweise muss davon ausgegangen werden, dass ein entsprechend höher qualifizierter Mitarbeiter im wesentlichen konstruktiv unter Zuhilfenahme diverser Softwaresysteme am Computer tätig ist und die Bemusterung von einer CNC-gesteuerten Fräsmaschine vollautomatisch durchgeführt wird. Demzufolge sind zum Aufbau einer computergestützten Kette eine Reihe von Hard- und Softwarekomponenten erforderlich. Zu den

Hardwarekomponenten zählen zum einen eine CNC-Fräsmaschine, die für die Bearbeitung von Schaumstoffen ausgelegt ist, ein 3D-Sensorsystem, um reale Gegenstände wieder in eine digitale Darstellungsform überführen zu können sowie eine leistungsfähige Workstation auf PC-Basis, auf der die digitalen Bearbeitungsschritte durchgeführt werden. Zu den Softwarekomponenten zählen 3D-CAD-Systeme (Flächen- und Volumenmodellierer), Reverse-Engineering-Systeme, um die digitalisierten Daten aus dem 3D-Sensorsystem bearbeiten zu können und ein CAM-System, um aus 3D-CAD-Daten automatisch Fräsbefehle (NC-Daten) generieren zu können, die die CNC-Fräsmaschine steuern.

Tab. 16: Berechnung des Mitarbeiterstundensatzes (Verfahren „Computergestützt“) (nach /Zwi02/)

| 1. Direkte Lohnkosten | Berechnungsgrundlage | Summe |
|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| Stundenlohn [DM/Stunde] | | |
| Jahresstunden [Stunden/Jahr] | | |
| + VWL [DM] | 52,00 DM/Mon. * 12 Mon. | 624,00 |
| + Urlaubsgeld [DM] | | |
| + Weihnachtsgeld [DM] | | |
| Bruttolohn [DM/Jahr] | | 80.624,00 |
| 2. Lohnabhängige Kosten | | |
| + Arbeitgeberanteil [DM] | 20 % Jahresbrutto | 16.125,00 |
| + Berufsgenossenschaft [DM] | 4 % Jahresbrutto | 3.225,00 |
| + Lohnfortzahlungsumlage [DM] | 3 % Jahresbrutto | 2.419,00 |
| ./. Erstattung Lohnfortzahlung [DM] | 70 % Lohnfortzahlungsumlage | - 1.694,00 |
| Summe [DM] | | 20.075,00 |
| Gesamtkosten [DM] | | 100.699,00 |
| Stundensatz [DM/Stunde] | 1.392 Stunden / Jahr | 72,35 |

Zur Berechnung der Stundensätze werden zunächst die Stundensätze für einen Mitarbeiter ermittelt (s. Tab. 16). Es wird bei der Berechnung davon ausgegan-

gen, dass es sich bei dem Mitarbeiter, der in der Lage ist, die hier vorgestellte computergestützte Kette zu beherrschen, um eine höher qualifizierte Person handelt, die als Gehaltsempfänger einzustufen ist. Demnach wird statt eines Stundenlohnes ein festes Jahresgehalt angenommen, mit dem Sonderleistungen wie Urlaubs- oder Weihnachtsgeld bereits abgegolten sind. Vermögenswirksame Leistungen werden jedoch in der Regel zusätzlich gewährt. Die Höhe des angesetzten Jahresgehaltes ist mit den im Rahmen dieser Arbeit eingebundenen Industrieunternehmen abgestimmt.

In den Tabellen Tab. 17 und Tab. 18 werden die Stundensätze für die zuvor erwähnten Hard- und Softwarekomponenten berechnet.

Tab. 17: Berechnung der Stundensätze für die benötigten Hardwarekomponenten (Verfahren „Computergestützt“)

| Kostenart | CNC-Fräse | 3D-Sensor-system | Workstation |
|----------------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| Anschaffungskosten [DM] | 100.000,00 | 150.000,00 | 15.000,00 |
| Restverkaufserlös [DM] | 15.000,00 | 20.000,00 | 2.000,00 |
| Nutzungsdauer [Jahre] | 7 | 7 | 3 |
| Zinssatz [%] | 7 | 7 | 7 |
| Abschreibung [DM/Jahr] | 12.143,00 | 18.572,00 | 4.334,00 |
| Kalkulatorische Zinsen [DM/Jahr] | 4.025,00 | 5.950,00 | 595,00 |
| Instandhaltung/Wartung [DM/Jahr] | 3.500,00 | 5.000,00 | 500,00 |
| Raumkosten [DM/Jahr] | 1.920,00 | 1.920,00 | --- |
| Energiekosten [DM/Jahr] | 1.544,00 | 300,00 | 300,00 |
| Versicherung/Sonstige [DM/Jahr] | 500,00 | 750,00 | 100,00 |
| Werkzeugkosten [DM/Jahr] | 1.000,00 | --- | --- |
| Gesamtkosten [DM/Jahr] | 24.633,00 | 32.492,00 | 5.829,00 |
| Planstunden [Stunden/Jahr] | 1.300 | 185 | 1.115 |
| Stundensatz [DM/Stunde] | 18,95 | 175,64 | 5,23 |

Die Anschaffungskosten der Hardwarekomponenten ergeben sich aus Angeboten von Herstellern der jeweiligen Hardwarekomponente bzw. aus den beim

industriellen Kooperationspartner SiBO-Verpackungen, Olpe, angefallenen Anschaffungskosten. Der Restverkaufserlös kann bei einer angenommenen Nutzungsdauer von 7 Jahren aufgrund des mechanischen Verschleißes (CNC-Fräse) bzw. der technischen Veralterung (3D-Sensorsystem) höchstens mit 10% bis 15 % des Anschaffungspreises angenommen werden. Da es sich insbesondere jeweils um Spezialmaschinen handelt, für die es auf dem Markt nur ein sehr begrenztes Interesse gibt, kann der Restverkaufserlös nicht höher angesetzt werden. Bei der Workstation wurde eine Nutzungsdauer von lediglich drei Jahren angesetzt. Dieses entspricht dem üblichen vom Finanzamt akzeptierten Abschreibungszeitraum und berücksichtigt die rapide technische Veralterung gerade von PC-Systemen. Dementsprechend musste auch hier ein geringer Restverkaufserlös angesetzt werden.

Die Instandhaltungs- und Wartungskosten für die Fräsmaschine setzen sich im wesentlichen aus Wartungskosten für die Hauptspindel zusammen. In regelmäßigen Abständen müssen hier die Spindellagerungen wegen Verschleiß ausgetauscht werden. Zudem müssen die automatisch angetriebenen Verfahrachsen der Maschine gewartet und repariert werden. Die angesetzten Kosten ergeben sich aus Kostenvoranschlägen für eine Reparatur zzgl. einem Kostenanteil für einen möglichen Nutzungsausfall. Die Kosten fallen hier aufgrund der zusätzlichen angetriebenen Verfahrachsen höher aus, als bei der manuellen Frässtation (s. Tab. 14). Die Wartungskosten für das Sensorsystem ergeben sich aus konkreten Angeboten für einen Jahreswartungsvertrag und beinhalten im wesentlichen den Update von Softwarekomponenten. Die Raumkosten ergeben sich wie bei der manuellen Frässtation für die CNC-Fräse und das 3D-Sensorsystem aus einem angenommenen Raumbedarf von 16 qm bei einem Mietpreis von 10,00 DM/qm/Monat. Die Energiekosten können auf Basis einer durchschnittlichen Leistung von 4,4 kW bei einer Laufleistung von 1.300 Stunden pro Jahr abgeschätzt werden. Bei dem 3D-Sensorsystem und der Workstation fallen lediglich geringe Energiekosten an. Es werden für die CNC-Fräse dieselben Werkzeugkosten angenommen, wie für die manuelle Frässtation.

Tab. 18: Berechnung der Stundensätze für die benötigten Softwarekomponenten (Verfahren „Computergestützt“)

| Kostenart | 3D-CAD-Systeme | RE-System | CAM-System |
|---|-----------------|------------------|-----------------|
| Anschaffungskosten [DM] | 25.000,00 | 45.000,00 | 20.000,00 |
| Restverkaufserlös [DM] | 16.600,00 | 30.000,00 | 13.300,00 |
| Nutzungsdauer [Jahre] | 7 | 7 | 7 |
| Zinssatz [%] | 7 | 7 | 7 |
| Abschreibung [DM/Jahr] | 1.200,00 | 2.143,00 | 958,00 |
| Kalkulatorische Zinsen [DM/Jahr] | 1.456,00 | 2.625,00 | 1.166,00 |
| Instandhaltung/Wartung [DM/Jahr] | 4.375,00 | 7.000,00 | 3.500,00 |
| Raumkosten [DM/Jahr] | --- | --- | --- |
| Energiekosten [DM/Jahr] | --- | --- | --- |
| Versicherung/Sonstige [DM/Jahr] | --- | --- | --- |
| Werkzeugkosten [DM/Jahr] | --- | --- | --- |
| Gesamtkosten [DM/Jahr] | 7.031,00 | 11.768,00 | 5.624,00 |
| Planstunden [Stunden/Jahr] | 495 | 495 | 125 |
| Stundensatz [DM/Stunde] | 14,21 | 23,78 | 45,00 |

Die Anschaffungskosten der Softwarekomponenten ergeben sich aus Angeboten von Herstellern der jeweiligen Hardwarekomponente bzw. aus den beim industriellen Kooperationspartner SiBO-Verpackungen, Olpe, angefallenen Anschaffungskosten. Der Restverkaufserlös kann abweichend zu den Hardwarekomponenten auch nach 7 Jahren Nutzungsdauer noch relativ hoch angesetzt werden, da durch die angesetzten Instandhaltungs- und Wartungskosten – hierunter fallen Jahreswartungsverträge – stets die neueste Version der Software upgedatet wird. Die Kosten für Jahreswartungsverträge können auf Basis konkreter Angebote von Seiten der Softwarehersteller angesetzt werden.

Die angesetzten Planstunden pro Jahr ergeben sich wie folgt: Zunächst wird angenommen, dass die CNC-Fräsmaschine – nachdem sie kurzzeitig gerüstet

werden muss – die meiste Zeit vollkommen selbständig, d. h. ohne Anwesenheit eines Bedieners, arbeiten kann. Aus diesem Grund können hier dieselben Planstunden kalkuliert werden, die auch ein Mitarbeiter bei Einschichtbetrieb erreicht (= 1.392 Stunden, s. Tab. 12), abzüglich einem geringen Zeitanteil für Rüstarbeiten. Zur Bedienung aller anderen Hard- und Softwarekomponenten ist die ständige Anwesenheit eines Mitarbeiters erforderlich, so dass hier die Summe der Planstunden pro Jahr ebenfalls mit 1.392 Stunden abzüglich einem Zeitanteil für handwerkliche Tätigkeiten ohne Nutzung einer der Komponenten angesetzt werden kann (= 1.300 Stunden).

Die Summe von 1.300 Planstunden verteilt sich alternativ auf die Bedienung des 3D-Sensorsystems oder die der Workstation. Auf Basis von Aussagen des industriellen Kooperationspartners SiBO-Verpackungen, Olpe, kann hier eine durchschnittliche zeitliche Verteilung von etwa 1:6 angenommen werden. Die resultierenden Planstunden pro Jahr für die Nutzung der Workstation verteilen sich wiederum zu etwa 90 % Zeitanteil gleichermaßen auf die Nutzung der 3D-CAD-Systeme und des Reverse-Engineering-Systems und mit ca. 10 % Zeitanteil auf die des CAM-Systems. Unter 3D-CAD-Systemen wird sowohl ein 3D-Volumenmodellierer als auch ein 3D-Flächenmodellierer zusammengefasst. Von einer getrennten Betrachtung wird hier abgesehen. Die angesetzten zeitlichen Verteilungen spiegeln durchschnittliche Werte wider und sind aus der Praxis heraus abgeschätzt.

Aus den Stundensätzen lassen sich die in Tab. 19 dargestellten Stundensätze für entsprechende Arbeitsgänge ermitteln.

Tab. 19: Arbeitsgänge und Stundensätze für das computergestützte Verfahren

| Arbeitsgang | Berechnungsgrundlage | Stundensatz [DM/Stunde] |
|---------------------|--|-------------------------|
| Manuelle Tätigkeit | Mitarbeiterstundensatz (72,35) | 72,35 |
| CNC-Fräsen | Stundensatz Maschine (18,95) | 18,95 |
| 3D-CAD | Mitarbeiterstundensatz (72,35) + Stundensatz Workstation (5,23) + Stundensatz 3D-CAD (14,21) | 91,79 |
| CAM | Mitarbeiterstundensatz (72,35) + Stundensatz Workstation (5,23) + Stundensatz CAM (45,00) | 122,58 |
| 3D-Scannen | Mitarbeiterstundensatz (72,35) + Stundensatz 3D-Sensor (175,64) | 247,99 |
| Reverse-Engineering | Mitarbeiterstundensatz (72,35) + Stundensatz Workstation (5,23) + Stundensatz RE (22,78) | 100,36 |

6.2.2. Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeitsrechnung

Um das „traditionelle“ Verfahren und das „computergestützte“ Verfahren auf Basis einer Kostenvergleichsrechnung miteinander vergleichen zu können, muss zunächst festgestellt werden, dass dieses nicht allein anhand eines typischen Entwicklungsprojektes möglich ist. In der Verpackungsentwicklung sind die zu wählenden Vorgehensweisen zur Entwicklung einer Verpackungslösung nahezu so vielfältig, wie es die Formenvielfalt der zu verpackenden Produkte auch ist (s. Kap. 5.4.4, S. 155 ff. und Kap. 5.6, S. 159 ff.).

Aus diesem Grund wird im folgenden eine Auswahl von Entwicklungsprojekten vorgestellt, die sowohl auf „traditionelle“ wie auch auf „computergestützte“ Art und Weise bearbeitet wurden.

Wenn auch – wie zuvor erwähnt – nicht das typische Entwicklungsprojekt gefunden werden kann, so ist es jedoch möglich, eine Gruppierung von

Entwicklungsprojekten anhand des Schwierigkeitsgrades vorzunehmen. Im Rahmen der durchgeführten Pilotanwendungen konnten in einer groben Unterteilung fünf wesentliche Gruppierungen gefunden werden, die im folgenden als Szenarien bezeichnet werden.

Tab. 20: Gruppierung von Entwicklungsprojekten anhand des Schwierigkeitsgrades (= Szenarien)

| | |
|-------------|---|
| Szenario 1: | Einfache Standardkonstruktionen ohne die Notwendigkeit zum Reverse-Engineering |
| Szenario 2: | Verpackungsentwicklung anhand von 3D-Daten für noch nicht existierende Produkte |
| Szenario 3: | Polster für ein Objekt, das aus Regelgeometrien besteht und in grober Näherung einem Kubus entspricht |
| Szenario 4: | Polster für ein Objekt, das teilweise aus Freiformflächen und aus einfachen Geometrien besteht |
| Szenario 5: | Polster für ein Objekt, welches aus komplizierten Freiformflächen besteht und aufwendig rückgeführt werden muss |

Szenario 2 wird im Rahmen eines Vergleiches nicht berücksichtigt, da dieses durch die „traditionelle“ Vorgehensweise in den meisten Fällen nicht angemessen bearbeitet werden kann und somit die Voraussetzung einer Kostenvergleichsrechnung (identisches Ergebnis beider Alternativen) nicht erfüllt ist.

Zusätzlich zu den aufgestellten Szenarien gibt es eine Reihe von Einflussfaktoren, die weiterhin den Aufwand eines gesamten Entwicklungsprojektes beeinflussen. Den wesentlichsten Einfluss hat die Anzahl der Handmuster, die für eine Verpackungsentwicklung angefertigt werden müssen. Diese Anzahl

richtet sich zunächst nach den Anforderungen des Kunden. Hier sind im wesentlichen die nachstehenden Abfolgen denkbar:

1. Der Kunde gibt eine Verpackungspolsterkonstruktion lediglich anhand einer Zeichnung frei, ohne ein Handmuster zu erhalten. Diese Abfolge ist sehr unwahrscheinlich, da die „traditionelle“ Vorgehensweise zunächst als Ausgangsbasis angesehen werden muss. Hier ist es jedoch so, dass ein Handmuster wesentlich schneller anzufertigen ist, als eine Zeichnung.
2. Es wird ein Handmuster(satz) angefertigt, und der Kunde gibt die Freigabe zur Serienproduktion anhand dieses Musters.
3. Es wird ein Handmuster(satz) angefertigt und dem Kunden vorgestellt. Der Kunde wünscht eine Änderung und erneute Vorstellung eines Musters. Anhand des neuen Musters erfolgt dann jedoch die Freigabe zur Serienproduktion. Hierbei müsste unterschieden werden, ob die Änderung gering ist, so dass das bestehende Muster nur leicht modifiziert werden muss (Änderungskonstruktion), oder ob die Änderungen so vielfältig sind, dass ein komplett neues Muster erstellt werden muss (Neukonstruktion).
4. Es wird ein Handmuster(satz) angefertigt und dem Kunden vorgestellt. Der Kunde wünscht, dass Fallprüfungen mit diesem Mustersatz durchgeführt werden. Es wird angenommen, dass die Falltests positiv verlaufen, so dass keine Änderungen an der Konstruktion vorgenommen werden müssen. Der Handmustersatz ist jedoch aufgrund der Fallprüfungen zerstört, so dass ein neuer Satz hergestellt werden muss, der dem Werkzeugbauer als Vorlage dient.
5. Es wird ein Handmuster(satz) angefertigt und dem Kunden vorgestellt. Der Kunde wünscht, dass Fallprüfungen mit diesem Mustersatz durchgeführt werden. Es wird angenommen, dass die Falltests negativ verlaufen, so dass konstruktive Änderungen vorgenommen werden müssen. Nachdem ein

geänderter Satz Handmuster fertiggestellt ist, werden die Fallprüfungen wiederholt, wobei diesmal angenommen wird, dass das Prüfergebnis positiv ist. Der geänderte Handmustersatz ist jedoch aufgrund der Fallprüfungen auch zerstört, so dass ein neuer Satz hergestellt werden muss, der dem Werkzeugbauer als Vorlage dient.

Bei den zuvor aufgeführten Abfolgen wird davon ausgegangen, dass maximal nur eine konstruktive Änderung vorgenommen werden muss, insbesondere dann, wenn Falltests durchgeführt werden. Diese Einschränkung ist in der Hinsicht realistisch, als dass ein geübter Mustermacher mit entsprechend viel Projekterfahrung in der Regel nur einen Versuch benötigt, ein Verpackungspolster zu dimensionieren, welches den Anforderungen genügt und somit den ersten Falltest besteht. Sollte der erste Falltest nicht zu einem positiven Ergebnis führen, ist es jedoch sehr unwahrscheinlich, dass ein wiederholter Fallversuch (nach erfolgter konstruktiver Änderung) wiederum fehlschlägt.

