

Nachhaltigkeit in der Zahnheilkunde – Pilotstudie zum CO₂-Fußabdruck der analogen und digitalen Abformung

Inauguraldissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin

des Fachbereichs Medizin

der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von Drath, Kara Johanna

aus Lahnstein

Gießen 2025

Aus dem Fachbereich Medizin der Justus-Liebig-Universität Gießen

Medizinisches Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik

Gutachter: Prof. Dr. Maximiliane Schlenz-Helmke, M.Sc.

Gutachter: Prof. Dr. Peter Rehmann

Tag der Disputation: 11.03.2026

Meiner Familie gewidmet

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Ziel der Arbeit	3
3	Literaturübersicht.....	4
3.1	Analoge Abformung	4
3.1.1	Abformmaterialien	5
3.1.2	Analoge Abformtechniken	8
3.1.3	Analoger Workflow zur Herstellung einer Einzelzahnkrone.....	10
3.1.4	Bewertung der analogen Abformung	13
3.2	Digitale Abformung.....	14
3.2.1	Digitaler Workflow zur Herstellung einer Einzelzahnkrone	14
3.2.2	Primescan AC	16
3.2.3	Bewertung der digitalen Abformung	16
3.2.4	Relevanz der digitalen Abformung	18
3.3	Nachhaltigkeit in der Zahnmedizin	19
3.3.1	Lebenszyklusanalysen und PCF-Untersuchungen	27
3.3.2	Lebenszyklusanalyse.....	30
3.3.3	Abfallmanagement im Gesundheitswesen	32
4	Material und Methode	34
4.1	Methodikübersicht.....	34
4.2	Ziel, Untersuchungsrahmen und Systemgrenzen	36
4.2.1	Ziel	36
4.2.2	Untersuchungsrahmen.....	36

4.3	Erstellung der Sachbilanz	42
4.3.1	Analoge Abformung	44
	Abformung (Präzision) – A-Silikon	45
	Abformung (Gegenkiefer) – Alginat	47
	Bissregistrator	47
	Abformung desinfizieren	48
	Abformlöffel reinigen	48
	Herstellung Gipsmodell	49
	Komponenten desinfizieren	50
	Arbeitsplatz reinigen (Gipslabor und Behandlungseinheit)	51
	Stromverbrauch der Maschinen und Behandlungseinheit	51
4.3.2	Digitale Abformung	53
	Abformung durchführen	54
	Scanspitze reinigen (WI)	56
	Scanspitze autoklavieren (AU)	56
	Arbeitsplatz reinigen	56
	Scanspitze entsorgen (EI)	57
	Anteilige Herstellung des Primescan AC	58
4.4	Berechnung des PCF	60
4.5	Berechnung der Unsicherheiten in der Datenerhebung	61
4.6	Statistische Analyse	64
5	Ergebnisse	65
5.1	Zwischenergebnisse	65
5.1.1	Analoge Abformung	65
5.1.2	Digitale Abformung	67

5.2 Sachbilanz.....	69
5.3 Ergebnis Monte-Carlo-Simulation	71
5.4 PCF der digitalen und analogen Abformung im Vergleich.....	72
5.5 Einfluss verschiedener Inputgrößen auf den PCF der Abformmethoden.....	75
5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse	77
6 Diskussion	79
6.1 Methodikdiskussion.....	79
6.1.1 Annahmen und Systemgrenzen.....	79
6.1.2 Datenerhebung Analoge Abformung.....	83
6.1.3 Datenerhebung Digitale Abformung.....	88
6.1.4 Datengrundlagen und PCF Berechnung.....	92
6.1.5 Berechnung der Unsicherheiten in der Datenerhebung	93
6.1.6 Einschränkungen der PCF Berechnung	94
6.1.7 Statistische Analyse	95
6.2 Ergebnisdiskussion.....	96
6.2.1 Sachbilanz.....	96
6.2.2 Ergebnis Monte-Carlo-Simulation.....	97
6.2.3 PCF der analogen und digitalen Abformung im Vergleich	99
6.2.4 Input- und Output-Ströme, welche den PCF der Abformverfahren besonders stark prägen	101
6.2.5 Handlungsempfehlungen aus der Pilotstudie zum Thema Abformungen für weitere Bereiche einer nachhaltigen Zahnmedizinischen Versorgung	103
7 Zusammenfassung	104
8 Summary.....	105

9	Abkürzungsverzeichnis	106
10	Darstellungsverzeichnis.....	108
10.1	Abbildungsverzeichnis	108
10.2	Tabellenverzeichnis	109
10.3	Literaturverzeichnis	112
10.4	Publikationsverzeichnis	123
11	Anhang	124
12	Erklärung	173
13	Danksagung	174
14	Lebenslauf	175

Zur besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit das generische Maskulinum verwendet. Im Sinne der Gleichbehandlung gelten Personenbezeichnungen für alle Geschlechter (m/w/d) gleichermaßen.

1 Einleitung

Nachhaltigkeit, wie sie von den Vereinten Nationen (UN) definiert wird, basiert auf dem Konzept der *Environmental, Social and Corporate Governance* (ESG). Dieser Ansatz berücksichtigt drei zentrale Dimensionen: ökologische, ökonomische und soziale Aspekte. Das zugrunde liegende Modell wird als „*Triple Bottom Line*“-Modell bezeichnet.

Dabei zielt die ökologische Nachhaltigkeit darauf ab, natürliche Ressourcen zu bewahren, Emissionen und Abfälle zu reduzieren sowie die biologische Vielfalt zu schützen. Ihr übergeordnetes Ziel ist es, ökologische Systeme langfristig zu erhalten und Umweltbelastungen zu minimieren. Die ökonomische Nachhaltigkeit strebt die Etablierung eines stabilen Wirtschaftssystems an, das in der Lage ist, dauerhaft Wohlstand zu schaffen und zu sichern, ohne dabei die natürlichen Ressourcen zu übernutzen. Den Fokus auf Gerechtigkeit, Chancengleichheit und soziale Verantwortung legt die soziale Nachhaltigkeit. Sie stellt sicher, dass die Bedürfnisse und Rechte aller Menschen angemessen berücksichtigt werden.²⁰

Aufgrund der thematischen Komplexität konzentriert sich die folgende Analyse ausschließlich auf die ökologische Dimension der Nachhaltigkeit:

Das Thema Nachhaltigkeit gewinnt zunehmend an Aufmerksamkeit im Gesundheitswesen, was jedoch im Gegensatz zu den bisher geringen und wenig systematischen Forschungsaktivitäten steht. In anderen Bereichen gibt es bereits viele Überlegungen, wie möglichst viel Kohlenstoffdioxid eingespart werden kann.^{84, 97, 150}

Der Gesundheitssektor hat einen Anteil von 6,1 % an den gesamten Kohlenstoffdioxid-Emissionen in Deutschland. Damit ist er nach dem Bauwesen der zweitgrößte Emittent.⁷³ Das Potential zur Kohlenstoffdioxid-Reduktion im Gesundheitssektor ist also sehr groß. Dennoch gibt es bisher nur sehr wenige Studien zum Thema Nachhaltigkeit – auch in der Zahnmedizin.

Die Schwierigkeit im medizinischen Bereich besteht darin, dass neben Aspekten der Nachhaltigkeit auch die Hygiene und Patientensicherheit gewährleistet sein muss, um die Qualität der medizinischen Versorgung nicht zu gefährden. Bewährte Recyclingkonzepte wie sie in anderen Bereichen Anwendung finden, können im medizinischen Bereich meist nicht genutzt werden. Es stellt sich jedoch die Frage, ob nicht an anderer Stelle, wie

beispielsweise durch die Digitalisierung, eine Reduktion des ökologischen Fußabdrucks in der Zahnmedizin erreicht werden könnte.