Auf der anderen Seite ist diese Einschränkung aber auch unrealistisch unter dem Gesichtspunkt, dass häufig von Kundenseite Änderungen initiiert werden, die daher rühren, dass ein zu Beginn des Projektes festgelegtes Pflichtenheft für das zu entwickelnde Verpackungskonzept im Projektverlauf geändert wird. Insbesondere dann, wenn im Rahmen einer computergestützten Kette Änderungen sehr leicht realisiert werden können, wird dieser „Service“ von Kundenseite – insbesondere wenn es sich dabei um große Kunden bzw. Konzerne handelt – gerne in Anspruch genommen. Aus der Praxis heraus kann von einem Projekt berichtet werden, das insgesamt 5 mal zur Änderung vorlag, obwohl bereits beim ersten Handmustersatz sämtliche zuvor aufgestellten Pflichten erfüllt wurden – inklusive Falltests²⁴. Auch wenn dieses eine Ausnahme sein sollte, muss realistisch aber dennoch von ein bis zwei kundenseitig initiierten Änderungen ausgegangen werden.

²⁴ Praxiserfahrungen aus dem Industrieunternehmen SiBO-Verpackungen, Olpe, welches als Pilotunternehmen im Rahmen dieser Arbeit fungierte.

Die Anzahl der benötigten Handmustersätze kann jedoch auch von Seiten des Werkzeugbauers beeinflusst werden. Ist dieser bspw. nur in der Lage, das Serienwerkzeug anhand eines Handmusters herzustellen – was aufgrund der traditionell gewachsenen Strukturen bisher mehrheitlich der Fall ist – so muss bspw. nach einem Falltest, bei dem das Handmuster zerstört wurde, ein neuer Satz Handmuster angefertigt werden. Ist der Werkzeugbauer jedoch in der Lage, anhand von 3D-CAD-Datensätzen ein Serienwerkzeug herzustellen, so kann im Rahmen einer computergestützten Entwicklungskette das Herstellen eines weiteren Mustersatzes durch Überspielen des 3D-CAD-Datensatzes ersetzt werden. Einige Werkzeugbauer im Bereich Schäumwerkzeugherstellung sind dazu bereits in der Lage.

Ein weiterer Einflussparameter ergibt sich durch die geometrische Gestalt des zu verpackenden Produktes. Wird bspw. angenommen, dass es mit zwei Seitenschalen gepolstert sein soll, so muss eine linke und eine unterschiedliche rechte Schale für einen kompletten Satz angefertigt werden. Ist das Produkt jedoch weitestgehend symmetrisch, so dass die linke mit der rechten Schale identisch ist, so muss zumindest für den Werkzeugbauer nur noch 1 Stück statt einem ganzen Satz angefertigt werden.

Neben der Anzahl der anzufertigenden Handmuster ergeben sich weitere zu berücksichtigende Einflussfaktoren auf die Entwicklungszeiten. Bei der computergestützten Entwicklungskette muss bspw. unterschieden werden, ob das zu entwickelnde Verpackungspolster vollkommen neu per 3D-CAD konstruiert werden muss (Neukonstruktion), oder ob eine bereits einmal erzeugte Variante aufgerufen werden kann, die lediglich geändert bzw. angepasst werden muss (vgl. Kap. 4, S. 83 ff.). Nach entsprechend vielen computergestützten Entwicklungen muss davon ausgegangen werden, dass viele bereits einmal erstellte Varianten wiederverwendet werden können und nach geringfügigen Anpassungen an die neue Aufgabenstellung fertiggestellt sind. Derartige Synergieeffekte können im Rahmen der traditionellen Vorgehensweise nicht ausgenutzt werden,

müssen in einer computerunterstützten Kette jedoch als wesentlicher Zeitfaktor bei der Bewertung berücksichtigt werden (vgl. /Hir01/).

Ein weiterer Einflussfaktor wird wiederum durch den Kunden erzeugt. Viele größere Konzerne oder Unternehmen aus dem Umfeld der Automobilindustrie verlangen vom Kunden eine Dokumentation von in Auftrag gegebenen Entwicklungen. Hierunter fallen auch Verpackungsentwicklungen. So muss bspw. beim Kostenvergleich zwischen „traditioneller“ und „computergestützter“ Vorgehensweise berücksichtigt werden, ob der Kunde keinerlei Dokumentation verlangt, eine Zeichnung wünscht oder einen 3D-CAD-Datensatz verlangt.

6.2.3. Pilotprojekte im Kostenvergleich

Im vorhergehenden Kapitel wurden eine Vielzahl von Einflussfaktoren aufgeführt, die im Rahmen einer Kostenvergleichsrechnung berücksichtigt werden müssen. Um nunmehr einen direkten Vergleich zwischen der traditionellen Vorgehensweise und einer durchgehend computergestützten Vorgehensweise im Sinne einer Kostenvergleichsrechnung durchführen zu können, ist es erforderlich, einige repräsentative Pilotanwendungen zu finden. Diese Pilotanwendungen konnten in Form von praxisrelevanten Verpackungsprojekten in Kooperation mit einigen Industrieunternehmen gefunden werden. Im Rahmen dieser mit den Unternehmen SiBO-Verpackungen, Olpe, und Huckschlag Verpackungswerk, Kamen, durchgeführten Pilotanwendungen können die wesentlichen Kombinationen der Szenarien und Einflussfaktoren bei der Kostenbetrachtung berücksichtigt werden. Aufgrund der Vielzahl der Kombinationsmöglichkeiten war es jedoch nicht möglich, immer alle Arbeitsschritte durchzuführen. Hier wurden teilweise Aufwandsabschätzungen auf Basis mehrjähriger Erfahrungen von Fachleuten und Expertenbefragungen vorgenommen, welche jedoch in jedem Fall als objektiv und realistisch anzusehen sind.

Auf Basis der vorgestellten Szenarien (vgl. Tab. 20, S. 192) und zusätzlichen Einflussfaktoren können Abläufe eines Entwicklungsprojektes schematisiert werden. Gemäß Abb. 83 ergeben sich zwei mögliche Projektabläufe.

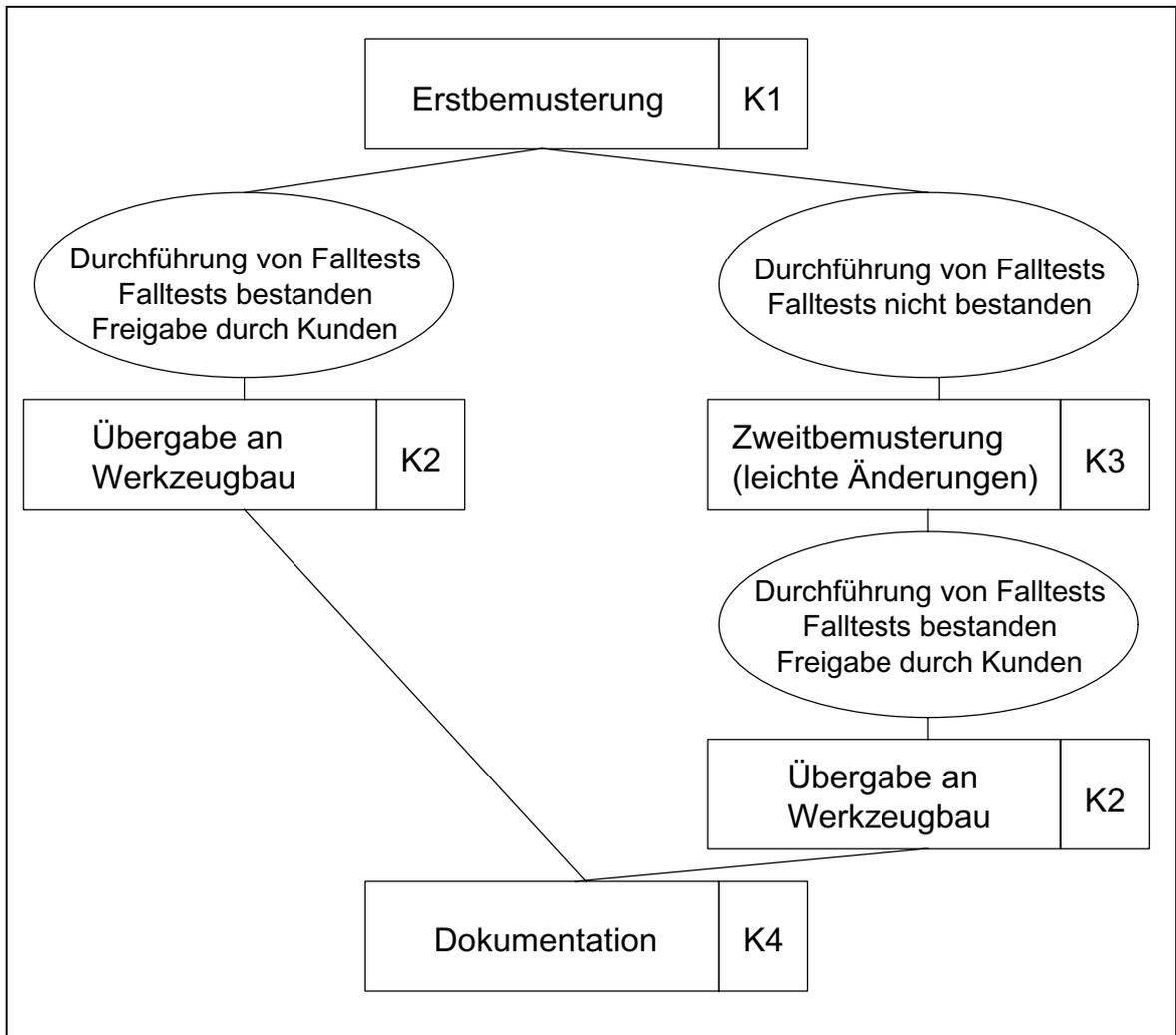


Abb. 83: Mögliche Abläufe eines Entwicklungsprojektes

Im Rahmen dieser Abläufe entstehen einzelne Kostenblöcke K1 bis K4. Die Kosten K_i können unabhängig voneinander ermittelt werden, jeweils getrennt nach „traditioneller“ (Index T) und „computergestützter“ (Index C) Vorgehensweise.

Zu beachten ist jedoch, dass bei der computergestützten Vorgehensweise der Kostenblock $K1_C$ zweimal ermittelt werden kann, je nach dem, ob das zu konstruierende Verpackungspolster von Grund auf neu konstruiert werden

muss ($K1_{C,Neukonstruktion}$), oder ob eine schon einmal erstellte Variante angepasst werden kann ($K1_{C,Anpassungskonstruktion}$). Ebenso muss Kostenblock K2 bei der computergestützten Vorgehensweise ($K2_C$) zweigeteilt betrachtet werden. $K2_C$ ist abhängig davon, ob der Werkzeugbauer ein Handmuster benötigt, um ein Serienwerkzeug herstellen zu können ($K2_{C,Handmuster}$), oder ob er einen 3D-CAD-Datensatz verarbeiten kann ($K2_{C,CAD}$).

Im Rahmen der Projekte wurden die entstehenden Entwicklungskosten anhand der ermittelten Stundensätze für verschiedene Arbeitsgänge (s. Tab. 15, S. 185 und Tab. 19, S. 191) nachgehalten. Nachfolgend werden die durchgeführten Pilotanwendungen mit den zugehörigen Entwicklungskosten vorgestellt, wobei die monetäre Bewertung der „traditionellen“ Vorgehensweise in Kooperation mit der Fa. Huckschlag Verpackungswerk, Kamen, und die monetäre Bewertung der „computergestützten“ Vorgehensweise mit der Fa. SiBO-Verpackungen, Olpe, durchgeführt wurde.

6.2.3.1. Pilotprojekt: Flugzeug-Speiseofen



Abb. 84: Flugzeug-Speiseofen

Vorgehensweise:

Der Ofen entspricht in seiner Formgebung weitestgehend einem Kubus, weshalb auf eine Rückführung des Produktes in ein CAD-System verzichtet wird (Szenario 1, s. Tab. 20, S. 192). Als Polsterung wird eine Polster-Viertelschale projiziert, wobei zur Minimierung der Werkzeugkosten und zur Maximierung möglicher Stückzahlen nur ein einziges Formteil für alle vier relevanten Viertelschalen eingesetzt werden können soll. Hierzu ist es notwendig, eine Lösung für die Überbrückung der Aussparung im Fußbereich des Produktes zu finden (s. Abb. 84, rechts).

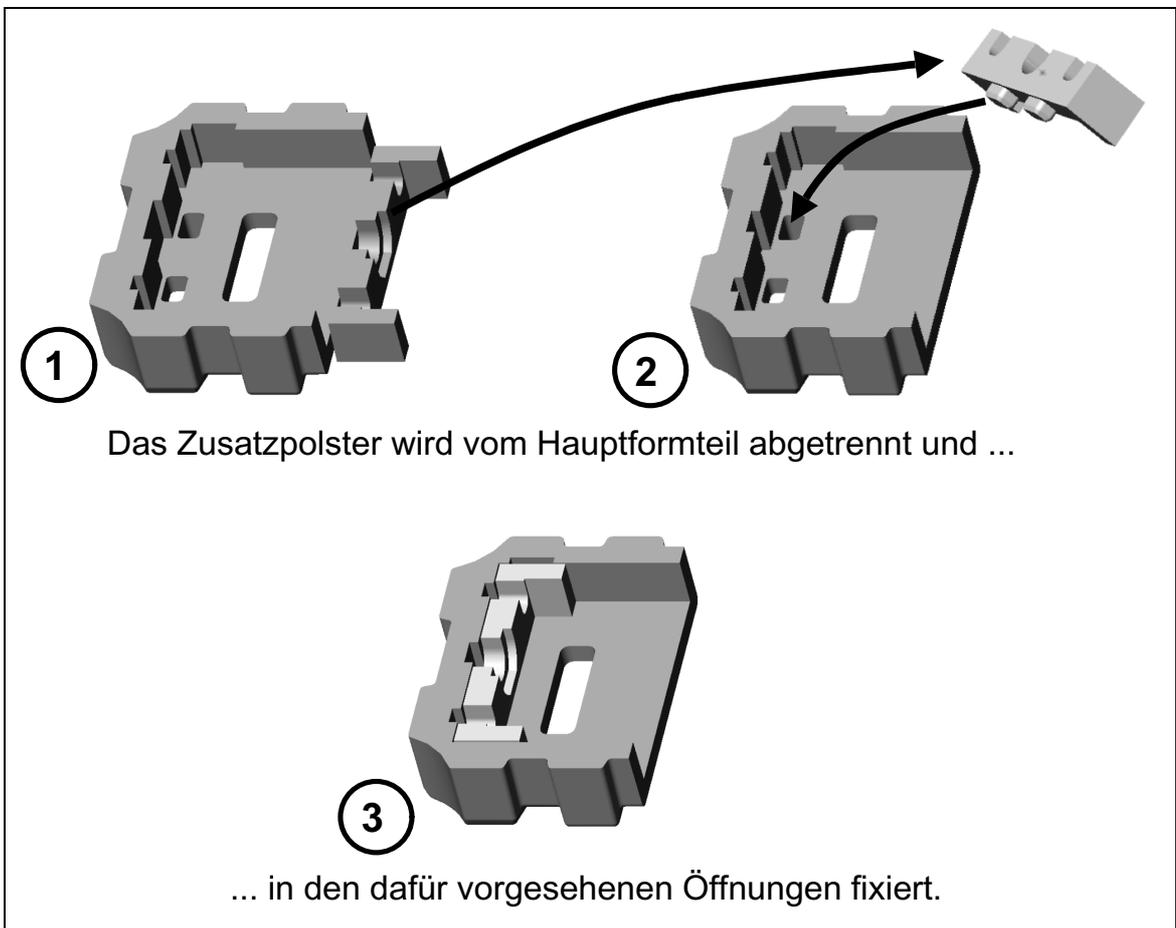


Abb. 85: Darstellung der Nutzung des Distanzformteils

Hierzu wird ein Distanzstück konstruiert, welches in das Hauptformteil integriert wird, so dass die Möglichkeit besteht, dieses hiervon an einer Sollbruchstelle abzurechen und für die eine relevante Viertelschale in den dafür vorgesehenen

en Aussparungen zu fixieren (s. Abb. 85). Das Formnest im Verpackungspolster entspricht einem einfachen Rechteck mit einigen zusätzlichen Aussparungen.

Kostenblock K1:

Tab. 21: K1_T: Erstbemusterung, traditionell

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 15 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|--|-----------------------------|---------------------------|--------------------|
| Blockmaterial zurichten für 1. Muster | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Aufreißen der Innenkontur (1. Muster) | Manuelle Tätigkeit | 1,0 AS a DM 50,38 | DM 50,38 |
| Innenkontur fräsen (1. Muster) | Maschinenfräsen | 3,0 AS a DM 63,83 | DM 191,49 |
| Aufreißen der Außenkontur (1. Muster) | Manuelle Tätigkeit | 1,0 AS a DM 50,38 | DM 50,38 |
| Außenkontur fräsen (1. Muster) | Maschinenfräsen | 3,0 AS a DM 63,83 | DM 191,49 |
| Muster finishen (1. Muster) | Manuelle Tätigkeit | 1,0 AS a DM 50,38 | DM 50,38 |
| Blockmaterial zurichten für Muster 2 bis 4 | Manuelle Tätigkeit | 1,0 AS a DM 50,38 | DM 50,38 |
| Aufreißen der Innenkontur (2. bis 4. Muster) | Manuelle Tätigkeit | 2,5 AS a DM 50,38 | DM 125,95 |
| Innenkontur fräsen (2. bis 4. Muster) | Maschinenfräsen | 7,5 AS a DM 63,83 | DM 478,73 |
| Aufreißen der Außenkontur (2. bis 4. Muster) | Manuelle Tätigkeit | 2,5 AS a DM 50,38 | DM 125,95 |
| Außenkontur fräsen (2. bis 4. Muster) | Maschinenfräsen | 7,5 AS a DM 63,83 | DM 478,73 |
| Muster finishen (2. bis 4. Muster) | Manuelle Tätigkeit | 2,5 AS a DM 50,38 | DM 125,95 |
| Summen: | | 33,0 AS | DM 1.945,00 |

Die Kosten $K1_T$ (vgl. Abb. 83, S. 197) ergeben sich dadurch, dass zunächst ein Handmuster der Viertelschale hergestellt werden muss. Hierbei ist der Rohblock zuzurichten, aus dem die Viertelschale herausgearbeitet werden soll. Anschließend kann damit begonnen werden, die herauszuarbeitende Innenkontur des Formpolsters auf dem Rohblock aufzureißen und auszufräsen. Es wird mit der Innenkontur begonnen, um für das Arbeiten an der Fräse möglichst lange eine handliche rechteckige Außenkontur zu bewahren. Aufgrund des an das Hauptformteil anzufügenden Zusatzpolsters gestaltet sich das Herausarbeiten der Innenkontur verhältnismäßig aufwendig. Dasselbe gilt für die Bearbeitung der Außenkontur des gesamten Formteils. Nach Durchführung dieser Arbeitsschritte ist das Formteil-Muster nahezu fertig. Durch schmirgeln und andere Feinarbeiten erhält das Handmuster zum Schluss eine glatte und staubfreie Oberfläche (finishen).

Da Falltests mit der Verpackung durchgeführt werden sollen, muss jedoch ein vollständiger Satz bestehend aus 4 Viertelschalen von Hand angefertigt werden. Hierzu sind prinzipiell dieselben Arbeitsschritte durchzuführen, wie bei dem ersten Handmuster. Aufgrund von Lern- und Routineeffekten ergibt sich jedoch eine leicht verkürzte Bearbeitungszeit pro Viertelschale. Des Weiteren ist es nicht erforderlich, bei den anderen drei Viertelschalen ebenfalls ein Zusatzpolster mit anzufertigen. Hier wird davon ausgegangen, dass zur Vorstellung des Prinzips beim Kunden ein vollständiges Muster bestehend aus Hauptformteil und Zusatzpolster ausreichend ist.

Tab. 22: $K1_{C,Neukonstruktion}$: *Erstbemusterung, computergestützt, Neukonstruktion*

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|---|-----------------------------|---------------------------|---------------|
| Muster konstruieren | 3D-CAD | 2,5 AS a DM 91,79 | DM 229,48 |
| NC-Programm erzeugen | CAM | 0,5 AS a DM 122,58 | DM 61,29 |
| Maschine einrichten für 1. Block (=2 Viertelschalen) | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| 1. Block fräsen | CNC-Fräsen | 6,0 AS a DM 18,95 | DM 113,70 |

| | | | |
|--|--------------------|-------------------|------------------|
| 2 Viertelschalen finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Maschine einrichten für 2. Block (=2 Viertelschalen) | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| 2. Block fräsen | CNC-Fräsen | 6,0 AS a DM 18,95 | DM 113,70 |
| 2 Viertelschalen finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Summen: | | 15,0 AS | DM 662,89 |

Tab. 23: $K1_{C,Anpassungskonstruktion}$: *Erstbemusterung, computergestützt, Anpassungskonstruktion*

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|--|-----------------------------|---------------------------|------------------|
| Mustersatz konstruieren | 3D-CAD | 1,0 AS a DM 91,79 | DM 91,79 |
| NC-Programm erzeugen | CAM | 0,5 AS a DM 122,58 | DM 61,29 |
| Maschine einrichten für 1. Block (=2 Viertelschalen) | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| 1. Block fräsen | CNC-Fräsen | 6,0 AS a DM 18,95 | DM 113,70 |
| 2 Viertelschalen finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Maschine einrichten für 2. Block (=2 Viertelschalen) | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| 2. Block fräsen | CNC-Fräsen | 6,0 AS a DM 18,95 | DM 113,70 |
| 2 Viertelschalen finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Summen: | | 13,5 AS | DM 525,20 |

Bei der computergestützten Vorgehensweise – es wird zuerst eine Neukonstruktion betrachtet (s. Tab. 22, $K1_{C,Neukonstruktion}$) – wird zunächst das Verpackungspolster im 3D-CAD-System konstruiert. Aufgrund der einfachen geometrischen Formgebung des zu verpackenden Produktes ist es nicht notwendig, dieses in einen CAD-Datensatz zu überführen. Vom konstruktiven Aufbau her ist das Verpackungspolster sehr einfach zu konstruieren. Da dieses jedoch sehr variabel (s. o.) eingesetzt werden soll und die Integration eines abtrennbaren Distanzformteils erforderlich ist, ergibt sich dennoch ein verhältnismäßig hoher konstruktiver Aufwand von 2,5 Stunden.

Ist die Konstruktion im 3D-CAD-System fertiggestellt, wird der Datensatz in ein CAM-System überspielt, in dem Frässtrategien und Arbeitsschritte für eine automatische Fräsbearbeitung festgelegt werden. Die Erzeugung des NC-Programmes wird anschließend vom CAM-System übernommen. Zum Einrichten der Maschine gehört im wesentlichen das Aufspannen der Rohblöcke und das Umspannen, nachdem die erste Seite des Blockes fertig bearbeitet wurde. Da nicht alle vier Viertelschalen (= ein kompletter Verpackungssatz) aus einem Block gefräst werden können, mussten zwei verwendet werden. Nach Start des vom CAM-System erzeugten NC-Programmes arbeitet die Fräse selbständig die fertige Form aus dem Rohblock heraus. Anschließend muss das gefräste Formteil von Hand mit Schmirgelpapier geglättet und gesäubert werden.

Kostenblock $K1_{C,Anpassungskonstruktion}$ (s. Tab. 23) unterscheidet sich lediglich dadurch, dass angenommen wird, dass eine bereits einmal erzeugte Konstruktion für ein Verpackungspolster wiederverwendet werden kann und lediglich einige Parameter, wie Länge, Breite, Höhe, Rippenbreite und -höhe, anzupassen sind. Entsprechend ist dieser Arbeitsschritt im Vergleich zur Neukonstruktion zeitlich kürzer anzusetzen. Aufgrund der Integration des Distanzformteils fällt der zeitliche Vorteil durch diesen Automatisierungsschritt in diesem konkreten Fall jedoch nicht so groß aus, wie es ansonsten möglich wäre. Demzufolge können die Kosten hierdurch auch nur um etwa 20 % gesenkt werden.

Kostenblock K2:

Tab. 24: $K2_T$: Handmuster anfertigen, traditionell

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 15 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|--|-----------------------------|---------------------------|---------------|
| Blockmaterial zurichten für 1. Muster | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Aufreißen der Innen- kontur (1. Muster) | Manuelle Tätigkeit | 0,8 AS a DM 50,38 | DM 40,30 |

| | | | |
|---------------------------------------|--------------------|-------------------|------------------|
| Innenkontur fräsen (1. Muster) | Maschinenfräsen | 2,5 AS a DM 63,83 | DM 159,58 |
| Aufreißen der Außenkontur (1. Muster) | Manuelle Tätigkeit | 0,8 AS a DM 50,38 | DM 40,30 |
| Außenkontur fräsen (1. Muster) | Maschinenfräsen | 2,5 AS a DM 63,83 | DM 159,58 |
| Muster finishen (1. Muster) | Manuelle Tätigkeit | 0,8 AS a DM 50,38 | DM 40,30 |
| Summen: | | 7,9 AS | DM 465,25 |

Tab. 25: $K2_{C,Handmuster}$: Handmuster CNC-Fräsen, computergestützt

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungsgrundlage | Summe [DM] |
|------------------------|--------------------------|----------------------|------------------|
| NC-Programm erzeugen | CAM | 0,2 AS a DM 122,58 | DM 24,52 |
| Maschine einrichten | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Formteil fräsen | CNC-Fräsen | 3,5 AS a DM 18,95 | DM 66,33 |
| Formteil finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Summen: | | 4,7 AS | DM 163,21 |

Tab. 26: $K2_{C,CAD}$: 3D-CAD-Datensatz überspielen, computergestützt

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungsgrundlage | Summe [DM] |
|------------------------|--------------------------|----------------------|----------------|
| Summen: | | 0,0 AS | DM 0,00 |

Bei der Übergabe des Projektes an den Werkzeugbauer wird angenommen, dass ein neuer Handmustersatz angefertigt werden muss. Bei der traditionellen Vorgehensweise ist derselbe manuelle Aufwand anzusetzen, wie bei der Erstbemusterung (s. Tab. 24). Gewisse Routineeffekte können durch geringfügig kürzere Bearbeitungszeiten berücksichtigt werden. Von Vorteil für traditionelle und computergestützte Vorgehensweisen ist, dass die vier Viertelschalen identisch sind, so dass nicht ein gesamter Satz, sondern nur ein Stück erneut hergestellt werden muss.

Bei der computergestützten Vorgehensweise ist das NC-Programm bei der Erstbemusterung so erstellt worden, dass zwei Viertelschalen aus einem Block gefräst wurden. Da für die Übergabe des Projektes an den Werkzeugbauer jedoch nur ein Muster erforderlich ist, muss ein neues NC-Programm generiert werden (s. Tab. 25). Der Zeitaufwand hierfür hält sich jedoch in Grenzen, da aus dem bereits bestehenden NC-Projekt nur ein Nutzen zu entfernen ist und das Projekt lediglich neu berechnet werden muss. Ansonsten fallen hier nur noch Arbeitsschritte an, die mit der Fräsmaschine in Zusammenhang stehen. Der Anteil an Personalkosten ist entsprechend gering. Kann der Werkzeugbauer auf Basis von 3D-CAD-Daten Serienwerkzeuge herstellen, fallen keine weiteren Kosten an, da die Daten bereits zu Beginn des Projektes erzeugt wurden und lediglich überspielt werden müssen (s. Tab. 26). Der anzusetzende Zeitaufwand hierfür wird vernachlässigt, da er mit der Zeit für das Verpacken und Versenden eines Mustersatzes verglichen werden kann.

Kostenblock K3:

Tab. 27: K3_T: Zweitbemusterung, traditionell

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 15 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|--|-----------------------------|---------------------------|---------------|
| Blockmaterial zurichten für 1. Muster | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Aufreißen der Innen- kontur (1. Muster) | Manuelle Tätigkeit | 1,0 AS a DM 50,38 | DM 50,38 |
| Innenkontur fräsen (1. Muster) | Maschinenfräsen | 3,0 AS a DM 63,83 | DM 191,49 |
| Aufreißen der Außen- kontur (1. Muster) | Manuelle Tätigkeit | 1,0 AS a DM 50,38 | DM 50,38 |
| Außenkontur fräsen (1. Muster) | Maschinenfräsen | 3,0 AS a DM 63,83 | DM 191,49 |
| Muster finishen (1. Muster) | Manuelle Tätigkeit | 1,0 AS a DM 50,38 | DM 50,38 |

| | | | |
|--|--------------------|-------------------|--------------------|
| Blockmaterial zureichten für Muster 2 bis 4 | Manuelle Tätigkeit | 1,0 AS a DM 50,38 | DM 50,38 |
| Aufreißen der Innenkontur (2. bis 4. Muster) | Manuelle Tätigkeit | 2,5 AS a DM 50,38 | DM 125,95 |
| Innenkontur fräsen (2. bis 4. Muster) | Maschinenfräsen | 7,5 AS a DM 63,83 | DM 478,73 |
| Aufreißen der Außenkontur (2. bis 4. Muster) | Manuelle Tätigkeit | 2,5 AS a DM 50,38 | DM 125,95 |
| Außenkontur fräsen (2. bis 4. Muster) | Maschinenfräsen | 7,5 AS a DM 63,83 | DM 478,73 |
| Muster finishen (2. bis 4. Muster) | Manuelle Tätigkeit | 2,5 AS a DM 50,38 | DM 125,95 |
| Summen: | | 33,0 AS | DM 1.945,00 |

Tab. 28: K3c: Zweitbemusterung, computergestützt

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungsgrundlage | Summe [DM] |
|--|--------------------------|----------------------|------------------|
| Konstruktion ändern | 3D-CAD | 0,5 AS a DM 91,79 | DM 45,90 |
| NC-Programm erzeugen | CAM | 0,5 AS a DM 122,58 | DM 61,29 |
| Maschine einrichten für 1. Block (=2 Viertelschalen) | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| 1. Block fräsen | CNC-Fräsen | 6,0 AS a DM 18,95 | DM 113,70 |
| 2 Viertelschalen finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Maschine einrichten für 2. Block (=2 Viertelschalen) | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| 2. Block fräsen | CNC-Fräsen | 6,0 AS a DM 18,95 | DM 113,70 |
| 2 Viertelschalen finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Summen: | | 15,0 AS | DM 479,31 |

Die Durchführung einer Änderung an einem Handmustersatz – es wird davon ausgegangen, dass die Falltests keine zufriedenstellenden Ergebnisse geliefert haben und demzufolge die Rippengeometrien geändert werden müssen – ist bei der traditionellen Vorgehensweise mit einer Erstbemusterung vergleichbar,

da hierzu dieselben Arbeitsschritte durchzuführen sind (s. Tab. 27). Zeitersparnisse können bestenfalls durch Routineeffekte erzielt werden.

Bei der computergestützten Vorgehensweise (s. Tab. 28) werden die Änderungen zunächst im 3D-CAD-Datensatz am CAD-System durchgeführt. Da dieser Datensatz parametrisch aufgebaut ist, so dass Änderungen nahezu auf Knopfdruck durchgeführt werden können, kann ein entsprechend geringerer Zeitanteil für die Änderungskonstruktion angesetzt werden. Alle weiteren Arbeitsschritte von der NC-Programm-Erstellung bis zur manuellen Glättung des Handmusters nach dem Fräsen sind mit einer Erstbemusterung identisch.

Kostenblock K4:

Tab. 29: K4_T: Dokumentationszeichnung anfertigen, traditionell

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 15 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|---|-----------------------------|---------------------------|------------------|
| Zeichnung anfertigen (3-Tafel-Projektion inkl. Be- maßungen) | Manuelle Tätigkeit | 8,5 AS a DM 50,38 | DM 428,23 |
| Summen: | | 8,5 AS | DM 428,23 |

Tab. 30: K4_C: Dokumentationszeichnung anfertigen, computergestützt

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|---|-----------------------------|---------------------------|-----------------|
| Zeichnung aus 3D-CAD- Daten ableiten | 3D-CAD | 0,3 AS a DM 91,79 | DM 27,54 |
| Summen: | | 0,3 AS | DM 27,54 |

Wünscht der Kunde eine Zeichnung zur Dokumentation, so muss bei der traditionellen Vorgehensweise (s. Tab. 29) davon ausgegangen werden, dass diese vom Mustermacher an einem Zeichenbrett von Hand erstellt werden muss. Bei einer üblichen Dreitafelprojektion fällt ein entsprechend hoher Zeitaufwand für die zeichnerische Umsetzung an.

Bei der computergestützten Vorgehensweise (s. Tab. 30) kann eine Zeichnung automatisch von einem 3D-CAD-Modell abgeleitet werden. Hier müssen lediglich einige Bemaßungen von Hand hinzugefügt werden. Der Aufwand hierfür ist äußerst gering.

Fazit:

Tab. 31: Fazit für Pilotprojekt „Flugzeug-Speiseofen“

| Kostenblock | Kosten der traditionelle Vorgehensweise | Kosten der computergestützten Vorgehensweise |
|-------------|---|--|
| K1 | DM 1945,00 | DM 662,89 bzw. DM 525,20 |
| K2 | DM 465,25 | DM 163,21 bzw. DM 0,00 |
| K3 | DM 1945,00 | DM 479,31 |
| K4 | DM 428,23 | DM 27,54 |

Bei diesem Projekt ist zu sehen, dass selbst die Erstbemusterung (s. Tab. 31, K1) mit der computergestützten Vorgehensweise deutlich kostengünstiger durchzuführen ist (DM 1945,00 gegenüber DM 662,89 bzw. DM 525,20). In diesem konkreten Fall liegt der Grund dafür eindeutig in der großen Anzahl identischer Einzelstücke an Handmustern begründet. Ist die kosten- und personalintensive Konstruktion am 3D-CAD-System erst einmal abgeschlossen, übernimmt die Fräsmaschine die Routinearbeiten (Ausfräsen der Muster) nahezu selbständig und aufgrund des niedrigen anzusetzenden Stundensatzes besonders kostengünstig.

Das Anfertigen einer einzelnen Viertelschale bspw. als Muster für den Werkzeugbauer (s. Tab. 31, K2) verursacht bei der computergestützten Vorgehensweise nur etwa 35 % der Kosten, die bei der traditionellen Vorgehensweise anzusetzen wären (DM 163,21 gegenüber DM 465,25), da hier wesentliche Arbeitsschritte durch eine Maschine umgesetzt werden, deren Stundensätze verhältnismäßig gering sind. Arbeitet ein Verpackungshersteller mit einem fortschrittlichen Werkzeugbauer zusammen, so reduziert sich der Arbeitsaufwand weitestgehend auf den Austausch von Daten.

Im Falle einer notwendigen Änderung am Handmustersatz zum Zwecke einer erneuten Durchführung von Falltests (s. Tab. 31, K3) ist die computergestützte Vorgehensweise bei diesem Projekt noch mehr im Vorteil, da auf traditionellem Wege dieselben Arbeiten anzusetzen sind, wie bei der Erstbemusterung. Bei der computergestützten Vorgehensweise fallen hauptsächlich Maschinenstunden an. Dem entsprechend verursacht die computergestützte Vorgehensweise nur etwa 25 % der Kosten einer traditionellen Vorgehensweise (DM 1945,00 gegenüber DM 479,31).

Aufgaben, wie das Anfertigen einer Dokumentationszeichnung (s. Tab. 31, K4) für den Kunden, werden bei einer computergestützten Vorgehensweise zu einem „Abfallprodukt“.

6.2.3.2. Pilotprojekt: HiFi-Verstärker

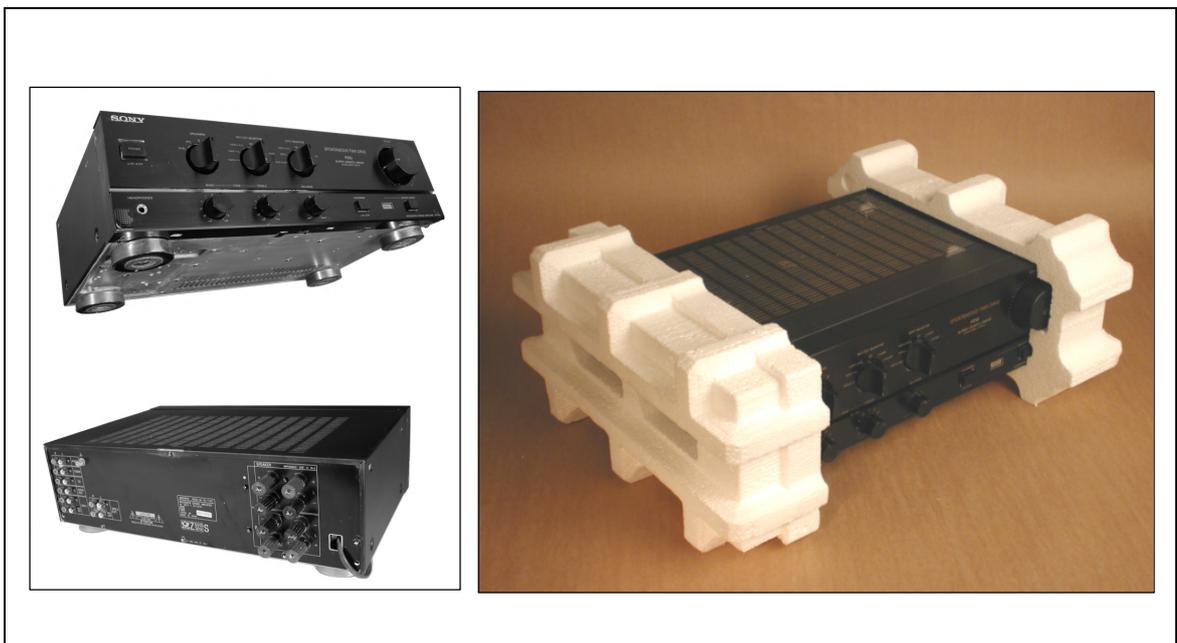


Abb. 86: Pilotprojekt: HiFi-Verstärker

Vorgehensweise:

Zunächst wurden die wesentlichen geometrischen Merkmale des Verstärkers nachkonstruiert (Szenario 3, s. Tab. 20, S. 192). Beide Verpackungsschalen

entstammen derselben Grundvariante und unterscheiden sich lediglich durch die Innenkontur. Die Formnester in beiden Halbschalen wurden über Bool'sche Operationen im 3D-CAD-System erzeugt. Obwohl es möglich wäre, auch hier eine Seitenschale für beide Seiten zu erstellen, werden hier bewusst zwei verschiedene konstruiert.