Die Digitalisierung der Patientenversorgung in der Zahnmedizin nahm ihren Ursprung in der digitalen Abformung mittels sogenannter Intraoralscanner. Bereits seit den 1980er-Jahren stehen entsprechende Systeme zur Verfügung, die seither durch kontinuierliche Weiterentwicklungen in Hard- und Software stetig optimiert wurden. Inzwischen erreicht die Genauigkeit digitaler Abformungen ein mit konventionellen Abformungen vergleichbares Niveau und übertrifft dieses in bestimmten Anwendungsbereichen bereits.^{8, 15, 53} Im Vergleich zur analogen Abformung mit Abformlöffel und -masse bietet die digitale Abformung einige Vorteile. So müssen etwa ein Drittel der analogen Abformungen wiederholt werden, da sie klinisch nicht akzeptabel sind.⁸⁶ Dadurch gehen bei jedem neuen Abformversuch Ressourcen verloren. Bei der digitalen Abformung hingegen ist es möglich, den Bereich der Abformung, welcher fehlerhaft ist, einfach erneut zu scannen. Dadurch können sowohl Zeit als auch Ressourcen eingespart.⁵⁸ Da bislang belastbare Primärdaten zu diesem Thema fehlen, kommt der vorliegenden Pilotstudie besondere Bedeutung zu. So sollen erste empirische Erkenntnisse zum Vergleich zwischen analoger und digitaler Abformung in Bezug auf den Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Fußabdrucks, auch bekannt als *Product Carbon Footprint* (PCF), gewonnen werden. Aus den Ergebnissen lassen sich schlussendlich Handlungsempfehlungen für die Praxis ableiten. Die Frage, welche der beiden Abformmethoden insgesamt einen kleineren PCF aufweist, kann mit Methoden der Umweltwissenschaft analysiert werden. Zur Gewährleistung einer methodisch fehlerfreien Berechnung der PCFs und der Monte-Carlo-Simulation wurde im Rahmen der vorliegenden Studie eine interdisziplinäre Kooperation mit der Technischen Hochschule Mittelhessen (THM) initiiert. Ziel dieser Zusammenarbeit ist die Integration umweltwissenschaftlicher Expertise in den Kontext zahnmedizinischer Anwendungen. Die Untersuchungen im Rahmen der Studie wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Fachbereich *Life Science Engineering* sowie dem Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen der THM durchgeführt.

2 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Pilotstudie ist es, den Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Fußabdruck (*Product Carbon Footprint* (PCF)) der analogen und digitalen Abformung zu bestimmen und vergleichend gegenüberzustellen. Hierfür wurde das klinische Anwendungsbeispiel einer Versorgung mit einer Einzelzahnkrone gewählt und Systemgrenzen definiert. Anhand dessen wurden alle relevanten Input- und Output-Ströme bestimmt und eine Sachbilanz erstellt. Auf Basis selbsterhobener sowie bereits vorhandener Daten aus der Datenbank Ecoinvent 3.10 (*Ecoinvent, Zürich, Schweiz*) wurden die im Prozess vorkommenden Stoffe hinsichtlich ihres PCFs erfasst. Auf Basis der stoffspezifischen Emissionsfaktoren wurde der PCF der beiden Abformmethoden berechnet.⁴⁶

Anschließend wurden Unsicherheiten in der Berechnung des PCFs mittels einer Monte-Carlo-Simulation abgebildet.

Folgende Nullhypothesen wurden untersucht:

1. Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen der analogen und digitalen Abformung in Bezug auf den PCF.
2. Es gibt keine signifikanten Unterschiede des PCFs der beiden Abformmethoden durch verschiedene Input- und Output-Ströme, Prozessschritte und Lebenszyklusphasen.
3. Inhärente Unsicherheiten in der Datengrundlage haben keinen signifikanten Einfluss auf die probabilistische Bewertung des PCFs und können nicht durch Bereinigungsmaßnahmen im Sinne einer Monte-Carlo-Simulation verbessert werden.

3 Literaturübersicht

Im folgenden Kapitel sollen zunächst die analoge Abformung und der damit einhergehende analoge Workflow beleuchtet werden. Im Anschluss erfolgt eine detaillierte Erläuterung der digitalen Abformung. Im anschließenden Teil des Kapitels wird die Studienlage zur Nachhaltigkeit in der Zahnmedizin betrachtet. Zuletzt wird ein kurzer Überblick über Lebenszyklusanalysen (LCA) im Allgemeinen gegeben.

3.1 Analoge Abformung

Das Ziel einer Abformung ist die möglichst genaue Wiedergabe und Übertragung der intraoralen Situation des Patienten auf ein Modell. Dies ist zwingend erforderlich für die indirekte Herstellung von Zahnersatz wie z.B. Einzelzahnkronen. Die präzise Erfassung der Dimensionen und Details ist entscheidend für die Herstellung von Zahnersatz, da bereits geringe Abweichungen in der Form oder Größe die Passgenauigkeit und Funktionalität der zahnmedizinischen Versorgung erheblich beeinträchtigen können. Das Bindeglied zwischen zahnärztlicher und zahntechnischer Arbeit ist die Abformung.¹⁴¹ Dies gilt sowohl für den analogen als auch digitalen Herstellungsweg für Zahnersatz.

Das Prinzip der analogen Abformung wurde erstmals im Jahr 1756 von Philip Pfaff beschrieben. Damals wurde versucht, mit Wachs eine intraorale Situation zu reproduzieren.¹⁰⁸ Seitdem wurden sowohl die Materialien als auch die Techniken stetig weiterentwickelt. Das Grundprinzip der Abformung ist jedoch unverändert geblieben. Eine plastische Masse wird auf einen Abformlöffel aufgetragen und anschließend auf den Zahnbogen appliziert. Durch einen Abbindeprozess innerhalb des Materials geht die Abformmasse von ihrer vormals zähflüssigen Form in eine feste Form über. Dadurch verbleibt ein Abbild der intraoralen Situation in der erstarrten Abformmasse.

3.1.1 Abformmaterialien

Für analoge Abformmethoden stehen heute eine Reihe von Materialien zur Verfügung. Eine Unterteilung in verschiedene Gruppen ist möglich. Abformmaterialien können nach ihrem Zustand in abgebundener Form in „starr“ und „elastisch“ eingeteilt werden. Des Weiteren erfolgt die Unterteilung jeweils in irreversibel und reversibel (Abb. 3.1).^{32, 72, 81, 91} Der klare Vorteil von elastischen Materialien ist, dass sie sich nach der Abformung leicht aus dem Mund entfernen lassen. Starre Materialien werden daher heute eher selten verwendet. Somit werden im Folgenden nur die in dieser Studie verwendeten analogen Abformmaterialien – Silikone und Alginat– näher beschrieben.