Kostenblock K1:

Tab. 32: K1_T: Erstbemusterung, traditionell

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 15 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|---|-----------------------------|---------------------------|------------------|
| Blockmaterial zurechten für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Aufreißen der Innenkontur für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Innenkontur fräsen für linke Schale | Maschinenfräsen | 1,5 AS a DM 63,83 | DM 95,75 |
| Aufreißen der Außenkontur für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Außenkontur fräsen für linke Schale | Maschinenfräsen | 1,5 AS a DM 63,83 | DM 95,75 |
| Linke Schale finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Blockmaterial zurechten für rechte Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,2 AS a DM 50,38 | DM 10,08 |
| Aufreißen der Innenkontur für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,12 |
| Innenkontur fräsen für rechte Schale | Maschinenfräsen | 1,2 AS a DM 63,83 | DM 76,60 |
| Aufreißen der Außenkontur für rechte Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,12 |
| Außenkontur fräsen für rechte Schale | Maschinenfräsen | 1,2 AS a DM 63,83 | DM 76,60 |
| Rechte Schale finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Summen: | | 8,7 AS | DM 510,97 |

Die Kosten $K1_T$ (s. Tab. 32) ergeben sich dadurch, dass zunächst eine der beiden unterschiedlichen Halbschalen angefertigt wird. Wie im Rahmen des vorherigen Projektes beschrieben, wird anfangs ein Rohblock zugerichtet. Anschließend wird nacheinander die Innenkontur und anschließend die Außenkontur des Formteils auf dem Block angerissen und ausgefräst. Sowohl Außen- als auch Innenkontur sind von verhältnismäßig einfacher Geometrie, so dass der zeitliche Aufwand relativ gering ausfällt. Da die Außenkontur der zweiten Schale identisch mit der der ersten Schale ist und selbst die Innenkonturen nur marginal abweichen, sind beim Anfertigen der zweiten Schale etwas kürzere Bearbeitungszeiten angefallen.

Tab. 33: $K1_{C,Neukonstruktion}$: *Erstbemusterung, computergestützt, Neukonstruktion*

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------|
| Verstärker nachkonstruieren | 3D-CAD | 1,0 AS a DM 91,79 | DM 91,79 |
| Mustersatz konstruieren | 3D-CAD | 1,5 AS a DM 91,79 | DM 137,69 |
| NC-Programm erzeugen | CAM | 0,5 AS a DM 122,58 | DM 61,29 |
| Maschine einrichten | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Mustersatz fräsen | CNC-Fräsen | 5,5 AS a DM 18,95 | DM 104,23 |
| Muster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Summen: | | 9,5 AS | DM 467,36 |

Tab. 34: $K1_{C,Anpassungskonstruktion}$: *Erstbemusterung, computergestützt, Anpassungskonstruktion*

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------|
| Verstärker nachkonstruieren | 3D-CAD | 1,0 AS a DM 91,79 | DM 91,79 |
| Mustersatz konstruieren | 3D-CAD | 0,5 AS a DM 91,79 | DM 45,90 |
| NC-Programm erzeugen | CAM | 0,5 AS a DM 122,58 | DM 61,29 |

| | | | |
|---------------------|--------------------|-------------------|------------------|
| Maschine einrichten | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Mustersatz fräsen | CNC-Fräsen | 5,5 AS a DM 18,95 | DM 104,23 |
| Muster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Summen: | | 8,5 AS | DM 375,57 |

Bei der computergestützten Vorgehensweise (s. Tab. 33) wird zunächst die relevante Geometrie des Verstärkers im 3D-CAD nachkonstruiert. Anschließend wird eine Rohform für ein Verpackungspolster ebenfalls im 3D-CAD konstruiert. In einer Baugruppe werden Produktdatensatz und zweimal der Polsterdatensatz angeordnet. Anschließend wird durch Subtraktion des Produktdatensatzes von beiden Polsterdatensätzen das Formnest in beiden Schalen gleichzeitig erzeugt. Sind beide Halbschalen fertiggestellt, müssen im CAM-System wiederum NC-Datensätze dafür erzeugt werden. Daran schließt sich das Fräsen der Polsterschalen auf der CNC-Maschine anhand der zuvor erzeugten NC-Programme mit den üblichen manuellen Arbeitsschritten an. In diesem Fall können beide Schalen aus einem Block herausgearbeitet werden, so dass das Einrichten der Maschine nur einmal anfällt.

Muss die Grundvariante des Verpackungspolsters nicht von Grund auf neu konstruiert werden, sondern kann auf eine bereits erstellte Variante zurückgegriffen werden (s. Tab. 34, Kostenblock K1_{C,Anpassungskonstruktion}), können die Kosten um 21 % reduziert werden.

Kostenblock K2:

Tab. 35: K2₇: Handmuster anfertigen, traditionell

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 15 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|---|-----------------------------|---------------------------|---------------|
| Blockmaterial zurichten für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,2 AS a DM 50,38 | DM 10,08 |
| Aufreißen der Innen- kontur für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,12 |

| | | | |
|---|--------------------|-------------------|------------------|
| Innenkontur fräsen für linke Schale | Maschinenfräsen | 1,2 AS a DM 63,83 | DM 76,60 |
| Aufreißen der Außenkontur für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,12 |
| Außenkontur fräsen für linke Schale | Maschinenfräsen | 1,2 AS a DM 63,83 | DM 76,60 |
| Linke Schale finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Blockmaterial zurichten für rechte Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,2 AS a DM 50,38 | DM 10,08 |
| Aufreißen der Innenkontur für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,12 |
| Innenkontur fräsen für rechte Schale | Maschinenfräsen | 1,2 AS a DM 63,83 | DM 76,60 |
| Aufreißen der Außenkontur für rechte Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,12 |
| Außenkontur fräsen für rechte Schale | Maschinenfräsen | 1,2 AS a DM 63,83 | DM 76,60 |
| Rechte Schale finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Summen: | | 7,4 AS | DM 437,42 |

Tab. 36: $K2_{C,Handmuster}$: Handmuster CNC-Fräsen, computergestützt

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungsgrundlage | Summe [DM] |
|------------------------|--------------------------|----------------------|------------------|
| Maschine einrichten | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Mustersatz fräsen | CNC-Fräsen | 5,5 AS a DM 18,95 | DM 104,23 |
| Muster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Summen: | | 6,5 AS | DM 176,59 |

Tab. 37: $K2_{C,CAD}$: 3D-CAD-Datensatz überspielen, computergestützt

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungsgrundlage | Summe [DM] |
|------------------------|--------------------------|----------------------|----------------|
| Summen: | | 0,0 AS | DM 0,00 |

Ist es notwendig, für die Übergabe des Projektes an den Werkzeugbauer einen neuen Handmustersatz anzufertigen, ist die computergestützte Vorgehensweise klar im Vorteil (vgl. Tab. 35 und Tab. 36). Hier kommt ihr besonders zugute, dass ein Satz Handmuster gefertigt werden muss und nicht nur ein Stück (doppelter Aufwand bei der traditionellen Vorgehensweise), und dass beide Schalen gleichzeitig aus einem Block (= ein Fräsdurchgang) hergestellt werden können. Der Vorteil ergibt sich aber – wie deutlich zu sehen ist – nicht durch den Zeitvorteil, sondern vielmehr durch den Kostenvorteil einer autark arbeitenden Maschine.

Kann der Werkzeugbauer auf Basis von 3D-CAD-Daten Serienwerkzeuge herstellen (s. Tab. 37), ist der Vorteil um so größer.

Kostenblock K3:

Tab. 38: K3₇: Zweitbemusterung, traditionell

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 15 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|---|-----------------------------|---------------------------|---------------|
| Blockmaterial zurichten für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Aufreißen der Innen- kontur für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Innenkontur fräsen für linke Schale | Maschinenfräsen | 1,5 AS a DM 63,83 | DM 95,75 |
| Aufreißen der Außen- kontur für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Außenkontur fräsen für linke Schale | Maschinenfräsen | 1,5 AS a DM 63,83 | DM 95,75 |
| Linke Schale finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Blockmaterial zurichten für rechte Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,2 AS a DM 50,38 | DM 10,08 |
| Aufreißen der Innen- kontur für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,12 |

| | | | |
|---|--------------------|-------------------|------------------|
| Innenkontur fräsen für rechte Schale | Maschinenfräsen | 1,2 AS a DM 63,83 | DM 76,60 |
| Aufreißen der Außenkontur für rechte Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,12 |
| Außenkontur fräsen für rechte Schale | Maschinenfräsen | 1,2 AS a DM 63,83 | DM 76,60 |
| Rechte Schale finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Summen: | | 8,7 AS | DM 510,97 |

Tab. 39: K3_C: Zweitbemusterung, computergestützt

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------|
| Konstruktion anpassen | 3D-CAD | 0,5 AS a DM 91,79 | DM 45,90 |
| NC-Programm erzeugen | CAM | 0,5 AS a DM 122,58 | DM 61,29 |
| Maschine einrichten | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Mustersatz fräsen | CNC-Fräsen | 5,5 AS a DM 18,95 | DM 104,23 |
| Muster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Summen: | | 5,5 AS | DM 283,78 |

Änderungen erfordern bei der computergestützten Vorgehensweise wiederum keinen großen Aufwand (vgl. Tab. 38 und Tab. 39). Hier wirken sich wiederum dieselben Effekte – wie in Kostenblock K2 beschrieben – besonders positiv aus.

Kostenblock K4:

Tab. 40: K4_T: Dokumentationszeichnung anfertigen, traditionell

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 15 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|---|-----------------------------|---------------------------|---------------|
| Zeichnung anfertigen für linke Schale (3-Tafel-Projektion inkl. Bemaßungen) | Manuelle Tätigkeit | 4,0 AS a DM 50,38 | DM 201,52 |

| | | | |
|--|--------------------|-------------------|------------------|
| Zeichnung anfertigen für rechte Schale (3-Tafel-Projektion inkl. Bemaßungen) | Manuelle Tätigkeit | 4,0 AS a DM 50,38 | DM 201,52 |
| Summen: | | 8,0 AS | DM 403,04 |

Tab. 41: K4c: Dokumentationszeichnung anfertigen, computergestützt

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------|
| Zeichnung aus 3D-CAD-Daten ableiten | 3D-CAD | 0,5 AS a DM 91,79 | DM 45,90 |
| Summen: | | 0,5 AS | DM 45,90 |

Zur Erstellung einer Dokumentationszeichnung fällt bei der traditionellen Vorgehensweise (s. Tab. 40) wiederum ein hoher zeitlicher Aufwand an, insbesondere da zwei Polsterschalen zu zeichnen sind.

Bei der computergestützten Vorgehensweise (s. Tab. 41) wird die Zeichnung automatisch von den 3D-CAD-Modellen abgeleitet. Die hierdurch anfallenden Kosten sind sehr gering.

Fazit:

Tab. 42: Fazit für Pilotprojekt „HiFi-Verstärker“

| Kostenblock | Kosten der traditionelle Vorgehensweise | Kosten der computergestützten Vorgehensweise |
|-------------|--|---|
| K1 | DM 510,97 | DM 467,36 bzw. DM 375,57 |
| K2 | DM 437,42 | DM 176,59 bzw. DM 0,00 |
| K3 | DM 510,97 | DM 283,78 |
| K4 | DM 403,04 | DM 45,90 |

Auch bei diesem Projekt ist zu sehen, dass selbst die Erstbemusterung (s. Tab. 42, K1) mit der computergestützten Vorgehensweise kostengünstiger durchzu-

führen ist (DM 510,97 gegenüber DM 467,36 bzw. DM 375,57). Bei diesem Projekt ist der Kostenvorteil jedoch nicht so ausgeprägt, wie es beim ersten Pilotprojekt der Fall war. Dieses liegt zum einen in der einfachen geometrischen Gestalt der beiden Halbschalen begründet (→ leichte und schnelle Umsetzung bei der traditionellen Vorgehensweise). Zum anderen fallen hier weniger Routinearbeiten an, die von einer Maschine automatisch durchgeführt werden können (keine identischen Muster). Die Anzahl der herzustellenden Teile für einen kompletten Verpackungssatz spielt ebenfalls eine große Rolle.

Bei Änderungen (s. Tab. 42, K3) oder der Anfertigung weiterer Handmustersätze (s. Tab. 42, K2) wirkt sich bei diesem Projekt der Umstand besonders positiv aus, dass beide Polsterschalen verschieden sind (→ für einen kompletten Verpackungssatz müssen zwei Einzelteile angefertigt werden) und von den Abmessungen her aus einem Block gefertigt werden können (→ kürzere Maschinenlaufzeiten ohne manuellen Eingriff).

Aufgaben, wie das Anfertigen einer Dokumentationszeichnung (s. Tab. 42, K4) für den Kunden, werden bei einer computergestützten Vorgehensweise zu einem „Abfallprodukt“.

6.2.3.3. Pilotprojekt: Kfz-Radio/CD-Einheit

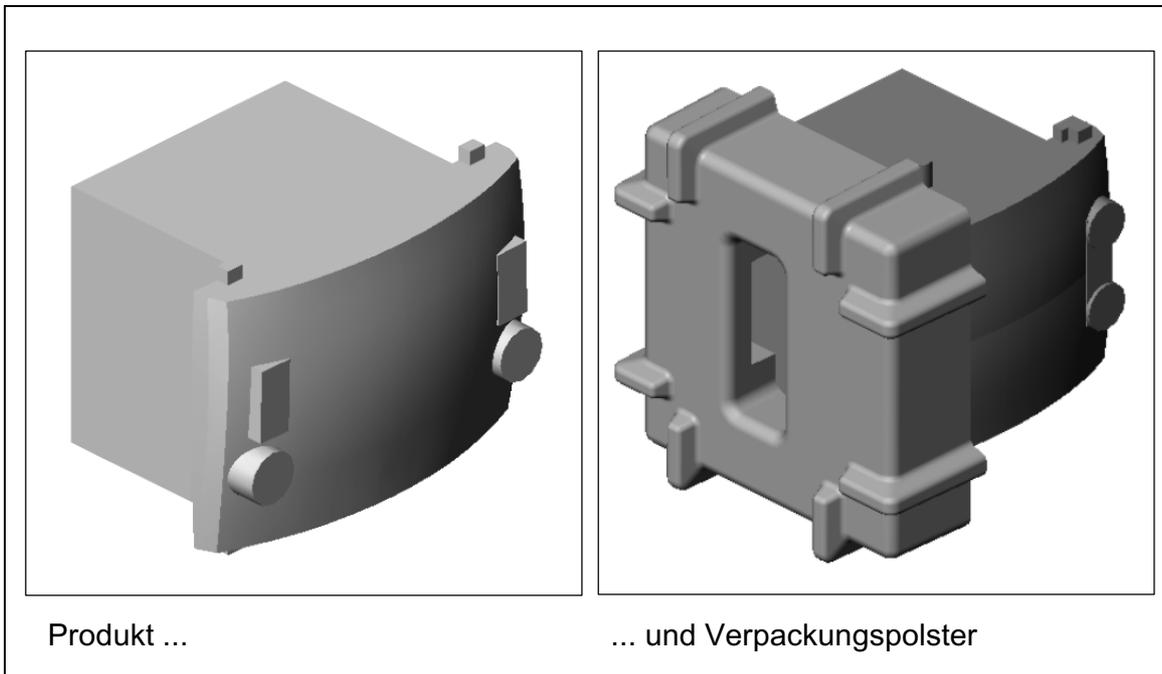


Abb. 87: Pilotprojekt: Kfz-Radio/CD-Einheit

Vorgehensweise:

Die Aufgabenstellung bestand darin, für das Produkt eine stoßdämpfende Verpackung in Form von seitlich aufzusetzenden Polsterschalen zu entwickeln. Die Polsterschalen sollten so gestaltet sein, dass nur eine Variante als linke und gleichzeitig rechte Schale verwendet werden kann. Der Kunde hat eine Produktempfindlichkeit von 40 G bei einer Fallhöhe von 74 cm vorgegeben.

Das Produkt wurde zunächst aufgrund der Freiformflächen im Frontblendenbereich 3D-digitalisiert. Anschließend wurden die wesentlichen Geometriemerkmale durch konstruktive Reverse-Engineering-Techniken in CAD-Daten zurückgeführt (Szenario 4, s. Tab. 20, S. 192).

Das Formnest wurde über Bool'sche Operationen im 3D-CAD-System erzeugt. Gleichzeitig mit den technischen Anforderungen sollten logistische Aspekte berücksichtigt werden. Der Transport erfolgt auf einem Ladungsträger mit den Abmessungen 1.200 mm x 1.000 mm. Eine möglichst gute Ausnutzung dieser Stellfläche sollte bei der Entwicklung berücksichtigt werden.

Kostenblock K1:

Tab. 43: K1_T: Erstbemusterung, traditionell

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 15 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|---|-----------------------------|---------------------------|------------------|
| Blockmaterial zurichten für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Aufreißen der Innenkontur für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Innenkontur fräsen für linke Schale | Maschinenfräsen | 1,5 AS a DM 63,83 | DM 95,75 |
| Aufreißen der Außenkontur für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Außenkontur fräsen für linke Schale | Maschinenfräsen | 1,5 AS a DM 63,83 | DM 95,75 |
| Linke Schale finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Blockmaterial zurichten für rechte Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,2 AS a DM 50,38 | DM 10,08 |
| Aufreißen der Innenkontur für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,12 |
| Innenkontur fräsen für rechte Schale | Maschinenfräsen | 1,2 AS a DM 63,83 | DM 76,60 |
| Aufreißen der Außenkontur für rechte Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,12 |
| Außenkontur fräsen für rechte Schale | Maschinenfräsen | 1,2 AS a DM 63,83 | DM 76,60 |
| Rechte Schale finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Summen: | | 8,7 AS | DM 510,97 |

Im Rahmen der traditionellen Vorgehensweise (s. Tab. 43) wird zunächst ein Rohblock zugerichtet, auf dem anschließend die Innenkontur angerissen und ausgefräst wird. Sowohl Außen- als auch Innenkontur sind von verhältnismäßig einfacher Gestalt, so dass ein relativ geringer Aufwand für die durchzuführenden Fräsarbeiten entsteht. Unter normalen Umständen ist es für einen Muster-

macher besonders schwierig und zeitaufwendig, Freiformflächen herauszuarbeiten. Bei diesem Objekt gibt es nur einen Freiformbereich (Frontblende), der zudem im Polster zum Zwecke der Freistellung der Bedienelemente weitestgehend nicht ausgearbeitet wird. Dementsprechend fallen die Bearbeitungszeiten relativ gering aus.

Tab. 44: $K1_{C,Neukonstruktion}$: *Erstbemusterung, computergestützt, Neukonstruktion*

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|---|-----------------------------|---------------------------|------------------|
| Produkt zur Digitalisierung vorbereiten | Manuelle Tätigkeit | 0,25 AS a DM 72,35 | DM 18,09 |
| Produkt 3D-digitalisieren | 3D-Scannen | 0,7 AS a DM 247,99 | DM 173,60 |
| Digitalisierdaten aufbereiten | Reverse-Engineering | 0,5 AS a DM 100,36 | DM 50,18 |
| Produkt nachkonstruieren | 3D-CAD | 1,5 AS a DM 91,79 | DM 137,69 |
| Polster konstruieren | 3D-CAD | 1,5 AS a DM 91,79 | DM 137,69 |
| NC-Programm erzeugen | CAM | 0,5 AS a DM 122,58 | DM 61,29 |
| Maschine einrichten | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Mustersatz fräsen | CNC-Fräsen | 4,5 AS a DM 18,95 | DM 85,28 |
| Muster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Summen: | | 10,45 AS | DM 736,18 |

Tab. 45: $K1_{C,Anpassungskonstruktion}$: *Erstbemusterung, computergestützt, Anpassungskonstruktion*

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|---|-----------------------------|---------------------------|---------------|
| Produkt zur Digitalisierung vorbereiten | Manuelle Tätigkeit | 0,25 AS a DM 72,35 | DM 18,09 |
| Produkt 3D-digitalisieren | 3D-Scannen | 0,7 AS a DM 247,99 | DM 173,60 |
| Digitalisierdaten aufbereiten | Reverse-Engineering | 0,5 AS a DM 100,36 | DM 50,18 |
| Produkt nachkonstruieren | 3D-CAD | 1,5 AS a DM 91,79 | DM 137,69 |

| | | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| Polster konstruieren | 3D-CAD | 0,5 AS a DM 91,79 | DM 45,90 |
| NC-Programm erzeugen | CAM | 0,5 AS a DM 122,58 | DM 61,29 |
| Maschine einrichten | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Mustersatz fräsen | CNC-Fräsen | 4,5 AS a DM 18,95 | DM 85,28 |
| Muster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Summen: | | 9,45 AS | DM 644,39 |

Aufgrund der Freiformflächen im Frontbereich und insbesondere aufgrund der Tatsache, dass dasselbe Polsterelement sowohl links wie rechts appliziert werden sollte – dieser Umstand stellt bei der Entwicklung eine besonders hohe Herausforderung dar – erschien es im Rahmen der computergestützten Vorgehensweise (s. Tab. 44) sinnvoll, das Objekt für eine möglichst exakte Nachkonstruktion zunächst dreidimensional zu digitalisieren. Allein dieser Arbeitsschritt verursacht bereits mehr als 1/3 der anfallenden Gesamtkosten. Bis das zu verpackende Produkt als verwertbarer Datensatz zur Verfügung steht, sind bereits nahezu 60 % der gesamten Kosten angefallen. Aufgrund der hohen technischen Anforderungen an die zu entwickelnde Verpackungslösung war aber bereits zu Projektbeginn abzusehen, dass der erste Handmustersatz nicht die endgültige Lösung sein würde, so dass der Aufwand gerechtfertigt erschien. Wie sich bereits bei anderen Projekten gezeigt hat, ist es von Vorteil, wenn eine bereits zuvor erzeugte Polstervariante erneut verwendet werden kann und nur angepasst werden muss (vgl. Tab. 44 und Tab. 45, Kosten: DM 644,39 gegenüber DM 736,18).

Kostenblock K2:

Tab. 46: $K2_T$: Handmuster anfertigen, traditionell

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 15 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|--|-----------------------------|---------------------------|---------------|
| Blockmaterial zurichten für eine Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,2 AS a DM 50,38 | DM 10,08 |
| Aufreißen der Innen- kontur für eine Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,12 |

| | | | |
|---|--------------------|-------------------|------------------|
| Innenkontur fräsen für eine Schale | Maschinenfräsen | 1,2 AS a DM 63,83 | DM 76,60 |
| Aufreißen der Außenkontur für eine Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,12 |
| Außenkontur fräsen für eine Schale | Maschinenfräsen | 1,2 AS a DM 63,83 | DM 76,60 |
| Schale finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Summen: | | 3,7 AS | DM 218,71 |

Tab. 47: $K2_{C,Handmuster}$: Handmuster CNC-Fräsen, computergestützt

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungsgrundlage | Summe [DM] |
|------------------------|--------------------------|----------------------|------------------|
| Maschine einrichten | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Mustersatz fräsen | CNC-Fräsen | 4,5 AS a DM 18,95 | DM 85,28 |
| Muster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Summen: | | 5,5 AS | DM 157,64 |

Tab. 48: $K2_{C,CAD}$: 3D-CAD-Datensatz überspielen, computergestützt

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungsgrundlage | Summe [DM] |
|------------------------|--------------------------|----------------------|----------------|
| Summen: | | 0,0 AS | DM 0,00 |

Auch bei diesem Projekt zeigt sich deutlich, dass, wenn ein weiterer Handmustersatz angefertigt werden muss – hiervon wird bei der Übergabe des Projektes an den Werkzeugbauer ausgegangen – die computergestützte Vorgehensweise klare Vorteile bietet (vgl. Tab. 46 und Tab. 47). Dennoch kann der hohe betriebene Aufwand im Rahmen der Erstbemusterung in der Summe nicht aufgeholt werden ($DM\ 510,97_{K1T} + DM\ 218,71_{K2T} = DM\ 729,68_T$ gegenüber $DM\ 736,18_{K1C} + DM\ 157,64_{K2C} = DM\ 893,82_T$).

Kostenblock K3:

Tab. 49: K3_T: Zweitbemusterung, traditionell

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 15 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|---|-----------------------------|---------------------------|------------------|
| Blockmaterial zurichten für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Aufreißen der Innenkontur für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Innenkontur fräsen für linke Schale | Maschinenfräsen | 1,5 AS a DM 63,83 | DM 95,75 |
| Aufreißen der Außenkontur für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Außenkontur fräsen für linke Schale | Maschinenfräsen | 1,5 AS a DM 63,83 | DM 95,75 |
| Linke Schale finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Blockmaterial zurichten für rechte Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,2 AS a DM 50,38 | DM 10,08 |
| Aufreißen der Innenkontur für linke Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,12 |
| Innenkontur fräsen für rechte Schale | Maschinenfräsen | 1,2 AS a DM 63,83 | DM 76,60 |
| Aufreißen der Außenkontur für rechte Schale | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,12 |
| Außenkontur fräsen für rechte Schale | Maschinenfräsen | 1,2 AS a DM 63,83 | DM 76,60 |
| Rechte Schale finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Summen: | | 8,7 AS | DM 510,97 |

Tab. 50: K3_C: Zweitbemusterung, computergestützt

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------|
| Konstruktion anpassen | 3D-CAD | 0,5 AS a DM 91,79 | DM 45,90 |

| | | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| NC-Programm erzeugen | CAM | 0,5 AS a DM 122,58 | DM 61,29 |
| Maschine einrichten | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Mustersatz fräsen | CNC-Fräsen | 4,5 AS a DM 18,95 | DM 85,28 |
| Muster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Summen: | | 6,5 AS | DM 264,83 |

Wie sich bereits bei anderen Projekten gezeigt hat, ergeben sich durch die computergestützte Vorgehensweise Vorteile, wenn mehr als ein Handmustersatz hergestellt werden muss, sei es im Zuge der Übergabe an den Werkzeugbauer (K2) oder – wie hier – durch die Notwendigkeit zur Durchführung von Änderung an der Erstkonstruktion (vgl. Tab. 49 und Tab. 50). Hier kann der hohe Aufwand eines Reverse-Engineerings im Rahmen der Erstbemusterung erstmalig bei diesem Projekt ausgeglichen werden, ohne jedoch zu einem großen Vorteil zu führen ($DM\ 510,97_{K1T} + DM\ 510,97_{K3T} = DM\ 1.021,94_T$ gegenüber $DM\ 736,18_{K1C} + DM\ 264,83_{K3C} = DM\ 1.001,01_T$).

Kostenblock K4:

Tab. 51: K4_T: Dokumentationszeichnung anfertigen, traditionell

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 15 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|---|-----------------------------|---------------------------|------------------|
| Zeichnung anfertigen für eine Schale (3-Tafel-Projektion inkl. Bemessungen) | Manuelle Tätigkeit | 5,0 AS a DM 50,38 | DM 251,90 |
| Summen: | | 5,0 AS | DM 251,90 |

Tab. 52: K4_C: Dokumentationszeichnung anfertigen, computergestützt

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------|
| Zeichnung aus 3D-CAD-Daten ableiten | 3D-CAD | 0,3 AS a DM 91,79 | DM 27,54 |
| Summen: | | 0,3 AS | DM 27,54 |

Das Erstellen einer Zeichnung zur Dokumentation ist bei der computergestützten Vorgehensweise (s. Tab. 52) erneut nur eine Nebensächlichkeit. Kostenmäßig nicht zu bewerten ist die Tatsache, dass bei Freiformflächen eine korrekte zeichnerische Darstellung kaum noch möglich ist.

Fazit:

Tab. 53: Fazit für Pilotprojekt „Kfz-Radio/CD-Wechsler“

| Kostenblock | Kosten der traditionelle Vorgehensweise | Kosten der computergestützten Vorgehensweise |
|-------------|---|--|
| K1 | DM 510,97 | DM 736,18 bzw. DM 644,39 |
| K2 | DM 218,71 | DM 157,64 bzw. DM 0,00 |
| K3 | DM 510,97 | DM 264,83 |
| K4 | DM 251,90 | DM 27,54 |

Dieses Projekt zeigt deutlich, dass durch den Einsatz der Reverse-Engineering-Technik hohe Kosten erzeugt werden, so dass im Rahmen einer Erstbemusterung (s. Tab. 53, K1) die traditionelle Vorgehensweise kostengünstiger ist und somit zu bevorzugen wäre.

Der Einsatz der Reverse-Engineering-Technik ist im Rahmen einer computergestützten Kette nicht zu vermeiden, wenn das Produkt Freiformflächen enthält, die im Verpackungspolster abgebildet werden müssen. Unter normalen Umständen ist das Herausarbeiten von Freiformflächen mit Hilfe der traditionellen Vorgehensweise mit einem sehr hohen manuellen Aufwand verbunden, da hier nicht gefräst werden kann, sondern von Hand geschliffen werden muss, wobei dieser Prozess mit einem ständigen Wechsel von Schleifen und Passform überprüfen verbunden ist. In diesem konkreten Projekt ist der Anteil an Freiformflächen im Polster jedoch verschwindend gering, so dass auf traditionellem Wege kaum Mehraufwand entsteht, im Rahmen der computergestützten Kette jedoch nicht auf Reverse-Engineering verzichtet werden kann.

Diese Verpackungsentwicklung ist ein Beispiel für Projekte, bei denen die computergestützte Vorgehensweise keine Kostenvorteile bringt, sondern vielleicht

sogar Nachteile. Erst wenn die Anforderungen des Kunden so hoch sind, dass auch der zweite Falltest nicht das gewünschte Ergebnis bringt (aus praktischen Erfahrungen muss dieser Fall jedoch als äußerst selten eingestuft werden), ist hier die computergestützte Vorgehensweise von Vorteil.

6.2.3.4. Pilotprojekt: Staubsauger



Abb. 88: Pilotprojekt: Industriestaubsauger

Vorgehensweise:

Der hier betrachtete Industriestaubsauger besteht nahezu ausschließlich aus Freiformflächen und entzieht sich somit einer einfachen Nachkonstruktion im 3D-CAD. Um die Geometrie in digitaler Form verfügbar zu machen, musste das Produkt zunächst rundum 3D-digitalisiert werden. Anschließend wurde eine halbautomatische Flächenrückführung (vgl. Kap. 5.4.3, S. 140) durchgeführt, um einen verwertbaren CAD-Datensatz zu erhalten (Szenario 5, s. Tab. 20, S. 192). Aufgrund der Größe des Objektes wurde insbesondere bei der Polsterung der Heckpartie des Staubsaugers darauf geachtet, dass nur soviel Verpackungsvolumen anfällt, wie zur Funktionserfüllung notwendig ist. Aus diesem

Grund wurde eine dreiteilige Verpackungslösung gewählt. Die Auslegung erfolgt auf eine Belastbarkeit von 60 G bei einer Fallhöhe von 80 cm.

Kostenblock K1:

Tab. 54: K1_T: Erstbemusterung, traditionell

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 15 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|---|-----------------------------|---------------------------|---------------|
| Blockmaterial zurichten für Frontpolster | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Aufreißen der Innenkontur für Frontpolster | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,11 |
| Innenkontur in Frontpolster vorfräsen | Maschinenfräsen | 1,0 AS a DM 63,83 | DM 63,83 |
| Innenkontur in Frontpolster einschleifen | Manuelle Tätigkeit | 4,0 AS a DM 63,83 | DM 255,32 |
| Aufreißen der Außenkontur für Frontpolster | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Außenkontur fräsen für Frontpolster | Maschinenfräsen | 1,0 AS a DM 63,83 | DM 63,83 |
| Frontpolster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Blockmaterial zurichten für Heckpolsterung | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,11 |
| Aufreißen der Außenkontur für Heckpolsterung | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Außenkontur fräsen für Heckpolsterung | Maschinenfräsen | 2,0 AS a DM 63,83 | DM 127,66 |
| Vorfräsen der Innenkontur für die obere Hälfte der Heckpolsterung | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Schleifen der Innenkontur für die obere Hälfte der Heckpolsterung | Maschinenfräsen | 2,0 AS a DM 63,83 | DM 127,66 |

| | | | |
|--|--------------------|-------------------|------------------|
| Obere Hälfte der Heckpolsterung finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,2 AS a DM 50,38 | DM 10,08 |
| Vorfräsen der Innenkontur für die untere Hälfte der Heckpolsterung | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Schleifen der Innenkontur für die untere Hälfte der Heckpolsterung | Maschinenfräsen | 2,0 AS a DM 63,83 | DM 127,66 |
| Untere Hälfte der Heckpolsterung finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,2 AS a DM 50,38 | DM 10,08 |
| Summen: | | 16,0 AS | DM 967,48 |

Das hier betrachtete Projekt zeichnet sich im wesentlichen durch seine Komplexität (3 Formteile) und die geometrische Gestalt des Produktes (Freiformflächen) aus. Wie bereits zuvor erwähnt, ist es auf traditionelle Weise (s. Tab. 54) nur sehr schwer möglich, Freiformflächen aus einem Rohblock herauszuarbeiten, da hier kaum gefräst werden kann, sondern vielmehr von Hand geschliffen werden muss. Dieser Prozess ist mit einem permanenten Wechsel zwischen Schleifen und Passformkontrolle am zu verpackenden Objekt verbunden. Aus diesem Grund ist der Prozess des Schleifens sowohl für das Frontpolster (4 AS) als auch für die Heckpolsterung (2 x 2 AS) mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden. Die Außenkontur der drei Formteile ist von verhältnismäßig trivialer Gestalt und lässt sich demzufolge relativ schnell aus dem Block herausarbeiten.

Tab. 55: *K1_{C,Neukonstruktion}: Erstbemusterung, computergestützt, Neukonstruktion*

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|---|-----------------------------|---------------------------|---------------|
| Produkt zur Digitalisierung vorbereiten | Manuelle Tätigkeit | 0,4 AS a DM 72,35 | DM 28,94 |
| Produkt 3D-digitalisieren | 3D-Scannen | 1,0 AS a DM 247,99 | DM 247,99 |

| | | | |
|---|---------------------|--------------------|--------------------|
| Flächen-/Volumenrückführung der Digitalisierdaten | Reverse-Engineering | 3,0 AS a DM 100,36 | DM 301,08 |
| Konstruktion Heckpolsterung | 3D-CAD | 2,0 AS a DM 91,79 | DM 183,58 |
| Konstruktion Frontpolsterung | 3D-CAD | 1,0 AS a DM 91,79 | DM 91,79 |
| NC-Programme erzeugen | CAM | 0,7 AS a DM 122,58 | DM 85,81 |
| Maschine einrichten | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Mustersatz Heckpolster fräsen | CNC-Fräsen | 4,0 AS a DM 18,95 | DM 75,80 |
| Muster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Maschine einrichten | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Muster Frontpolster fräsen | CNC-Fräsen | 3,0 AS a DM 18,95 | DM 56,85 |
| Muster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 72,35 | DM 21,71 |
| Summen: | | 16,9 AS | DM 1.202,09 |

Tab. 56: *K1_C,Anpassungskonstruktion: Erstbemusterung, computergestützt, Anpassungskonstruktion*

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungsgrundlage | Summe [DM] |
|---|--------------------------|----------------------|------------|
| Produkt zur Digitalisierung vorbereiten | Manuelle Tätigkeit | 0,4 AS a DM 72,35 | DM 28,94 |
| Produkt 3D-digitalisieren | 3D-Scannen | 1,0 AS a DM 247,99 | DM 247,99 |
| Flächen-/Volumenrückführung der Digitalisierdaten | Reverse-Engineering | 3,0 AS a DM 100,36 | DM 301,08 |
| Konstruktion Heckpolsterung | 3D-CAD | 0,7 AS a DM 91,79 | DM 64,26 |
| Konstruktion Frontpolsterung | 3D-CAD | 0,5 AS a DM 91,79 | DM 45,90 |
| NC-Programme erzeugen | CAM | 0,7 AS a DM 122,58 | DM 85,81 |
| Maschine einrichten | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |

| | | | |
|-------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| Mustersatz Heckpolster fräsen | CNC-Fräsen | 4,0 AS a DM 18,95 | DM 75,80 |
| Muster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Maschine einrichten | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Muster Frontpolster fräsen | CNC-Fräsen | 3,0 AS a DM 18,95 | DM 56,85 |
| Muster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 72,35 | DM 21,71 |
| Summen: | | 15,1 AS | DM 1.036,88 |

Der hier betrachtete Industriestaubsauger fällt zwar noch nicht in die Rubrik der kompliziertesten – was die Formgebung angeht – zu verpackenden Produkte. Durch den hohen Anteil an Freiformflächen ist hier aber dennoch der Einsatz aller technischen Möglichkeiten zur Flächen- bzw. Volumenrückführung in verwertbare 3D-CAD-Daten erforderlich. Allein die Digitalisierung und Aufbereitung der Daten des Produktes nimmt einen Kostenanteil (bezogen auf eine Neukonstruktion, s. Tab. 55) von nahezu 50 % der gesamten Erstbemusterung in Anspruch (Zeitanteil: 26 %).

Die Gesamtkosten der Erstbemusterung können auch durch die Vorteile einer Änderungskonstruktion (s. Tab. 56) nicht merklich verringert werden. Hier steigt der Kostenanteil, der zunächst allein auf das Produkt und nicht die Verpackung aufzuwenden ist, auf über 55 % (Zeitanteil: 29 %).

Betrachtet man die reinen Fräszeiten auf der CNC-Maschine, so ergibt sich bei der computergestützten Neukonstruktion ein Kostenanteil von gerade 11 % bei einem Zeitanteil von 41 % bezogen auf das Gesamtprojekt (Anpassungskonstruktion: 12,8 % Kostenanteil gegenüber 46 % Zeitanteil). Aufgrund der Größe der Formteile müssen zwei Rohblöcke eingesetzt werden, weshalb in der Kostenbetrachtung zweimaliges Einrichten, Fräsen und Finishen berücksichtigt wird. Die Zeit für die Konstruktion der Heckpolsterung ist relativ gering in Anbetracht des Umstandes, dass diese aus zwei Elementen besteht. Dieses resultiert jedoch aus der Tatsache, dass diese beiden Bauteile besonders einfach aus einer Polsterschale erzeugt wurden (s. Abb. 89).