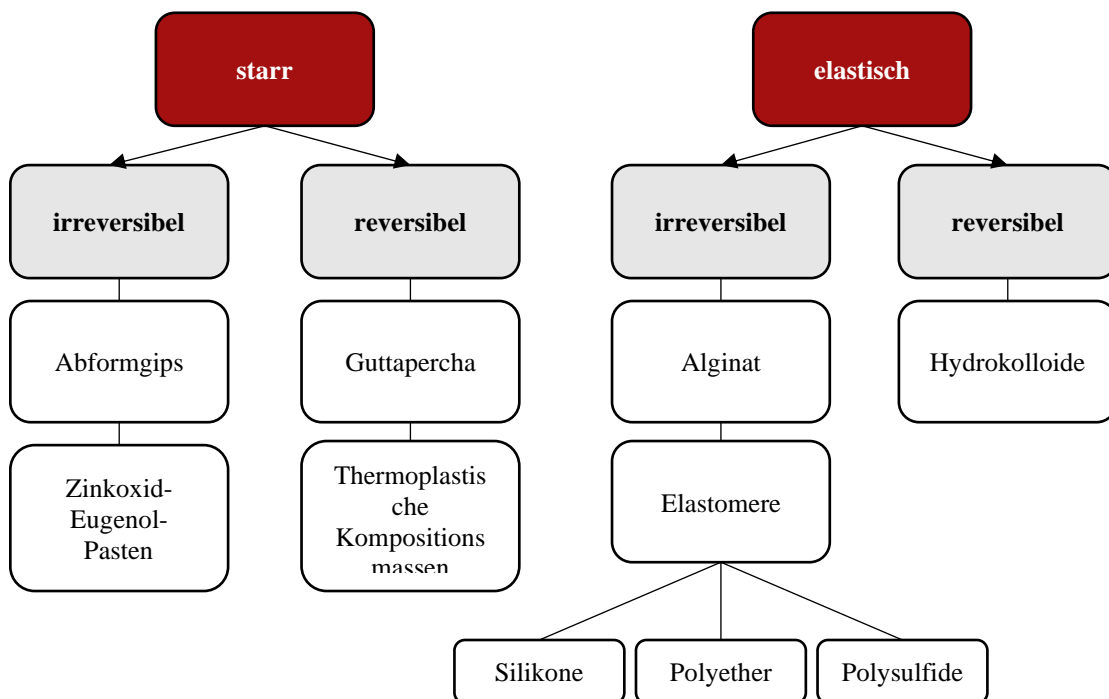


Abb. 3.1: Einteilung der analogen Abformmaterialien.⁶⁷

Silikone

Es gibt in der Zahnmedizin additionsvernetzende Silikone (A-Silikone) und kondensationsvernetzende Silikone (C-Silikone). Silikone haben ein sehr breites Anwendungsspektrum. Sie können sowohl zur Abformung präparierter Zähne als auch von Mundschleimhaut verwendet werden. A-Silikone bestehen aus Polyvinylsiloxanen und härten durch eine Additionspolymerisation aus. Dabei werden keine Nebenprodukte freigesetzt, wodurch A-Silikone keiner Polymerisationsschrumpfung unterliegen. Bei trockener Lagerung sind A-Silikone auch über mehrere Tage dimensionsstabil.⁹⁹ Es ist zu beachten, dass der Katalysator der meisten A-Silikone durch Latex (z. B. in

Handschuhen) inhibiert wird. A-Silikone haben im Vergleich zu C-Silikonen eine höhere Reißfestigkeit und ein höheres E-Modul. Allerdings sind A-Silikone sehr hydrophob, wodurch es nötig ist, geeignete Zusätze wie zum Beispiel Tenside hinzuzufügen.^{90, 110} Auch C-Silikone bestehen aus Polyvinylsiloxanen. Hier läuft die Abbinde-Reaktion nicht nebenproduktfrei ab. Beim Aushärten des C-Silikons kommt es zur Abspaltung einer Alkoholgruppe. Dadurch schrumpft das Material. Auch die Reißfestigkeit und das E-Modul sind weniger hoch, als es bei den A-Silikonen der Fall ist.

Silikone können hinsichtlich ihrer Konsistenz unterteilt werden (Tab. 3.1).⁶⁷

Tab. 3.1: Einteilung der Abformmaterialien nach Viskosität.⁶⁷

Typ	Viskosität	Füllstoffgehalt
Typ 0/ Putty	knetbar	
Typ 1/ Heavy Body	schwerfließend	
Typ 2/ Medium Body	mittelfließend	
Typ 3/ Light Body	leichtfließend	

Je höher der Füllstoffgehalt eines Abformmaterials ist, desto höher ist die Viskosität und desto geringer ist die Polymerisationsschrumpfung.²⁹ Eine weitere Besonderheit der Silikone ist eine Eigenschaft, welche als Thixotropie bekannt ist. Diese wird durch Zusatzstoffe gesteuert. Das Material wird für eine kurze Zeit unter Scherbelastungen flüssiger und kehrt anschließend wieder in seinen Ausgangszustand zurück.^{27, 120} Dies ermöglicht bei der Positionierung des Abformlöffels im Mund des Patienten ein genaues Anfließen des Abformmaterials an die intraoralen Details. Ist die finale Position gefunden, verfestigt sich das Material wieder und die Integrität der Abformung bleibt erhalten.

Da Silikone häufig für Präzisionsabformungen verwendet werden, werden höchste Anforderungen an die Genauigkeit gestellt. Die Detailschärfe beträgt je nach Material

zwischen 1 und 25 µm. Für Bereiche, in denen höchste Präzision gefragt ist, eignen sich besonders dünnfließende Materialien.^{28, 34} Ungenauigkeiten entstehen meist eher durch Fehler bei der Abformmethode als durch Ungenauigkeiten, die auf das Material zurückzuführen sind.

Durch die natürliche Form der oralen Strukturen finden sich in den abzuformenden Bereichen oft Unterschnitte. Dies erfordert, dass das Abformmaterial in abgebundenem Zustand so elastisch verformbar und reißfest sein muss, dass eine Überwindung der Unterschnitte möglich ist. Dabei sollte auch die Dimension vor und nach der Verformung in möglichst gleichbleiben. Es kann zwischen einer elastisch reversiblen und einer plastisch irreversiblen Deformation einer Abformung unterschieden werden. Letztere kann nicht mehr durch das Rückstellvermögen des Materials kompensiert werden. Polyvinylsiloxane erreichen Werte von unter 2 % bezüglich der durchschnittlichen plastischen Deformation.^{32, 60, 91, 121}

Aufgrund der genannten Eigenschaften erfreuen sich Silikone nach wie vor großer Beliebtheit und sind für die Herstellung von prothetischen Versorgungen wie Einzelzahnkronen, Brücken oder herausnehmbarem Zahnersatz gut geeignet.

Alginat

Alginat ist ein häufig verwendetes Abformmaterial in der Zahnmedizin, insbesondere für die Herstellung von Situations- oder Gegenkieferabformungen. Es handelt sich um ein hydrophiles Polymer, welches aus Algen gewonnen wird. Pulverförmige Alginat haben die Fähigkeit, sich bei Kontakt mit Wasser zu verflüssigen und nach dem Aushärten eine elastische, aber stabile Form zu behalten. Die Vorteile von Alginaten liegen in ihrer einfachen Handhabung, der schnellen Aushärtung und darin, dass Alginat sehr kostengünstig sind.²⁶

Allerdings weisen Alginat auch einige Nachteile auf, wie eine begrenzte Stabilität über längere Zeiträume und eine Empfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit und Temperatur. So quellen Alginatabformungen bei zu langer Lagerung in Wasser auf und schrumpfen bei zu langer trockener Lagerung. Daher sollten sie möglichst zeitnah nach der Herstellung ausgegossen werden um eine möglichst hohe Dimensionstreue zu erreichen.⁶⁷

3.1.2 Analoge Abformtechniken

Abformmethoden können anhand der Anzahl der Arbeitsschritte unterteilt werden oder anhand der Anzahl der Materialkomponenten. Die Arbeitsschritte können entweder

- einzeitig oder
- zweizeitig

durchgeführt werden.^{82, 131} Die Abformmaterialien bestehen entweder aus

- einer Komponente oder
- zwei Komponenten.⁸²

Beispiele für die einzeitige Abformung sind die Abformungen mit Alginat oder Polyethern. Die Abformung mit Polyether wird auch als Monophasentechnik bezeichnet und ist sowohl eine Einkomponentenabformung als auch einzeitig.¹⁰² Ein Beispiel für eine zweizeitige Abformung ist die Korrekturabformung. Diese ist gleichzeitig auch eine Zweikomponentenabformung. Ein Mischtyp ist zum Beispiel die Doppelmischabformung.¹⁰² Sie ist eine einzeitige Zweikomponentenabformung.