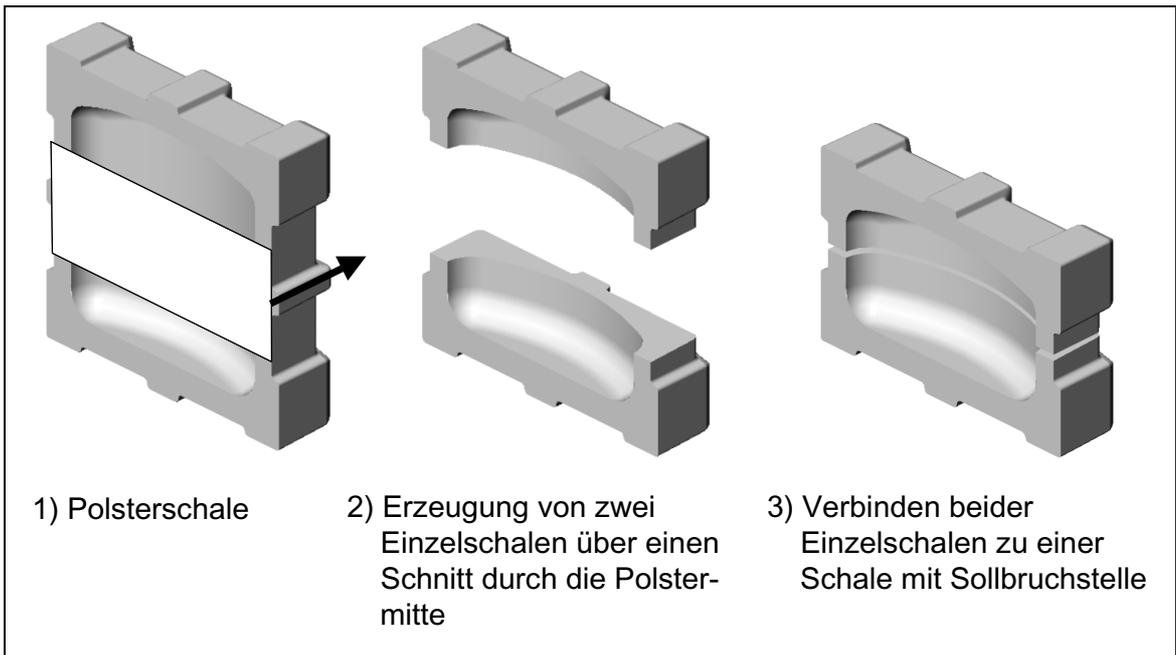


Abb. 89: Konstruktion der Heckpolsterung

Kostenblock K2:

Tab. 57: $K2_T$: Handmuster anfertigen, traditionell

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 15 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|--|-----------------------------|---------------------------|---------------|
| Blockmaterial zurichten für Frontpolster | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Aufreißen der Innenkontur für Frontpolster | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,11 |
| Innenkontur in Frontpolster vorfräsen | Maschinenfräsen | 1,0 AS a DM 63,83 | DM 63,83 |
| Innenkontur in Frontpolster einschleifen | Manuelle Tätigkeit | 3,5 AS a DM 63,83 | DM 223,41 |
| Aufreißen der Außenkontur für Frontpolster | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Außenkontur fräsen für Frontpolster | Maschinenfräsen | 1,0 AS a DM 63,83 | DM 63,83 |
| Frontpolster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |

| | | | |
|--|--------------------|-------------------|------------------|
| Blockmaterial zureichten für Heckpolsterung | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,11 |
| Aufreißen der Außenkontur für Heckpolsterung | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Außenkontur fräsen für Heckpolsterung | Maschinenfräsen | 1,5 AS a DM 63,83 | DM 95,75 |
| Vorfräsen der Innenkontur für die obere Hälfte der Heckpolsterung | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Schleifen der Innenkontur für die obere Hälfte der Heckpolsterung | Maschinenfräsen | 1,5 AS a DM 63,83 | DM 95,75 |
| Obere Hälfte der Heckpolsterung finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,2 AS a DM 50,38 | DM 10,08 |
| Vorfräsen der Innenkontur für die untere Hälfte der Heckpolsterung | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Schleifen der Innenkontur für die untere Hälfte der Heckpolsterung | Maschinenfräsen | 1,5 AS a DM 63,83 | DM 95,75 |
| Untere Hälfte der Heckpolsterung finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,2 AS a DM 50,38 | DM 10,08 |
| Summen: | | 16,0 AS | DM 839,84 |

Tab. 58: $K2_{C,Handmuster}$: Handmuster CNC-Fräsen, computergestützt

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungsgrundlage | Summe [DM] |
|-------------------------------|--------------------------|----------------------|------------|
| Maschine einrichten | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Mustersatz Heckpolster fräsen | CNC-Fräsen | 4,0 AS a DM 18,95 | DM 75,80 |
| Muster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Maschine einrichten | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |

| | | | |
|----------------------------|--------------------|-------------------|------------------|
| Muster Frontpolster fräsen | CNC-Fräsen | 3,0 AS a DM 18,95 | DM 56,85 |
| Muster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 72,35 | DM 21,71 |
| Summen: | | 8,8 AS | DM 262,90 |

Tab. 59: $K2_{C,CAD}$: 3D-CAD-Datensatz überspielen, computergestützt

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|
| Summen: | | 0,0 AS | DM 0,00 |

Wie bei den zuvor betrachteten Projekten ist der Kostenanteil für die Anfertigung eines zweiten identischen Mustersatzes bei der computergestützten Vorgehensweise mit DM 262,90 (s. Tab. 58) deutlich geringer, als bei der traditionellen mit DM 839,84 (s. Tab. 57). Bei der traditionellen Vorgehensweise sind dieselben Arbeitsschritte durchzuführen, wie bei einer Erstbemusterung. Kostenmindernd wirken sich höchstens Lern- und Routineeffekte aus, die zu einer kürzeren Bearbeitungszeit führen. Bei der computergestützten Vorgehensweise wird die Hauptarbeit durch kostengünstige Maschinen automatisch durchgeführt.

Kostenblock K3:

Tab. 60: $K3_T$: Zweitbemusterung, traditionell

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 15 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|--|-----------------------------|---------------------------|---------------|
| Blockmaterial zurichten für Frontpolster | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Aufreißen der Innenkontur für Frontpolster | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,11 |
| Innenkontur in Frontpolster vorfräsen | Maschinenfräsen | 1,0 AS a DM 63,83 | DM 63,83 |

Wirtschaftlichkeitsrechnung

| | | | |
|--|--------------------|-------------------|------------------|
| Innenkontur in Frontpolster einschleifen | Manuelle Tätigkeit | 4,0 AS a DM 63,83 | DM 255,32 |
| Aufreißen der Außenkontur für Frontpolster | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Außenkontur fräsen für Frontpolster | Maschinenfräsen | 1,0 AS a DM 63,83 | DM 63,83 |
| Frontpolster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Blockmaterial zurichten für Heckpolsterung | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 50,38 | DM 15,11 |
| Aufreißen der Außenkontur für Heckpolsterung | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Außenkontur fräsen für Heckpolsterung | Maschinenfräsen | 2,0 AS a DM 63,83 | DM 127,66 |
| Vorfräsen der Innenkontur für die obere Hälfte der Heckpolsterung | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Schleifen der Innenkontur für die obere Hälfte der Heckpolsterung | Maschinenfräsen | 2,0 AS a DM 63,83 | DM 127,66 |
| Obere Hälfte der Heckpolsterung finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,2 AS a DM 50,38 | DM 10,08 |
| Vorfräsen der Innenkontur für die untere Hälfte der Heckpolsterung | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 50,38 | DM 25,19 |
| Schleifen der Innenkontur für die untere Hälfte der Heckpolsterung | Maschinenfräsen | 2,0 AS a DM 63,83 | DM 127,66 |
| Untere Hälfte der Heckpolsterung finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,2 AS a DM 50,38 | DM 10,08 |
| Summen: | | 16,0 AS | DM 967,48 |

Tab. 61: K3_C: Zweitbemusterung, computergestützt

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|--|-----------------------------|---------------------------|------------------|
| Änderung an den Polster- konstruktionen | 3D-CAD | 1,0 AS a DM 91,79 | DM 91,79 |
| NC-Programme erzeugen | CAM | 0,7 AS a DM 122,58 | DM 85,81 |
| Maschine einrichten | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Mustersatz Heckpolster fräsen | CNC-Fräsen | 4,0 AS a DM 18,95 | DM 75,80 |
| Muster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Maschine einrichten | Manuelle Tätigkeit | 0,5 AS a DM 72,35 | DM 36,18 |
| Muster Frontpolster fräsen | CNC-Fräsen | 3,0 AS a DM 18,95 | DM 56,85 |
| Muster finishen | Manuelle Tätigkeit | 0,3 AS a DM 72,35 | DM 21,71 |
| Summen: | | 10,5 AS | DM 440,50 |

Die Durchführung einer Änderung an einem Handmustersatz ist bei der traditionellen Vorgehensweise (s. Tab. 60) mit einer Erstbemusterung vergleichbar, da dieselben Arbeitsschritte durchzuführen sind. Zeitersparnisse können bestenfalls durch Routineeffekte erzielt werden.

Bei der computergestützten Vorgehensweise (s. Tab. 61) werden die Änderungen zunächst am 3D-CAD-Datensatz durchgeführt. Da dieser parametrisch aufgebaut ist, so dass Änderungen nahezu auf Knopfdruck durchgeführt werden können, kann ein entsprechend geringer Zeitanteil für die Änderungskonstruktion angesetzt werden. Alle weiteren Arbeitsschritte von der NC-Programm-Erstellung bis zur manuellen Glättung des Handmusters nach dem Fräsen sind mit einer Erstbemusterung identisch.

Dementsprechend ist die computergestützte Vorgehensweise bei diesem Arbeitsschritt erneut kostengünstiger (DM 967,48_T gegenüber DM 440,50_C).

Kostenblock K4:

Tab. 62: K4₇: Dokumentationszeichnung anfertigen, traditionell

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 15 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|---|-----------------------------|---------------------------|------------------|
| Zeichnung anfertigen für Frontpolster (3-Tafel-Projektion inkl. Bemaßungen) | Manuelle Tätigkeit | 4,0 AS a DM 50,38 | DM 201,52 |
| Zeichnung anfertigen für Heckpolsterung (3-Tafel-Projektion inkl. Bemaßungen) | Manuelle Tätigkeit | 5,5 AS a DM 50,38 | DM 277,09 |
| Summen: | | 9,5 AS | DM 478,61 |

Tab. 63: K4_C: Dokumentationszeichnung anfertigen, computergestützt

| Tätigkeitsbeschreibung | Arbeitsgang gem. Tab. 19 | Berechnungs- grundlage | Summe [DM] |
|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------|
| Zeichnung aus 3D-CAD-Daten ableiten | 3D-CAD | 0,3 AS a DM 91,79 | DM 27,54 |
| Summen: | | 0,3 AS | DM 27,54 |

Die Erstellung einer Dokumentationszeichnung ist im Rahmen einer durchgehend computergestützten Entwicklungskette erneut ein „Abfallprodukt“ des Konstruktionsprozesses und ist kostenmäßig entsprechend gering anzusetzen (vgl. Tab. 62 und Tab. 63).

Fazit:

Tab. 64: Fazit für Pilotprojekt „Staubsauger“

| Kostenblock | Kosten der traditionelle Vorgehensweise | Kosten der computergestützten Vorgehensweise |
|-------------|---|--|
| K1 | DM 967,48 | DM 1.202,09 bzw. DM 1.036,88 |
| K2 | DM 839,84 | DM 262,90 bzw. DM 0,00 |
| K3 | DM 967,48 | DM 440,50 |
| K4 | DM 478,61 | DM 27,54 |

Diese Projekt zeigt deutlich, dass zwar die Erstbemusterung auf traditionelle Art selbst bei Objekten mit hohem Freiformflächenanteil kostengünstiger durchzuführen ist (s. Tab. 64, K1), auch wenn der Vorteil gegenüber der computergestützten Vorgehensweise nicht mehr besonders gross ist, wenn eine bereits zuvor konstruierte Variante wiederverwendet werden kann (DM 967,48_T gegenüber DM 1.036,88_C). Sobald jedoch mehr als ein Mustersatz angefertigt werden muss, sei es, dass der Werkzeugbauer einen neuen Mustersatz benötigt (s. Tab. 64, K2) oder Änderungen vom Kunden gewünscht werden (s. Tab. 64, K3), rentiert sich der mit dem Reverse-Engineering-Prozess verbundene hohe Aufwand (48 % der Gesamtkosten K1).

6.2.4. Erweiterungen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Bei der hier eingesetzten Kostenvergleichsrechnung können nur die negativen Erfolgskomponenten in Form der Kosten untersucht bzw. verglichen werden. Zudem wird davon ausgegangen, dass das betrachtete Ergebnis bzw. Resultat der hier untersuchten Alternativen stets dasselbe ist. Unter diesen Einschränkungen wurden die zuvor vorgestellten Pilotprojekte bewertet.

Beide Einschränkungen führen jedoch dazu, dass die Bewertung beider Alternativen (traditionell vs. computergestützt) nicht vollständig ist. Dieses hat sich insbesondere in der betrieblichen Praxis gezeigt.

Die erste wesentliche Bedingung – die Vergleichbarkeit des Ergebnisses, hier in Form von Mustern für Verpackungsformteile – ist oft nicht realistisch.

Zum einen ist ein maschinengefertigtes Handmuster eine exakte und insbesondere reproduzierbare Umsetzung eines eindeutigen 3D-CAD-Datensatzes. Das heißt, dass ein zweiter Handmustersatz – aus welchem Grunde auch immer er angefertigt werden muss – stets maßlich identisch ist mit allen zuvor erstellten Mustern; er ist reproduzierbar. Dieser Umstand ist bei Handmustern nicht gegeben. Enthält ein Handmuster Freiformflächen, ist es von Hand nur sehr schwer möglich, eine Kopie hiervon in gleicher Qualität herzustellen. In der Praxis ist es häufig vorgekommen, dass der Sitz und das Spiel eines Produktes im Polster separat zu den Dämpfungseigenschaften des Polsters beurteilt wurde. Dieses lässt sich in einer vermeintlich identischen Kopie von Hand nicht wieder herstellen.

Ein weiterer Faktor ist die „Passform“ eines Polsters. Können bei der computergestützten Vorgehensweise Freiformverläufe eines Produktes exakt auf das Polster übertragen werden, so ist dieses auf traditionelle Art nur grob näherungsweise möglich. Dieses kann durchaus Einfluss auf die Funktionseigenschaften eines Polsters haben. Je besser die Flächen übereinstimmen, um so größer ist die Auflagefläche des Produktes im Polster. Manuell lassen sich nur punktuelle Auflagen erstellen. Das kann bei Belastungen durch Fallvorgänge dazu führen, dass die Kräfte bei einem computergestützt entwickelten Verpackungspolster nicht punktuell, sondern flächiger auf das Produkt übertragen werden. Es entstehen weniger Belastungsspitzen am Produkt.

Des weiteren ist in der Praxis zu beobachten, dass durch den Einsatz der computergestützten Kette „Begehrlichkeiten“ bei den Kunden der Unternehmen geweckt werden, welche diese Entwicklungskette in die Praxis umgesetzt haben. Das bedeutet, dass Serviceleistungen durch neue technische Möglichkeiten, die zuvor nicht vorhanden waren, gerne in Anspruch genommen werden, auch wenn zuvor – zwangsweise – darauf verzichtet werden konnte. Zu diesem Service gehört beispielsweise, dass ohne Mehrkosten eine Dokumentationszeichnung angefertigt werden kann. Hierzu gehört auch, dass der Verpackungshersteller den 3D-CAD-Datensatz zur Verfügung stellen kann, so

dass dieser vom Anwender der Verpackung zu Dokumentationszwecken in sein CAD-System übernommen werden kann.

Beim Pilotunternehmen SiBO-Verpackungen, Olpe, bei dem die durchgehend computergestützte Entwicklungskette in die Praxis umgesetzt wurde, steht zudem eine Falltestanlage inklusive Messwerterfassung zur Verfügung, so dass entwickelte Muster direkt im Falltest überprüft werden können. Die Praxis hat gezeigt, dass die Möglichkeit zur Optimierung von Verpackungen von Herstellern der zu verpackenden Produkte immer häufiger in Anspruch genommen wird, was zur Senkung von Transportschäden beiträgt.

Eine weitere Anforderung, die immer häufiger an einen Verpackungshersteller herangetragen wird, ist die Möglichkeit, Verpackungen allein anhand von CAD-Datensätzen der zu verpackenden Produkte zu entwickeln. In diesem Fall verliert der 3D-Scanner zwar seine Bedeutung, aber ohne eine computergestützte Kette wäre diese Anforderung nicht zu erfüllen.

Zudem trägt eine durchgehend computergestützte Kette wesentlich zur Reduktion von Durchlaufzeiten eines Projektes bei. Dadurch, dass wesentliche Bemusterungsschritte durch eine Maschine ausgeführt werden, werden nicht unnötig Personalkapazitäten gebunden. Entsprechend sinken die Reaktionszeiten. Dadurch, dass ein CAD-Datensatz des Verpackungspolsters zur Verfügung steht, kann die gesamte Prozesskette bis hin zum Serienwerkzeug optimiert werden. Dieser Schritt wurde bisher noch nicht vollzogen. Es deutet sich jedoch an, dass hier Möglichkeiten bestehen, die Kosten für Schäumwerkzeuge deutlich zu senken, was zu einer Verschiebung der Stückzahlen nach unten führt, ab wann ein Schaumstoffpolster kostengünstiger ist, als andere Alternativlösungen für eine Verpackung.

In Ergänzung zu diesen Punkten ergeben sich zusätzliche Möglichkeiten allein durch die Nutzbarkeit einer solchen durchgehend computergestützten Entwicklungskette, die weit über die Entwicklung von Verpackungspolstern hinausgehen. Ein Beispiel hierfür ist die Entwicklung von Ladungsträgern aus Schaumstoff (EPS, EPP, PPM etc.). Diese Objekte (s. Abb. 90) – meistens in den Stellflächen einer Voll-, Halb- oder Viertelpalette (Verpackungsmodul, vgl.

DIN 55 510 /Din82c/) – haben zwar nicht die primäre Aufgabe in der Dämpfung mechanischer Belastungen, werden aber von denselben Anwendern benötigt, die auch Verpackungspolster einsetzen und werden auf dieselbe Weise entwickelt wie Polsterformteile.