Vor Präzisionsabformungen ist es ratsam, ein Gewebemanagement an den präparierten Zahnstümpfen durchzuführen, um die Gingiva zeitweise zu verdrängen. Dies ermöglicht die exakte Darstellung der Präparationsgrenze und liefert der Zahntechnik entscheidende Informationen zur Herstellung des Zahnersatzes. Zur Verdrängung des Gewebes werden in der Regel Fäden oder Retraktionspasten verwendet. Die meisten Retraktionsmittel werden vor der Abformung wieder entfernt. Eine Ausnahme bildet die Doppelfadentechnik, bei der ein dünner Faden apikal der Präparationsgrenze während der Abformung im Sulkus verbleibt. Bei der Doppelmischabformung wird nun zuerst der abzuformende Bereich getrocknet, da Flüssigkeiten nicht komprimierbar sind und das Abformmaterial so nicht an die gewünschten Stellen gelangen könnte. Anschließend an die Trocknung wird nun die dünnfließende Silikonphase um den präparierten Stumpf gespritzt. Während diese Phase noch flüssig ist, wird der Abformlöffel mit einer standfesteren, dickfließenden Silikonphase in den Patientenmund eingesetzt. Die beiden Phasen verbinden sich nun zu einer Abformung. Elastische Materialdeformationen sind hier nicht zu erwarten.⁸² Eine weitere einzeitige Zweikomponentenabformung ist die Sandwichabformung. Hier wird die dickfließende Phase direkt im Abformlöffel mit der dünnfließenden Phase beschickt.

Bei der Korrekturabformung handelt es sich, um eine zweizeitige Abformung mit zwei Materialkomponenten. Nach Abschluss der Retraktionsmaßnahmen wird zuerst eine Abformung des gesamten Zahnbogens mit einem dickfließenden Material durchgeführt. Nachdem die Abformung in einen festen Zustand übergegangen ist und aus dem Mund des Patienten entnommen wurde, muss sie für die zweite Phase der Abformung vorbereitet werden. Die Interdentalsepten und unter sich gehenden Bereiche müssen mit einem Skalpell aus der Abformung entfernt werden.⁶³ Dabei bleibt die Abbildung des präparierten Stumpfes allerdings unberührt. Zusätzlich können auch Abflussmöglichkeiten für die dünnfließende Phase geschaffen werden.⁹⁰ Nun wird zunächst die beschnittene Abformung im Mund des Patienten anprobiert und geprüft, ob eine spaltfreie Repositionierung möglich ist. Nachdem dies sichergestellt wurde und die Abformung wieder aus dem Mund des Patienten entnommen wurde, werden gegebenenfalls erneut Retraktionsmaßnahmen durchgeführt und der abzuformende Bereich anschließend getrocknet. Nun wird die dünnfließende Phase auf die Abformung aufgetragen und für fünf Sekunden mit gleichmäßigem Druck im Patientenmund platziert. Dies stellt sicher, dass die dünnfließende Phase hinterher lediglich in einer dünnen Schicht vorliegt. Außerdem entsteht so ein Staudruck, der bei guter vorheriger Trocknung dazu führt, dass auch subgingivale Bereiche auf der Abformung abgebildet sind. Eine Fehlerquelle bei der Korrekturabformung ist, dass beim zweiten Einsetzen der Abformung die dünnfließende Phase die dickfließende Phase komprimiert und die Abformung so aushärtet. Nach der Entnahme aus dem Patientenmund stellt sich das dickfließende Material zurück und somit resultiert in der Abformung ein kleineres Lumen.^{50, 51} Eine weitere Fehlerquelle ist eine falsch gewählte Abzugsrichtung der Abformung aus dem Mund des Patienten. Die Abzugsrichtung sollte immer entsprechend der Lokalisation der präparierten Stümpfe gewählt werden.¹¹⁵ Weiterhin kann eine unzureichende Trockenlegung zum Problem werden. Befindet sich das Parodont des Patienten in einem schlechten Zustand, kann es zu Blutungen während der Abformung kommen.¹⁴⁵ Hier muss auf ausreichende Retraktionsmaßnahmen geachtet werden. Auch der Einsatz eines geeigneten Anästhetikums kann hilfreich sein.¹⁴³ Durch den Zusatz von Adrenalin im Lokalanästhetikum kann eine Vasokonstriktion erreicht werden und somit eine geringere Blutung während der Abformung.

Welche Methode oder welches Material das Ideale ist, ist eine viel diskutierte Frage. Während einige Quellen vor allem das Abformmaterial für erfolgsentscheidend halten,^{29, 62, 101, 116} sehen andere Autoren vor allem die Abformtechnik als ausschlaggebend an.^{24, 31, 100} Einige Quellen halten eine Kombination aus dem richtigen Material und der richtigen Technik für entscheidend, um eine gute Genauigkeit zu erzielen.^{116, 146}

Bei Studien, welche die Genauigkeit von Abformmethoden untersuchten, zeigte sich, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Abformverfahren gab.^{55, 62, 63, 80, 114} Hinsichtlich der Dimensionstreuung ist die Doppelmischabformung, aufgrund der genannten Verdrängungseffekte der Korrekturabformung, überlegen.^{10, 24, 51, 100} Jedoch ist bei einer subgingival gelegenen Präparationsgrenze eher die Korrekturabformung im Vorteil, da hier der nötige Staudruck erzeugt werden kann, um subgingivale Bereiche abzuformen.¹⁴²

Sicherlich ist es wichtig, die Abformmethode und das Material passend zur klinischen Situation auszuwählen, da alle Verfahren und Materialien ihre Vor- und Nachteile haben.¹⁴²

3.1.3 Analoger Workflow zur Herstellung einer Einzelzahnkrone

Zunächst erfolgt die Vorbereitung des Zahnes zur Aufnahme einer Einzelzahnkrone mit Hilfe eines Schleifkörpers. Anschließend wird die nun neu entstandene Situation abgeformt. Wie oben bereits beschrieben, kommen dafür verschiedene Materialien in Frage. Anschließend muss die Abformung mit Gips ausgegossen werden, um ein Positivmodell zu erhalten. Zur Herstellung von Zahnersatz wird ein sehr widerstandsfähiges Modell benötigt.⁹⁰ Superhartgips eignet sich zu diesem Zweck sehr gut.⁶⁶ Dieser bietet außerdem den Vorteil, dass er eine sehr geringe Expansion aufweist und somit sehr dimensionsstabil ist.⁹⁰ Nachdem der Abbindevorgang abgeschlossen ist und das Modell aus der Abformung entnommen wurde, muss es nun für die Herstellung von Zahnersatz vorbereitet werden. Dazu muss ein Sägemodell angefertigt werden. Das Modell wird zunächst getrimmt und anschließend versäubert. Im Anschluss wird das Modell in einzelne Segmente zersägt und mit Pins auf einer Sockelplatte fixiert. So können die einzelnen Segmente entnommen und besser bearbeitet werden. Dies erleichtert im weiteren Verlauf die Herstellung des Zahnersatzes. Anschließend wird die Präparationsgrenze auf dem Modell zugänglich gemacht und ein Härter und Distanzlack auf den Stumpf aufgetragen. Anschließend wird die Restauration auf dem Gipsstumpf aus

Wachs modelliert. Ein besonderes Augenmerk ist bei der gesamten Herstellung auf die Präparationsgrenze zu legen, da hier die Passgenauigkeit besonders hoch sein muss. Dies gewährleistet hinterher einen möglichst geringen Randspalt und somit eine lange Funktionsfähigkeit des Zahnersatzes. Nachdem die Einzelzahnkrone fertig modelliert wurde, erfolgt nun das Einbetten in eine Gipsmasse. Diese fungiert wieder als Negativform. Die eingebettete Kronenmodellation wird nun so weit erhitzt, bis das Wachs restlos verbrannt ist. Anschließend wird das flüssige Legierungsmaterial in den nun entstandenen Hohlraum gegossen. Auch hierbei kann es zu Dimensionsänderungen durch die Erstarrungskontraktion und thermische Kontraktion kommen.⁹¹ Um diese Fehlerquelle bestmöglich zu eliminieren, ist die Einbettmasse genau auf das Gussmaterial abgestimmt und gleicht dessen Kontraktion durch eine exakt gleiche Expansion aus. Ist das Gussstück abgekühlt, kann es aus der Einbettmasse entnommen werden. Nun muss es noch ausgearbeitet werden, um hinterher eine glatte, hygienefähige Oberfläche zu erhalten. Es gibt alternativ zu metallenen Gusskronen noch einige andere Materialien, die verwendet werden können. Die Gusskronen können im nächsten Schritt beispielsweise noch mit einer Keramik verblendet werden. Es könnte auch eine monolithische Keramikkrone hergestellt werden. Hier gibt es auch die Möglichkeit, die Keramik zu pressen und anschließend zu sintern. Auch Gerüste aus Zirkon, die später mit einer transluzenteren Keramik verblendet werden, sind möglich.

Alternativ zu diesem klassischen Weg, wählen immer mehr Zahntechniklabore den Weg der indirekten Digitalisierung. Dabei ist bis zur Modellherstellung der Workflow identisch. Das Modell wird anschließend im Zahntechniklabor mit Hilfe eines Desktop-Scanners digitalisiert. Der Zahnersatz wird digital mit Hilfe von *computer-aided design* (CAD) Softwareprogrammen erstellt. Der entstandene Datensatz kann nun zur Herstellung von Zahnersatz beispielsweise an eine *computerized numerical control* (CNC) Fräse übermittelt werden. Diese fräst aus einem Rohling den gewünschten Zahnersatz. Hinterher muss dieser ausgearbeitet werden. Der letzte Schritt in der Herstellungskette ist das Eingliedern des Zahnersatzes in die intraorale Situation. Die Abb. 3.2 zeigt eine schematische Gegenüberstellung der verschiedenen Workflows.

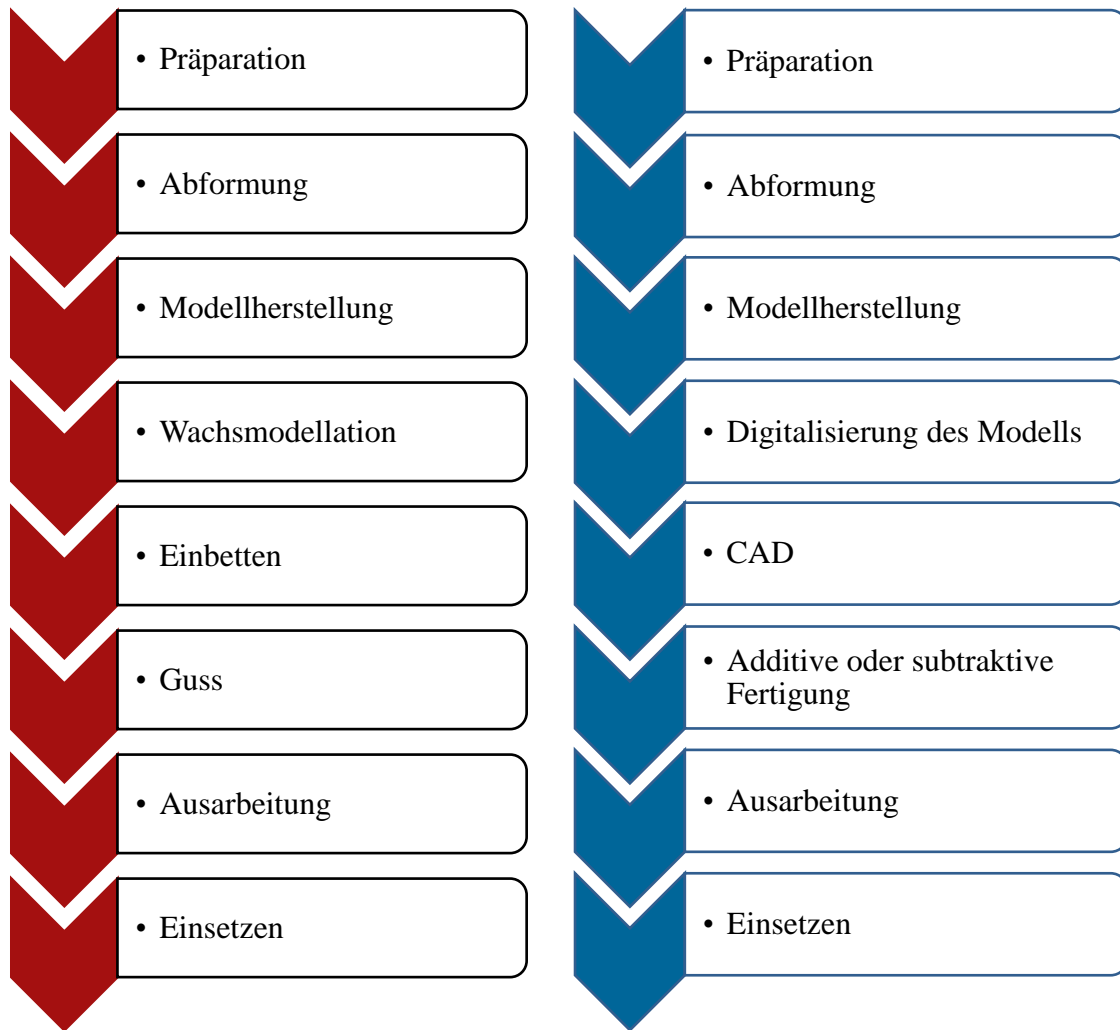


Abb. 3.2: Schematischer Ablauf eines analogen (links) und digitalen Workflows mit indirekter Digitalisierung (rechts); CAD = *computer-aided design*.^{12, 144}

3.1.4 Bewertung der analogen Abformung

Die analoge Abformung ist nach wie vor ein wichtiger Bestandteil des Herstellungsprozesses von Zahnersatz. Im gesamten Workflow, angefangen bei der Abformung bis hin zum Gießen des Zahnersatzes, existieren zahlreiche potenzielle Fehlerquellen. Diese können sich potenzieren, wenn sie nicht gleich zu Anfang identifiziert werden. Die Abformung muss als Basis für guten Zahnersatz also in jedem Fall möglichst genau sein.¹¹⁰ Daher ist es wichtig, den Prozess soweit wie möglich zu standardisieren und alle Arbeitsabläufe und Materialien aufeinander abzustimmen. Bei der Abformung ist es jedoch schwierig, eine komplette Vergleichbarkeit herzustellen, da die Umgebungsfaktoren wie zum Beispiel die Temperatur oft variieren. Auch jeder weitere Arbeitsschritt unterliegt einer gewissen Variabilität. Der Prozentsatz der wiederholungsbedürftigen Abformungen liegt je nach Quelle zwischen 39 % und 89,1 %.^{7, 116} Probleme können das Ablösen der Abformung vom Löffel oder aber das Fehlen von wichtigen Bereichen auf der Abformung sein. Diese Probleme sollten unbedingt erkannt und gegebenenfalls korrigiert werden. Bezüglich der Genauigkeit lassen sich mit Silikonen Details von 1-25 µm Größe darstellen.^{28, 34} Jedoch ist die in vivo erreichte Genauigkeit meist nicht identisch mit der in vitro Genauigkeit, da klinische Faktoren wie Probleme bei der Trockenhaltung die Abformung erschweren.¹⁴⁵