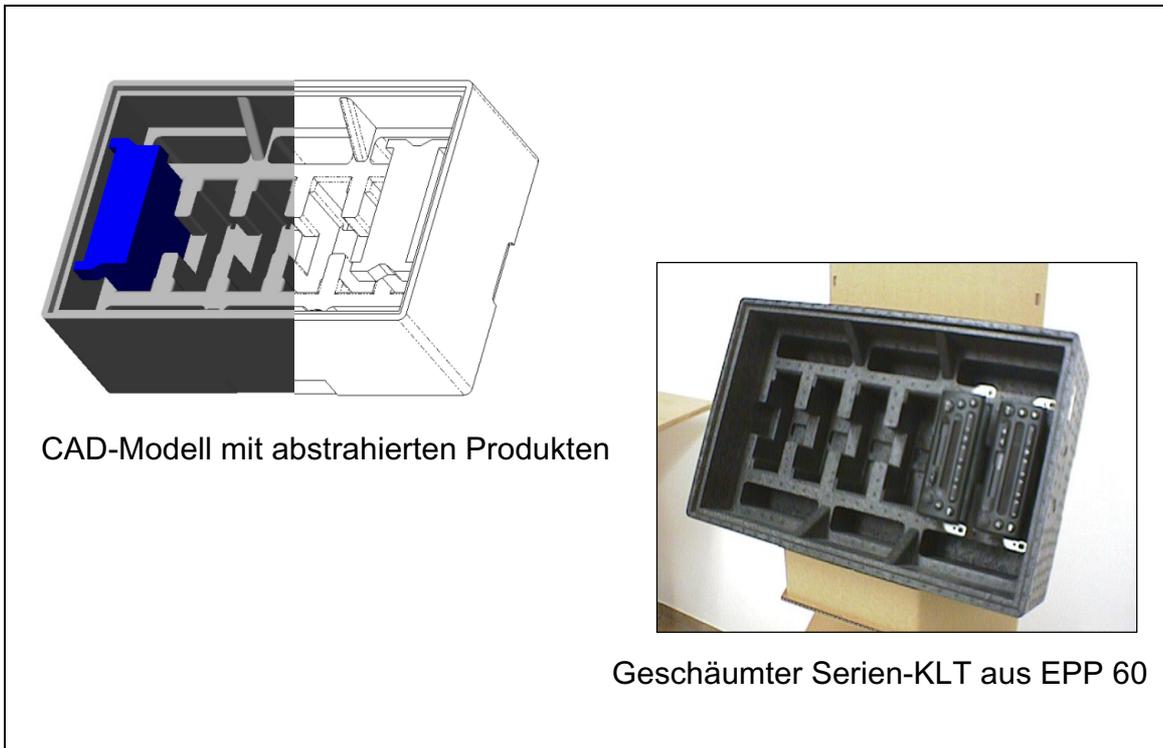


Abb. 90: Beispiele für Ladungsträger aus Schaumstoff

Die Anforderungen dieser Anwender bestehen meistens darin, dass eine möglichst große Anzahl eines bestimmten Produktes in einem Ladungsträger transportiert werden soll, wobei die Außenabmessungen des Ladungsträgers in der Regel vorgegeben werden. Das sich daraus ergebende wesentliche konstruktive Merkmal ist, dass – vereinfacht ausgedrückt – mehrere identische Formnester in einem Block optimal anzuordnen sind.

Die erste Herausforderung besteht in der Entwicklung eines Formnestes – eine Aufgabenstellung, die von der Entwicklung von Verpackungspolstern her bekannt ist –, so dass hierzu dieselben Techniken, ob traditionell oder computergestützt, eingesetzt werden können. Diese Aufgabe wird in den meisten Fällen dadurch erschwert, dass ein Ladungsträger nicht nur für ein einziges Produkt

entwickelt werden soll, sondern direkt für eine Produktfamilie, die sich in wenigen konstruktiven Details unterscheidet (s. Abb. 91). Variante 1 hat einen breiten Einbaurahmen, Variante 2 einen Winkel, Variante 3 hat 2 Winkel und Variante 4 hat keinen Einbaurahmen.

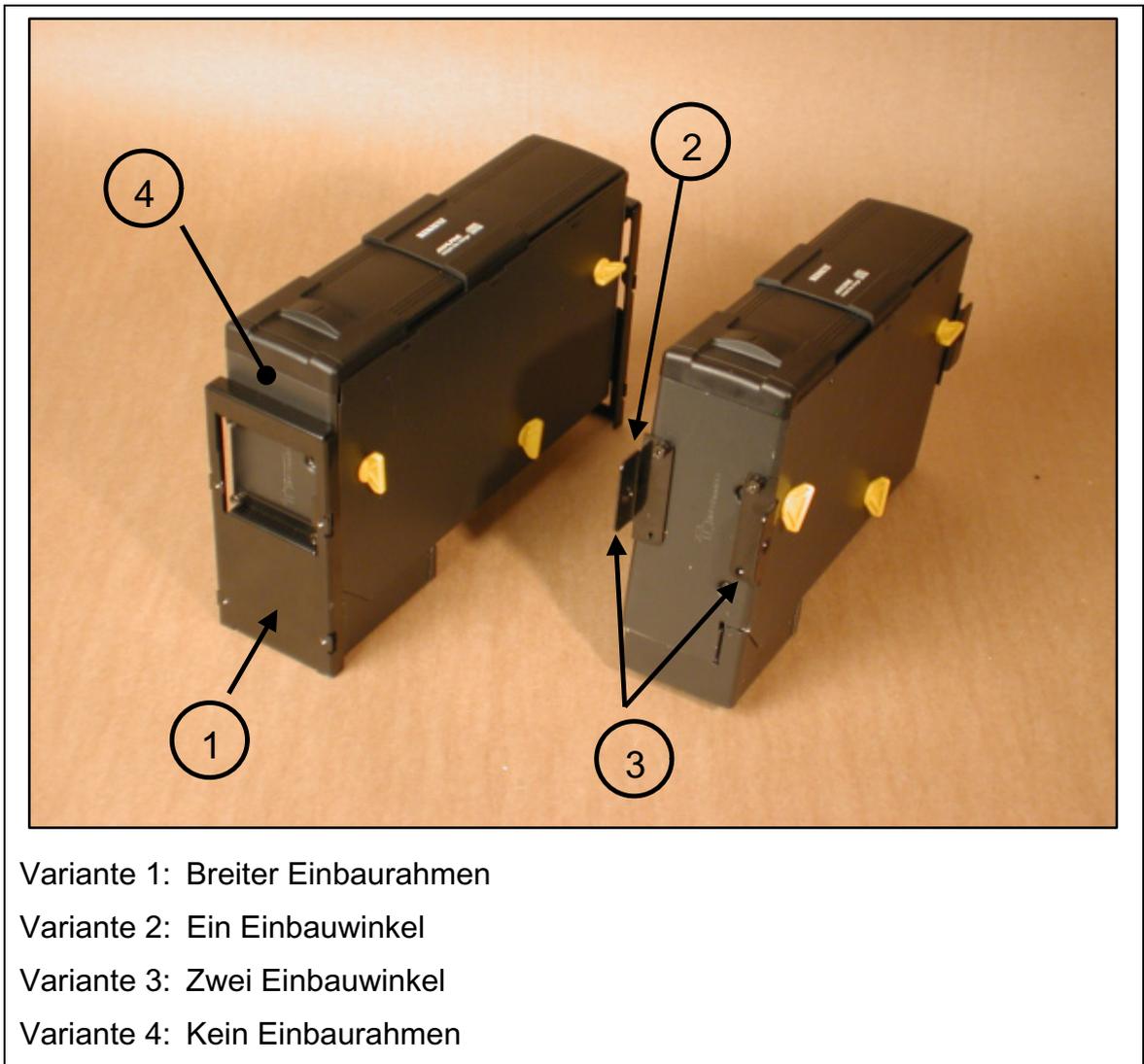


Abb. 91: CD-Wechsler

Ist dieser Teil der Entwicklung gelöst, muss dieses Formnest optimal auf einer Fläche angeordnet werden.

Wird dieser Ladungsträger durch traditionelle Vorgehensweise entwickelt, muss bereits so viel Zeit in die Erstellung dieses einen Formnestes investiert werden, dass es in der Regel bei diesem einen Formnest bleibt oder einem zweiten, um

mögliche Kollisionen erkennen zu können. Da dieses der traditionelle Weg ist, wird dieses vom Anwender in den meisten Fällen akzeptiert.

Wird eine computergestützte Vorgehensweise eingesetzt, kann ein einmal entwickeltes Formnest beliebig oft kopiert und im Ladungsträger angeordnet werden. Der computergestützte Mehraufwand hierfür fällt nicht ins Gewicht. Da das Fräsen des Musters von einer Maschine selbständig durchgeführt wird, ist es lediglich eine Frage des zeitlichen Mehraufwandes, wobei sich in der Praxis deutlich gezeigt hat, dass diese Möglichkeiten vom Anwender sehr begrüßt werden. Hierdurch kann also ein zusätzlicher Service geboten werden, der keine wesentlichen Mehrkosten verursacht.

Im Rahmen der Entwicklung von Ladungsträgern ergeben sich aber noch weitere Möglichkeiten. Es besteht die Möglichkeit, zunächst im CAD-System die Produkte virtuell anzuordnen, wie es im Ladungsträger geschehen soll. Hierdurch können bereits am Bildschirm Kollisionskontrollen durchgeführt werden, die oftmals erst an einem fertig entwickelten Muster festgestellt werden können. Zudem bestehen wesentlich mehr Möglichkeiten, eine optimale Vernutzung der Formnester zunächst am Bildschirm zu simulieren, so dass sichergestellt ist, dass das anschließend gefräste Muster fehlerfrei ist.

Bei der Entwicklung von Ladungsträgern wird von Anwenderseite häufig der Wunsch geäußert, mehrere Muster zu erhalten, um eine komplette Ladeinheit zusammenstellen zu können. In den meisten Fällen sollen mit dieser Ladeinheit Transportversuche bzw. Transportsimulationen durchgeführt werden.

Die Herstellung von Kleinserien ist bei der traditionellen Vorgehensweise aus zeitlichen Gründen (und damit aus Kostengründen) nahezu undenkbar; die anfallenden Maschinenkosten im Rahmen einer computergestützten Vorgehensweise werden vom Auftraggeber für die Verpackungsentwicklung jedoch akzeptiert, um überhaupt die Möglichkeit zur Simulation nutzen zu können.

Ein ähnlicher Effekt ist bei der Entwicklung von Tiefzieheinlagen oder tiefgezogenen Ladungsträgern zu beobachten. Zwar können hier keine materialverbindlichen Muster angefertigt werden; die Anordnung und Passform der Formnester kann jedoch überprüft werden. Zudem können die einmal erstellten

Daten auch hier für die Erstellung von Tiefzieh-Serienwerkzeugen genutzt werden.

Ein weiterer Aspekt, der beobachtet werden kann, ist der, dass sich aufgrund des Vorhandenseins einer solchen durchgehend computergestützten Entwicklungskette inklusive 3D-Digitalisierung und Reverse-Engineering-Möglichkeiten neue Geschäftsfelder für diejenigen Unternehmen eröffnen, die eine wie in dieser Arbeit beschriebene computergestützte Entwicklungskette umsetzen. Es muss bedacht werden, dass das Thema Reverse-Engineering zwar im Markt nicht unbekannt ist, diese Techniken jedoch kaum verbreitet sind. Allein die Anschaffungskosten für einen 3D-Scanner sind so hoch, dass sich selbst die prädestiniertesten Nutzer wie Modellbauer etc. nicht mit dieser Technik beschäftigen können, von den Folgekosten für die notwendigen Softwarepakete einmal abgesehen. Für die geringe Verbreitung dieser Technik spricht allein die Tatsache, dass das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Sensorsystem weltweit erst 150 mal im Einsatz ist, obwohl es sich um ein führendes System handelt.

Im Rahmen der Umsetzung der Ergebnisse dieser Arbeit beim industriellen Kooperationspartner SiBO-Verpackungen, Olpe, in die betriebliche Praxis, wurde beobachtet, dass an das Unternehmen Problemstellungen bzgl. einer weitergehenden Nutzung dieser Techniken herangetragen wurden, die mit einer Verpackungsentwicklung zum Teil nur noch sehr wenig gemeinsam hatten. Beispielsweise wurden bei SiBO-Verpackungen von mehreren Tonmodellen von Erdbohrern 3D-CAD-Daten entwickelt. Oder es wurde ein PET-Behälter inklusive dreiteiligem Blasformwerkzeug komplett auf Basis einer Kerze als Formvorlage entwickelt.

Im Rahmen der Entwicklung von Verpackungslösungen ist es oftmals notwendig, einen „Form-Dummy“ des zu verpackenden Produktes anzufertigen. Dieses ist dann vorteilhaft, wenn dem Verpackungsentwickler das zu verpackende Produkt nicht während der gesamten Entwicklungszeit für die Verpackung zur Verfügung steht. Oftmals ist dieses bei Produkt-Prototypen der Fall oder bei

Produkten, die der Geheimhaltung unterliegen. Ein „Form-Dummy“ als Kopie der Außenform des zu verpackenden Produktes erleichtert die Passformkontrolle der Verpackung wesentlich.

Ebenso kann die im Rahmen dieser Arbeit in die Praxis umgesetzte computergestützte Entwicklungskette auch für die Entwicklung von komplexen Wellpappeverpackungen eingesetzt werden. Hier besteht oftmals die Problemstellung, komplizierte Durchdringungen von Produkten mit dreidimensionalen Wellpappe-Konstruktionen zu erzeugen. Da durch digitalisierte Punktwolken eines Produktes auch Schnitte gelegt werden können, ist die Übernahme dieser Schnittdaten in die Wellpappe-Stanzkonturen ohne weiteres möglich. Hierdurch ergeben sich nicht nur deutliche Zeitersparnisse; vielmehr eröffnen sich hierdurch ganz neue Wege, Wellpappeverpackungen zu entwickeln bis hin zu komplett neuen Verpackungskonzepten.

Die zuvor beschriebenen sich ergebenden Möglichkeiten durch den Einsatz einer durchgehend computergestützten Kette beziehen sich alle auf zusätzliche technische Möglichkeiten, wobei sich zum jetzigen Zeitpunkt die Auswirkungen – auch monetär – noch nicht abschätzen lassen. Es muss jedoch ein weiterer Effekt berücksichtigt werden, dessen Tragweite derzeit noch weniger abzuschätzen ist. Hierunter sind alle Effekte zu verstehen, die zum „Image“ eines Unternehmens zu zählen sind. Es treten Effekte auf, dass die Verpackung – ein Wegwerfprodukt – auch vom Hersteller des zu verpackenden Produktes unter technischen Gesichtspunkten gesehen wird. Gerade bei großen Unternehmen beschäftigen sich zunächst technische Mitarbeiter mit der Funktionserfüllung einer Verpackung, der Einkauf wird anschließend eingeschaltet. Hierdurch werden die Verpackung und die Verpackungsentwicklung zum Teil so weit aufgewertet, dass nunmehr die technischen Anforderungen und nicht der Preis im Vordergrund stehen. Es ist zu beobachten, dass der Verpackungsentwickler als technisch kompetenter Partner anerkannt wird und nicht als Massenlieferant für ein „notwendiges Übel“. Die Effekte reichen so weit, dass Weiterempfehlungen

von überzeugten Verpackungsanwendern an deren Zulieferanten oder Partnerunternehmen ausgesprochen werden.

6.3. Fazit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Im Rahmen der Kostenvergleichsrechnung wird deutlich, dass eine durchgehend computergestützte Entwicklungskette nicht ausnahmslos gegen eine traditionelle Vorgehensweise konkurrieren kann. Insbesondere dann, wenn aufgrund der Formgebung des zu verpackenden Produktes der Einsatz der gesamten Bandbreite der Reverse-Engineering-Kette (3D-Scanner und Reverse-Engineering-Software) eingesetzt werden muss, werden hohe Anfangskosten erzeugt. Diese rechnen sich erst dann, wenn es sich um komplizierte oder aufwendige Entwicklungsprojekte handelt, bei denen an den Verpackungshersteller hohe Ansprüche in Bezug auf die Funktionserfüllung gestellt werden, so dass ggf. Falltests mit Änderungskonstruktionen und Neubemusterungen durchgeführt werden müssen. Aufgrund der traditionellen Vorgehensweise ist die Mehrheit der Projekte jedoch von einfacher Natur, d. h. es wird in den meisten Fällen kein Falltest verlangt. Werden Falltest durchgeführt, so geschieht das in der Regel einmal; auf iterative Prozesse zur Optimierung einer Verpackungskonstruktion wird dann verzichtet. Es hat sich aber auch gezeigt, dass – wenn durch das Vorhandensein einer durchgehend computergestützten Kette und der zugehörigen digitalen Hinterlegung der Verpackungskonstruktionen eine Änderung und Neubemusterung schnell und kostengünstig durchführbar ist – „einfache“ Projekte durch iterative Optimierungsschritte zu „aufwendigen“ Projekten ausgeweitet werden.

Würde nun die Empfehlung ausgesprochen werden, auf die Techniken der 3D-Digitalisierung und des Reverse-Engineerings zu verzichten, da diese die größten Kostenverursacher sind, wäre aber auch der verbleibende Rest der Kette nicht mehr sinnvoll einzusetzen.

Im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dürfen jedoch nicht nur die Kosten betrachtet werden. Vielmehr müssten alle in Kap. 6.2.4 angesprochenen Punkte in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einbezogen werden. Dieses kann jedoch nicht durch eine Kostenvergleichsrechnung allein erfüllt werden. Hier

müsste eine Gewinnvergleichsrechnung hinzugezogen werden. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt lassen sich diese Effekte jedoch nicht monetär bewerten.

Im Zuge der weiteren Umsetzung der Ergebnisse dieser Arbeit in die betriebliche Praxis müssen weitere Erfahrungen der beteiligten Unternehmen und insbesondere der Pilotunternehmen gesammelt werden. Demnach werden sich Ergebnisse einer erweiterten betriebswirtschaftlichen Bewertung erst im Rahmen weiterer Umsetzungserfahrungen bei den beteiligten Pilotunternehmen zeigen.

7. Zusammenfassung

Als Ergebnis dieser Arbeit stehen Erkenntnisse über Möglichkeiten zur Realisierung einer durchgehend computergestützten Entwicklungskette für Verpackungspolster und Formteile aus Schaumstoffen wie Polystyrol oder Polypropylen zur Verfügung. Erstmals wurde eine gänzlich andersartige Entwicklungs-Prozesskette für Verpackungsformteile aus Schaumstoff betrachtet, als sie bisher in der Praxis eingesetzt wird. Statt der bisher ausschließlich manuellen, wurde eine computergestützte Prozesskette realisiert, welche auf der Basis einer Konstruktion von Verpackungspolster-Rohformen im 3D-CAD-System basiert, sich der Technik des Reverse-Engineering für die Rückführung von real existierenden Produkten in verwertbare 3D-CAD-Daten bedient und schließlich mit Hilfe der Technik des CNC-FräSENS Prototypen des Verpackungsformteils realisiert. Neben den technischen Herausforderungen, die erstmalig in einer Prozesskette für die Verpackungstechnik gelöst wurden, stehen zudem Untersuchungsergebnisse bzgl. der Wirtschaftlichkeit einer solchen Prozesskette gegenüber der traditionell manuell geprägten Entwicklung zur Verfügung.