3.2 Digitale Abformung

Seit den 1980er Jahren gibt es zusätzlich zu analogen Abformmethoden auch einen digitalen Weg. *Computer-aided design/ computer-aided manufacturing* (CAD/CAM)-Technologie hat seitdem die Zahnmedizin verändert. Zu Beginn wurden CAD/CAM-Systeme vor allem in Zahntechniklaboren verwendet, um Gipsmodelle zu digitalisieren und Zahnersatz digital herstellen zu können (s. Kapitel 3.1.3).³⁰ Mittlerweile ist die CAD/CAM-Fertigung auch in vielen Zahnarztpraxen angekommen und fester Bestandteil der zahnärztlichen Arbeit. Die Digitalisierung kann auf unterschiedliche Weise erfolgen, je nachdem an welchen Schritt des analogen Workflows angeknüpft wird. Es gibt zunächst das direkte Verfahren, bei dem der präparierte Zahnstumpf direkt vom Intraoralscanner (IOS) erfasst wird. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die analoge Abformung digital zu scannen, was einen indirekten Ansatz darstellt (s. Kapitel 3.1.3).

3.2.1 Digitaler Workflow zur Herstellung einer Einzelzahnkrone

Der digitale Workflow beginnt mit der Präparation des Zahnes. Die intraorale Situation wird anschließend mit Hilfe eines IOS in einen digitalen Datensatz umgewandelt.^{109, 133} Nun liegt ein Rohdatensatz in Form einer Punktwolke vor. Jeder Punkt stellt dabei eine Raumkoordinate dar.¹³³ Zunächst muss kontrolliert werden, ob der Datensatz vollständig ist. Ist er es nicht, kann der fehlende Bereich nachgescannt werden. Dies bietet einen Vorteil gegenüber der analogen Abformung, welche bei einer Fehlstelle komplett verworfen werden muss. Der Datensatz muss nun nachbearbeitet werden und in eine Form gebracht werden, die den Datenaustausch mit anderen Geräten erlaubt. Um eine Vereinheitlichung der Datensätze zu erreichen, hat sich als Datenformat *Standard Tessellation Language* (STL) durchgesetzt.¹¹⁹ Bei diesem Datenformat wird die darzustellende Oberfläche durch kleine Dreiecke verkörpert. Anschließend kann mit Hilfe dieses Datensatzes Zahnersatz konstruiert werden, was in einer CAD-Software erfolgt.

Der Zahnersatz kann danach, sofern die Zahnarztpraxis über die entsprechenden Geräte verfügt, direkt in der Zahnarztpraxis hergestellt werden, also „*chairside*“. Die CAM-Software berechnet nun die Daten, die für den Fräsvorgang nötig sind. Bei der Herstellung des Zahnersatzes kann zwischen subtraktiver und additiver Fertigung unterschieden werden. Bei der subtraktiven Fertigung wird aus Rohlingen der gewünschte Zahnersatz

herausgefräst. Hierfür gibt es eine Vielzahl von Materialien zur Auswahl, so dass der digitale Herstellungsweg dem analogen in fast nichts nachsteht. Bei der additiven Fertigung können zum Beispiel 3D-Druck-Verfahren zum Einsatz kommen. Ein Vorteil, der durch das Chairside-Verfahren deutlich wird, ist, dass der Patient in nur einer Sitzung mit Zahnersatz versorgt werden kann.^{119, 133}

Die Herstellung von Zahnersatz kann auch „*labside*“ im Zahntechniklabor oder im industriellen Fräszentrum erfolgen. Dazu werden die Daten des IOS digital an das Zahntechniklabor übermittelt. Die Fertigung kann ebenfalls subtraktiv oder additiv erfolgen. Zusätzlich kann bei Bedarf der Zahnersatz auch nach der maschinellen Fertigung noch manuell verblendet werden.¹⁵ Der Zahnarzt erhält anschließend den fertigen Zahnersatz zur Eingliederung in den Patientenmund. Bei der „*labside*“ Fertigung von Zahnersatz ist eine Eingliederung des Zahnersatzes in derselben Behandlungssitzung nicht möglich.¹²

Der digitale Workflow zur Herstellung einer Einzelzahnkrone wird in Abb. 3.3 dargestellt.

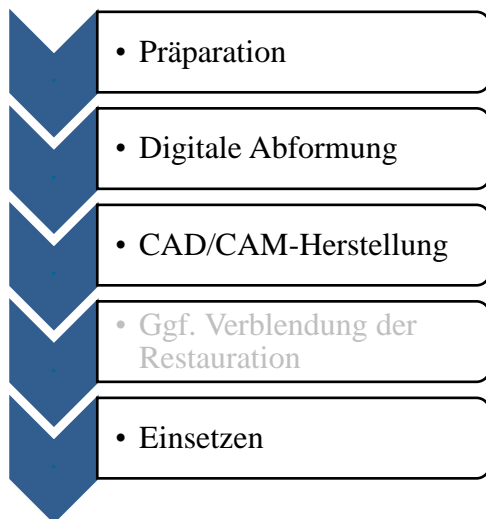


Abb. 3.3: Digitaler Workflow.¹²

3.2.2 Primescan AC

In der vorliegenden Studie wurde der IOS Primescan AC (*Version 5.2, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland*) verwendet. Aus diesem Grund wird in dieser Studie nur der Primescan AC IOS näher erläutert. Dieser IOS ist seit 2019 auf dem Dentalmarkt erhältlich. Der IOS verwendet ein neues Aufnahmeprinzip, die optische Hochfrequenz-Kontrastanalyse. Laut Herstellerangaben ist es möglich, bis zu eine Millionen 3D Bildpunkte pro Sekunde zu erfassen. Außerdem ist es möglich, auch tiefere Bereiche (bis zu 20 mm) zu scannen. Dies ist vor allem für subgingival gelegene Präparationsgrenzen interessant. Die Software sorgt dafür, dass überflüssige Datensätze, wie zum Beispiel Wange oder Zunge, direkt beim Scannen ausgeschnitten werden. Die optische Hochfrequenz-Kontrastanalyse ist eine Kombination aus zwei Verfahren, der Streifenlichtprojektion und der konfokalen Mikroskopie. Der Primescan AC IOS wies in einer Studie, verglichen mit fünf weiteren IOS, die höchste Genauigkeit auf.³⁵ Dies belegen auch diverse andere Studien.^{23, 48 147}

Für den Primescan AC gibt es verschiedene Scanspitzen. Es gibt zum einen eine Einweg-Scanspitze aus Kunststoff (EI). Außerdem ist eine autoklavierbare Mehrweg-Scanspitze aus Edelstahl (AU) verfügbar. Des Weiteren gibt es eine wischdesinfizierbare Mehrweg-Scanspitze, ebenfalls aus Edelstahl (WI). Die Genauigkeit der Scanergebnisse ist unabhängig von der verwendeten Scanspitze.⁹³