Zunächst wurde der Stand der Technik für die Verwendung von Polstermitteln in der Verpackung näher betrachtet. Neben der Kenntnis über die generelle Funktion von Verpackungspolstern und die etablierte Prozesskette zur Entwicklung und Serienproduktion derartiger Formteile aus Schaumstoff ist die Kenntnis über die durch Transport, Umschlag und Lagerung auf die Verpackung einwirkenden Belastungen von großer Bedeutung. Hieraus müssen die Grundlagen für eine praxisgerechte Dimensionierung auch komplexester Formteile erarbeitet werden.

Zudem wurde der Stand der Technik für die Techniken des Reverse-Engineering bzw. der Flächenrückführung herausgearbeitet, wobei zum einen ein Überblick über die Funktionsweisen von Sensorsystemen zur 3D-Digitalisierung gegeben und zum anderen die gängigen Methoden zur Aufbereitung der Daten eines 3D-Digitalisierungsprozesses bis hin zu verwertbaren 3D-CAD-Daten erläutert wurden.

Auf der Grundlage des aktuellen Standes der Technik wurden Verfahren zur Automatisierung der Konstruktion von Verpackungsformteilen mit Hilfe eines 3D-CAD-Systems vorgestellt. Hierbei wurde zum einen eine Bibliothek vollständiger Verpackungspolsterkonstruktionen als parametrische Varianten erstellt, die vom Anwender aufgerufen und an die jeweilige Aufgabenstellung neu angepasst werden können. Zum anderen wurde eine Bibliothek mit typischen Formelementen von Verpackungspolstern umgesetzt, aus denen eine komplexe Verpackungspolsterkonstruktion schnell zusammengesetzt werden kann.

Anschließend wurde untersucht, wie mit Hilfe der Technik des Reverse-Engineering Formnester – also die negative Abformung der Produktaußenkontur im Verpackungspolster – digital erzeugt werden können. Hierzu wurden zunächst die Anforderungen von Seiten der Verpackungstechnik an eine Reverse-Engineering-Prozesskette formuliert. Auf dieser Basis war es in einem nächsten Schritt möglich, ein für die Verpackungstechnik geeignetes 3D-Sensorsystem auszuwählen. Nachfolgend wurden verschiedene Verfahren zur Aufbereitung der Daten einer 3D-Digitalisierung bis hin zu verwertbaren 3D-CAD-Daten vorgestellt.

Als Ergebnis dieser Untersuchungen kann festgehalten werden, dass es technisch möglich ist, eine durchgehend computergestützte Prozesskette für die Entwicklung von Verpackungspolstern unter Beachtung verpackungstechnischer Rahmenbedingungen aufzubauen. Dieses ist jedoch mit hohen Investitionskosten verbunden, so dass jeweils eine Betrachtung dieser Prozesskette unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten durchgeführt werden sollte. Hierzu wurde für ausgewählte Anwendungsbeispiele das Verfahren der Kostenvergleichsrechnung herangezogen. Nach Ermittlung der relevanten Kostenarten konnten sowohl für die traditionelle Vorgehensweise zur Entwicklung von Verpackungspolstern wie auch für die durchgehend computergestützte Vorgehensweise Arbeitsgänge definiert werden, die in Form von anzusetzenden Stundensätzen monetär zu bewerten sind. Anhand der jeweiligen Pilotan-

wendungen konnte der Entwicklungsaufwand anschließend praxisnah anhand der durchgeführten Arbeitsgänge monetär bewertet werden.

Es kann hierbei festgehalten werden, dass die durchgehend computergestützte Entwicklungskette oftmals nicht kostengünstiger eingesetzt werden kann als die traditionelle. Kostengünstiger ist die computergestützte Vorgehensweise hauptsächlich bei komplexen Entwicklungsprojekten, bei denen mehr als ein Handmustersatz angefertigt werden muss. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn aufwendige Falltests durchgeführt werden und eine Polsterentwicklung iterativ optimiert wird.

Insbesondere der Reverse-Engineering-Prozess innerhalb der computergestützten Kette ist unter Kostengesichtspunkten kritisch zu betrachten, da hierbei oftmals schon mehr als 50 % der Entwicklungskosten entstehen. Insbesondere das 3D-Sensorsystem verursacht aufgrund der hohen Anschaffungskosten und der verhältnismäßig geringen Nutzungsdauer einen sehr hohen Kostenanteil. Dennoch ist es nicht möglich, auf dieses technische Gerät zu verzichten, da sonst die Leistungsfähigkeit der gesamten computergestützten Prozesskette in Frage gestellt werden muss.

Neben den anfallenden Kosten hat sich im Rahmen der praktischen Umsetzung der gesamten Kette jedoch deutlich gezeigt, dass ein hoher Zusatznutzen für die Unternehmen entsteht, welche eine derartige technische Kompetenz aufweisen können. Diese Vorteile lassen sich jedoch durch eine Kostenvergleichsrechnung nicht erfassen; hierzu wäre die Durchführung einer Gewinnvergleichsrechnung erforderlich.

Somit bleibt festzuhalten, dass eine durchgehend computergestützte Prozesskette zur Entwicklung von Verpackungspolstern aus Schaumstoff technisch realisierbar ist, unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten jedoch nicht eindeutig bevorzugt werden kann. Es obliegt dem Unternehmerrisiko, in derartige Techniken zu investieren, wobei hier erweiterte wirtschaftliche Sichtweisen eine entscheidende Rolle spielen.

8. Literaturverzeichnis

- /Ada00/ Adam, D.
Investitionscontrolling, 3. Aufl., München: Oldenburg, 2000
- /Bar87/ Bartels, R. H. / Beatty, J. C. / Barsky, B. A.
An introduction to splines for use in computer graphics & geometric modelling, Morgan Kaufmann, 1987
- /Ber99/ Bernard, A.
Reverse Engineering for rapid product development: a state of the art, in: Part of the SPIE Conference on Three-Dimensional Imaging, Optical Metrology and Inspection V, Boston, Massachusetts, September 1999, SPIE Vol. 3835, ISSN: 0277-786X/99
- /Ber99b/ Bernardini, F. / Bajaj, C. L. / Chen, J. / Schikore, D. R.
Automatic reconstruction of 3D CAD models from digital scans, in: International Journal of Computational Geometry & Applications, Vol. 9, No. 4 & 5, 1999, S. 327-369, World Scientific Publishing Company
- /Bey98/ Beyer, C. / Grote, K.-H. / Tenbusch, A.
Die Kopplung von Rapid Prototyping und Reverse Engineering im Konstruktionsprozess, in: Industrie Management, Band 14 (1998), Heft 5, S. 24-28, ISSN 1434-1980
- /Bie97/ Bieder, H.
Optische Formerfassung und Reverse Engineering. Anforderungen an die Software, Konferenz-Einzelbericht: Optische Formerfassung – Erfahrungsaustausch zwischen Anwendern und Entwicklern, DGZfP-VDI/VDE-GMA Fachtagung, Langen, Deutschland, 28.-29. Apr. 1997, GMA-Bericht, Band 30, 1997, S. 139-146

- /Bor01/ Bornemann-Werkzeugtechnik
Produktbroschüre BW-900, Bornemann-Werkzeugtechnik, Dellig-
sen, 2001
- /Bra98/ Bradley, C.
Computer vision techniques in reverse engineering, in: Engineering
Design & Automation, Vol. 4, No 2, S. 101-112, ISSN 1077-2642
- /Bre95/ Brettner, U.
Entwicklung eines CAD/CAM-Systems zur Dimensionierung und
Optimierung von Verpackungen, Schriftenreihe Transport- und
Verpackungslogistik, Band 24, Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. R.
Jansen, Deutscher Fachverlag, Frankfurt am Main, 1995
- /Bre99/ Breuckmann, B.
Topometrische 3D-Messtechnik in der industriellen Praxis: akzep-
tierte Technologie oder fehlende Anwenderakzeptanz?, in:
Konferenz-Einzelbericht: Fachtagung Optische Formerfassung,
Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Stuttgart, 5. –
6. Oktober 1999, Band 70, S. 115-123
- /Bug98/ Bugert, T. / Fischer, M. / Kunhenn, J. / Enders, L. / Götzelt, U. /
Schön, A.
Parametrik im Produktentstehungsprozess, in: CAD-CAM Report
10/1998, S. 86-91
- /CAD00/ N. N.
Schnittstellen, in: CAD/CAM 4/2000, S. 73-76

- /Con97/ Conley, J. G. / Marcus, H. L.
Rapid prototyping and free form fabrication, in: Transaction of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Band 119, Heft 4B, November 1997, New York, USA, S. 811-816, ISSN 1087-1357
- /Däu89/ Däumler, K.-D.
Grundlage der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung, 6. Aufl., Verlag Neue Wirtschafts-Briefe; Herne/Berlin, 1989
- /Die93/ Dierckx, P.
Curve and Surface fitting with splines, Clarendon Press, Oxford, 1993
- /Din82a/ DIN 7726
Schaumstoffe – Begriffe und Einteilung, Beuth-Verlag, Berlin, 1982
- /Din82b/ DIN 53572
Prüfungen von weich-elastischen Schaumstoffen, Bestimmung des Druck-Verformungsrestes nach konstanter Verformung, Beuth-Verlag, Berlin, 1982
- /Din82c/ DIN 55 510
Verpackung – Modulare Koordination im Verpackungswesen – Modulare Teilflächen des Flächenmoduls 600 mm x 400 mm, Beuth-Verlag, Berlin, 1982
- /Din85/ DIN 55471-Teil 2
Polystyrol-Schaumstoff für Verpackungszwecke – Berechnungsgrundlagen, Gestalten von Verpackungsformteilen, Beuth-Verlag, Berlin, 1985

- /Din87/ DIN 55481-Teil 2
Polyethylen-Schaumstoff für Verpackungszwecke – Anforderungen,
Prüfungen, Beuth-Verlag, Berlin 1987
- /Din89/ DIN 55482-Teil 1
Polyurethan-Schaumstoff für Verpackungszwecke, Anforderungen,
Prüfungen, Beuth-Verlag, Berlin, 1989
- /Din93/ DIN EN 22248
Verpackung; Versandfertige Packstücke; Vertikale Stoßprüfung
(freier Fall), Beuth-Verlag, Berlin, 02/1993
- /Dol88/ Doliwa, U.
PUR-Foam in Place, Schaumstoffe in der Verpackungstechnik, VDI-
Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1988, S.63-
76
- /Don97/ Donga, M.
Modellieren statt zeichnen – CAD-Einsatz für Konstrukteure in
kleinen und mittleren Unternehmen der Verpackungsindustrie, in:
PackReport, Nr. 11, 1997, Seite 67-69
- /Don98a/ Donga, M.
Verpackungspolsterentwicklung und –bewertung unter Nutzung
eines parametrischen 3D-CAD-Systems, Schriftenreihe Transport-
und Verpackungslogistik, Band 41, Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. R.
Jansen, Deutscher Fachverlag, Frankfurt am Main, 1998
- /Don98b/ Donga, M.
CAD in der Verpackungstechnik, in: Neue Verpackung, Nr. 06,
1998, S. 64-67

- /Don99/ Donga, M.
Vortrag: „CAD in der Verpackungsentwicklung“ anlässlich des Arbeitskreises „Verpackungslogistik – Maßnahmen und Möglichkeiten zur optimierten Verpackungsentwicklung“ der Deutschen Gesellschaft für Logistik e.V. (DGFL), Leitung: Prof. Dr.-Ing. R. Jansen, Fachgebiet Logistik der Universität Dortmund, am 26.01.99
- /Esc93/ Eschke, R.
Verpackungsoptimierung durch Systemanalyse der Transportkette, expert verlag, Ehningen, 1993, S.46
- /Haa02/ Haas, A.
Maschinenstundenkalkulation – Mit spitzer Feder rechnen, in: Plastverarbeiter Nr. 03, 2002, S. 20-21
- /Hei96/ Heimann, D.
Entwicklung eines Entscheidungsmodells zur Polsterauswahl, Schriftenreihe Transport- und Verpackungslogistik, Band 39, Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. R. Jansen, Deutscher Fachverlag, Frankfurt am Main, 1996
- /Hir01/ Hirschberg, A.
Entwicklung von Variantenkonstruktionen in der Verpackungspolsterentwicklung mittels 3D-CAD, Schriftenreihe Transport- und Verpackungslogistik, Band 55, Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. R. Jansen, Deutscher Fachverlag, Frankfurt am Main, 2001
- /Hüt95/ Hüttner, M.
Betriebswirtschaftslehre, 2. Aufl., Wien: Oldenburg, 1995
- /Jan96/ Jansen, R. / Külpmann, P.
Umweltgerechte Verpackungssysteme, Handbuch des Umweltschutzes und der Umwelt, Band. 2, Springer Verlag, Berlin, 1996

- /Jan98/ Jansen, R. / Donga, M.
Konstruieren in neuen Dimensionen - Möglichkeiten CAD-gestützter Verpackungspolsterentwicklung, in: PackReport, Nr. 5, 1998, S. 51-54
- /Ker97/ Kerstens, A. / Kruth, J.-P. / Janssen, M.
Reverse engineering of free-form-objects: an automatic solution, Konferenz-Einzelbericht: ISATA, 30th international symposium on automotive technology & automation, Florenz, Italien, 16.-19. Juni 1997, Band 30Mec1, 1997
- /Kru90/ Kruschwitz, L.
Investitionsrechnung, 4. Aufl., Berlin, New York, 1990
- /Man93/ Manz, K. und Dahmen, A.
Investition, Kompaktstudium Wirtschaftswissenschaften; Bd. 5, München: Vahlen, 1993
- /Mut98/ Muth, M. / Vajna, S. / Sander, R. / Obinger, F.
Einsatz der Parametrik in der Produktentwicklung, in: VDI-Z 141 (1998), S. 15-22
- /NN90a/ N.N.
Verpacken mit Styropor, BASF-Schaumstoffe, HSR 8706 d, Juli. 1990
- /NN90b/ N.N.
Rohdichteeinflüsse auf das Stoßdämpfungsverhalten von Schaumstoffen, Technische Information, TI 2-250 d, 82021, BASF, Ludwigshafen, 1990

- /NN92/ N. N.
Dimensionierung von stoßdämpfenden Schaumstoffverpackungen,
Technische Information, TI 2-510 d, 81981 Januar 1992, BASF
- /NN95/ N.N.
Verarbeiten von Styropor, BASF-Schaumstoffe, HSR 8707 d, Jan.
1995
- /NN98a/ N.N.
Innovative und kundenorientierte Produktentwicklung, in: CAD-
CAM-Report 4/98, S. 36-37
- /NN01/ N. N.
SensAble Technologies, Inc., <http://www.sensable.com>, 23.11.2001
- /Pah97/ Pahl, G. / Beitz, W.
Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung, 4. Auflage, Berlin u.
a., 1997
- /Pir82/ Pirodda, L.
Shadow and Projection Moire Techniques for Absolute and Relative
Mapping of Surface Shapes, in: Optical Engineering, Vol. 21, S.
640-647, 1982
- /Pra80/ Prankel, W.
Die Bedeutung der Polstereigenschaften für die Verpackungsent-
wicklung und die Beurteilung von Packstoffen, in: Verpackungs-
Rundschau, Nr. 11, 1980, S. 75ff
- /Rei84/ Reid, G. T. / Rixon, R. C. / Messer, H. I.
Absolute and Comparative Measurements of Three Dimensional
Shape by Phase Measuring Moire Topography, in: Optics and Laser
Technology, Vol. 15, S. 315-329, 1984

- /RKW98/ Optimierung des Austausches von Entwicklungs- und Konstruktionsdaten in KMU unter Einsatz des STEP-Standards – Erfahrungen aus einem MOBIL-Modellprojekt – Abschlussbericht, herausgegeben vom Rationalisierungs-Kuratorium der Deutschen Wirtschaft (RKW) e. V., Landesgruppe Hessen, Eschborn, 1998
- /Rod99/ Rodella, R. / Sansoni, G.
3D Shape Recovery and Registration Based on the Projektion of Non-Coherent Structured Light, Konferenzbericht „Second International Conference on 3D-Digital Imaging and Modeling, Los Alamitos, USA, IEEE Comput. Soc, 1999
- /Rol95/ Roller, D.
CAD – Effiziente Anpassungs- und Variantenkonstruktion, Springer Verlag, Berlin, 1995
- /Sch83/ Schierenbeck, H.
Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre, 7. Aufl., München: Oldenburg, 1983
- /Sch98/ Schäfer, D. / Roller, D.
Parametrische Produkt- und Prozessmodellierung, in: CAD-CAM Report 10/1998, S. 74-80
- /Sch99a/ Schyroki, J.
Qualitätssicherung mit optischen Messsystemen bei Daimler-Chrysler, Konferenz-Einzelbericht: Fachtagung Optische Formerfassung, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Stuttgart, 5. – 6. Oktober 1999, Band 70

- /Sch99b/ Schäfer, D. / Roller, D.
Die Methode bestimmt das Ergebnis - Kosten- und Zeitreduzierung durch Varianten- und Komponententechnik, in: Der Konstrukteur 1-2/99, S. 52-53
- /Spu97/ Spur, G.
Das virtuelle Produkt, Management der CAD-Technik, Hanser Verlag, München, Wien, 1997
- /Süc95/ Süchting, J.
Finanzmanagement – Theorie und Politik der Unternehmensfinanzierung, 6. Aufl., Wiesbaden: Gabler, 1995
- /Tiz99/ Tiziani, H.
Aktuelle Entwicklung auf dem Gebiet der 3D-Form- und Oberflächenvermessung, in: Konferenz-Einzelbericht: Fachtagung Optische Formerfassung, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Stuttgart, 5. – 6. Oktober 1999, Band 70, S. 193-208
- /Var99/ Varady, T. / Benko, P. / Kos, G. / Renner, G. / Weiss, V.
Segmentation and Surface Fitting in Reverse Engineering, Konferenzbericht „International Conference on Sculptured Surface Machining (SSM 98), Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, 1999, S. 167-172
- /Var00/ Varady, T. / Benko, P.
Reverse engineering B-rep models from multiple point clouds, Konferenzbericht „Proceedings geometric modeling and processing 2000. Theory and Applications, Los Alamitos, USA, IEEE Comput. Soc, 2000

- /Vdi99/ VDI 2223, (Technische Regel, Entwurf) Ausgabe:1999-03,
Methodisches Entwerfen technischer Produkte, VDI-Verlag,
Düsseldorf, 1999
- /Wan99/ Wannemacher, B. / Hull, S.
Ist die Genauigkeit genau richtig? In: CAD-CAM-Report, Band 18,
Heft 11, 1999, S. 90-97
- /Wei97/ Weinert, K. / Friedhoff, J.
On the processing of digitized point data for the die- and mold
manufacturing industry, in: Production Engineering, Vol. 4, Heft
1/1997, Berlin, 1997, S. 123-126
- /Wöh90/ Wöhe, G.
Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 17. Auflage,
München: Vahlen, 1990
- /Zwi02/ Zwicker, R.
Kosten- und Leistungsrechnung im Werkzeug- und Formenbau, in:
VDWF aktuell, 02-01, S. 8-13