3.2.3 Bewertung der digitalen Abformung

Die digitale Abformung bietet zweifellos einige Vorteile. Die Qualität des gefertigten Zahnersatzes ist gut vergleichbar und reproduzierbar durch die digitale Herstellung.⁷⁹ Außerdem ist die Herstellungszeit im Vergleich zu analog gefertigtem Zahnersatz deutlich verkürzt.⁸⁵ Dadurch ist digital gefertigter Zahnersatz oft auch günstiger als analog gefertigter. Der Patient muss, wenn der Zahnersatz „*chairside*“ angefertigt wird, nur einmal anreisen, was im Hinblick auf den PCF ebenfalls von Vorteil ist. Eine Studie aus England identifizierte die An- und Abreise der Patienten als den größten Kohlenstoffdioxidemittenten, welcher bei einer zahnmedizinischen Behandlung anfällt.⁴⁹ Eine wesentliche Stärke der digitalen Abformung besteht darin, dass bei Bedarf ein fehlerhaft aufgenommenen Bereich selektiv nachgescannt werden kann. Ein weiterer Vorteil ist die Unabhängigkeit von Zahntechniklaboren. Die Genauigkeit der digitalen

Abformung steht derjenigen der analogen Abformung in nichts nach.³ In einigen Studien zeigte die digitale Abformung bereits eine höhere Genauigkeit als die analoge Abformung.^{13, 59}

Ein Nachteil der digitalen Abformung sind die hohen Anschaffungskosten eines IOS.¹⁵¹ Der digitale Workflow stellt außerdem hohe Ansprüche an das technische Wissen des Behandlers. Beim Auftreten von Fehlern im digitalen Workflow sind die technischen Ursachen für einen unerfahrenen Behandler schwieriger zu identifizieren als beim analogen Workflow.¹³³

Die digitale Abformung basiert auf optischen Systemen. Somit können nur einsehbare Bereiche erfasst werden. Supra- und equigingivale Präparationsgrenzen stellen somit kein Problem dar. Bei adäquater Retraktion ist eine subgingivale Präparationsgrenze per se keine Kontraindikation für eine digitale Abformung. Eine mögliche Fehlerquelle ist die mangelhafte Trockenlegung des abzuformenden Bereichs. Die Trockenlegung und Retraktion sind bei der digitalen Abformung ebenso wichtig wie bei der analogen Abformung. Die häufigsten Fehlerquellen bei der digitalen Abformung sind unter anderem die unsachgemäße Platzierung des IOS in der Mundhöhle und unzureichende Daten.⁷⁶ Fällt Letzteres nicht frühzeitig auf, kann es zu Folgefehlern kommen. Wenn beispielsweise die Präparationsgrenze oder der Gegenkiefer nicht richtig dargestellt sind, passt im schlimmsten Fall die hergestellte Restauration nicht und muss neu angefertigt werden. Des Weiteren ist die Kalibrierung des IOS wichtig und kann die Genauigkeit des Scans deutlich verbessern. Bei fehlender Kalibrierung können Ungenauigkeiten die Folge sein.¹¹¹ In diversen Studien wurde der Patientenkomfort der digitalen Abformung untersucht. Die Patienten präferierten in insgesamt elf klinischen Studien die digitale Abformung.¹²⁸

3.2.4 Relevanz der digitalen Abformung

Zunächst ist von Interesse, in welchem Ausmaß die digitale Abformung bereits in Zahnarztpraxen implementiert wurde. Mit steigender Verbreitung dieser Alternative zur analogen Abformung wächst auch die Dringlichkeit der Frage, welches der beiden Verfahren den kleineren PCF hat. Zum Stand der Digitalisierung in Zahnarztpraxen wurde 2025 eine Studie durchgeführt. 31 % der Befragten gaben an, einen IOS in ihrer Zahnarztpraxis zu verwenden. Es wurde auch abgefragt, wie verschiedene Behandlungen durchgeführt werden. Im Fall der Präzisionsabformung gaben 65 % der Befragten an, die Präzisionsabformung analog durchzuführen. Ca. 5 % führten die Präzisionsabformung ausschließlich digital durch und 2 % führten die Präzisionsabformung analog und digital durch. Bei der Situationsabformung gaben 73 % der Befragten an, die Situationsabformung analog durchzuführen. Ca. 3 % führten die Situationsabformung ausschließlich digital durch. Zur Frage, ob die Praxen eine weitere Digitalisierung planen, gaben 20 % der Befragten an, dies innerhalb des nächsten Jahres, 37 % innerhalb der nächsten fünf Jahre und 6 % innerhalb der nächsten zehn Jahre umsetzen zu wollen. Somit lässt sich sagen, dass die Digitalisierung bereits in viele Zahnarztpraxen Einzug gehalten hat. Der digitale Workflow stellt jedoch noch kein Standardprozedere dar. Es ist jedoch der Trend hin zum digitalen Wandel erkennbar.¹¹⁷

3.3 Nachhaltigkeit in der Zahnmedizin

Nachhaltigkeit in der Zahnmedizin umfasst nicht nur die Reduktion des ökologischen Fußabdrucks von Zahnarztpraxen, sondern auch eine ressourcenschonende und langfristige Versorgung der Patienten. Ein zentrales Ziel dabei, ist die Minimierung des Materialverbrauchs sowie die Reduktion des Abfallaufkommens, was zudem zu Kostensenkungen führen kann. Ferner spielt die Energieeffizienz eine zentrale Rolle, da durch den Einsatz energieeffizienter Geräte und Technologien im Betrieb von Zahnarztpraxen und Zahntechniklaboren eine Optimierung des Ressourcenverbrauchs und der Betriebskosten erreicht werden kann. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Nachhaltigkeit betrifft die Langlebigkeit der eingesetzten Materialien. Die Nutzung von langlebigen Lösungen, welche die Lebensdauer von Zahnersatz verlängern, kann die Notwendigkeit wiederholter Behandlungen und Eingriffe reduzieren. Darüber hinaus ist die Vermeidung schädlicher Stoffe von Bedeutung. Der Verzicht auf toxische Chemikalien und Materialien trägt sowohl zur Verringerung gesundheitlicher als auch ökologischer Risiken bei und fördert eine nachhaltigere Zahnmedizin.

Um alle nachfolgenden Werte zum Thema PCF besser einordnen zu können, befinden sich in der Tab. 3.2 Vergleichswerte zu alltäglichen Geschehen. Der PCF wird in der überwiegenden Mehrheit der Studien und auch in dieser Studie in der Einheit [kgCO₂eq] angegeben.

Tab. 3.2: Einordnung PCF im Alltag.

Vorgang	Stromverbrauch [kWh]	PCF [kgCO ₂ eq]
Autofahrt, Verbrauch 6,6l/100km, Benzin, 11 km ⁷⁰	-	2,1
Erzeugung einer Kilowattstunde Strom 2021 in Deutschland ¹³⁴	-	0,48
20 min Föhnen (1500 Watt)	0,25	0,24
1 Jahr lang täglich Handy aufladen	3	1,44
Zwei Stunden Video Streamen	0,22	0,212
1 Liter Wasser zum Kochen bringen	0,1	0,048

Zu Beginn ist eine gründliche Analyse der gegenwärtigen Situation erforderlich. Die Erhebung des Status quo ist von entscheidender Bedeutung, um potenzielle Ansatzpunkte für Optimierungen zu identifizieren. Der Gesundheitssektor stellt insbesondere in Industrieländern eine erhebliche Quelle für CO₂-Emissionen dar. Laut zahlreicher Studien entfallen etwa 5-10 % der gesamten jährlichen CO₂-Emissionen in den Industrieländern auf den Gesundheitssektor.^{44, 45, 73, 104, 130} Bisher kann aber noch keine Aussage getroffen werden, welchen ökologischen Fußabdruck die Zahnmedizin als Ganzes hat. Eine Studie aus England beispielsweise identifizierte die Anreise der Patienten als den größten Faktor für CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit einer zahnmedizinischen Behandlung. Mit 31,1 % liegt der Anteil bei beinahe einem Drittel des Gesamtausstoßes an CO₂.⁴⁹ Eine andere Studie kommt zu dem Ergebnis, dass der Anteil der Patientenreise an einer zahnmedizinischen Behandlung bei 45,1 % liegt.⁴⁰ Eine Reduktion der Behandlungssitzungen kann also bereits eine große CO₂-Einsparung bedeuten.

Zahnärztliche Behandlungen können oft schon weit im Vorfeld durch Prävention verhindert werden. Wenn eine Krone oder Füllung gar nicht erst (neu) angefertigt werden muss, stellt dies sicherlich die umweltfreundlichste Option dar.¹⁶ Ein weiteres Beispiel ist die Verwendung von elektrischen Zahnbürsten oder das Auftragen von Fluoridlacken. Beides hat im ersten Moment einen größeren PCF als die Alternativen (Handzahnbürste bzw. kein Auftragen von Fluoridlack). Auf lange Sicht können diese Maßnahmen jedoch eine zahnmedizinische Behandlung verhindern und sparen so Kohlenstoffdioxid ein.^{87, 89} Ist die Notwendigkeit einer zahnmedizinischen Behandlung doch irgendwann gegeben, gibt es auch hier Möglichkeiten, CO₂ einzusparen. Beispielsweise können durch eine gut durchdachte Behandlungsplanung unnötige Zahnarztbesuche verhindert werden.⁵²

Eine weitere Möglichkeit ist die Digitalisierung. Ein Beispiel ist die Chairside-Herstellung von Zahnersatz, die es ermöglicht, den Patienten in nur einer Behandlungssitzung mit definitivem Zahnersatz zu versorgen. Jede eingesparte Sitzung bedeutet eine Reduktion der Anreisewege von Patienten. Dies führt dazu, dass weniger CO₂ ausgestoßen wird. Im Fall der Chairside-Herstellung von Zahnersatz fällt zusätzlich der Transportweg ins Zahntechniklabor weg, sofern dieses außerhalb der Zahnarztpraxis liegt. Laut der Deutschen Gesellschaft für Praxislabore schicken 68 % der Zahnarztpraxen ihre Arbeiten in ein externes Zahntechniklabor.¹⁰⁷

Es existieren grundlegende Prinzipien der Nachhaltigkeit, die für alle Sektoren von Bedeutung sind. Ein energieeffizient gedämmtes Gebäude ist beispielsweise umweltfreundlicher als ein altes, schlecht isoliertes Gebäude. Dies gilt natürlich auch für Zahnarztpraxen und Kliniken. Das Anbringen von Solarpaneelen oder Windturbinen ist eine weitere Strategie zu mehr Nachhaltigkeit, die für viele Bereiche funktioniert. Sie kann auch im medizinischen Kontext eingesetzt werden.^{37, 89, 39}

Auch das persönliche Verhalten, welches im Privaten vielleicht schon selbstverständlich ist, kann auf die berufliche Umgebung übertragen werden. So kann die Verschwendung von Ressourcen wie Energie, Materialien oder Wasser vermieden werden.⁵⁷

Ein weiteres zentrales Thema der Nachhaltigkeitsüberlegungen in der Zahnmedizin ist die Menge an Abfall, die bei jeder Behandlung anfällt. Gegenstände, die in Kontakt mit Patienten kommen, sind hinterher kontaminiert und müssen gereinigt oder entsorgt werden. Noch gibt es viele Einwegprodukte, die aber eventuell auch durch Mehrwegprodukte ersetzt werden können. Einerseits, um Kohlenstoffdioxid einzusparen, andererseits auch, weil die Qualität von Einwegprodukten häufig geringer ist als die von Mehrwegprodukten. Auch der Patient profitiert von der Verwendung hochwertiger Produkte. Eine Studie untersuchte die Umweltfreundlichkeit von wiederverwendbaren Bohrern im Vergleich zu Einweg-Bohrern. Die Mehrweg-Bohrer waren bis zu 40 % umweltfreundlicher als die Einweg-Bohrer.^{78, 89} Es gibt zahllose weitere Beispiele, welche Einweg-Produkte durch Mehrweg-Alternativen ersetzt werden können. So zum Beispiel Handtücher, Lätzchen, Becher, Einwegschrürzen und vieles mehr.^{54, 96}

Ein weiterer wesentlicher Faktor neben Einwegprodukten ist das Thema Verpackungen. Gerade im chirurgischen Bereich sind viele Instrumente steril verpackt. 33 % des Mülls bei zahnmedizinischen Operationen sind Verpackungen. Mehrweg-Verpackungen oder eine Reduktion der Verpackungen können helfen, den Müll zu reduzieren.^{9, 95, 96}

Darüber hinaus konzentrieren sich andere Ansätze auf die Papierreduktion. Der Einsatz digitaler Technologie für Patientenakten, elektronische Erinnerungen und die Verwendung von Tablets zur Erfassung klinischer Beurteilungen von Patienten (insbesondere Formulare wie die Anamnese) können helfen den Papierverbrauch zu senken. Der Papierverbrauch kann auch durch intelligenteres und kostengünstigeres Drucken (doppelseitiges, dünneres Papier, geeignete Schriftart) reduziert werden.^{38, 54, 96}

Ein weiterer einfach umzusetzender Aspekt ist die Mülltrennung. Eine effektive Abfalltrennung ermöglicht es, viele Materialien zu recyceln. Durch die Reduzierung des verbrannten Mülls wird die Umwelt entlastet. Besonders Papier und Pappe, die in Zahnarztpraxen häufig anfallen, lassen sich gut trennen und somit recyceln.¹¹³ Die Voraussetzung für das Recycling von Materialien ist stets, dass diese nicht mit Körperflüssigkeiten kontaminiert sind.

Eine weitere Studie untersuchte die Abfallkreisläufe im medizinischen Sektor. Dabei wurde zwischen kommunalem und infiziertem Abfall unterschieden. Hinsichtlich der quantitativen Verteilung könnte dem biomedizinischen Abfall ein Anteil von 95 % zugeordnet werden. Auch besonders gefährliche oder giftige Abfälle wurden identifiziert. So weist die Studie vor allem auf Amalgam und dem darin enthaltenen Quecksilber, Röntgenabfällen, Biozid-aktive Reinigungsmittel sowie Gipsabfällen aus der analogen Abformung hin. Biozid-aktive Substanzen bzw. Sterilisationsmittel könnten die Entstehung von multiresistenten Keimen begünstigen und bakterielle Zersetzungsprozesse in Kläranlagen stören. Das Abformmaterial Polyvinylsiloxan bewertet die Studie aufgrund der langen Zersetzungszeit von bis zu 20 Jahren als kritisch. Außerdem wird für Polyvinylsiloxan ein EU-weites jährliches Gesamtmüllaufkommen von über einer Millionen Kilogramm und für Alginat 1,7 Millionen Liter genannt.⁵

Die Rückgewinnung und das Recycling von Dentalgips sind theoretisch möglich.⁶ Es ist allerdings fraglich ob das Recycling potentiell kontaminierter Materialien wie Dentalgips sich mit den Entsorgungsrichtlinien im medizinischen Bereich vereinbaren lässt.

Bei medizinischen Geräten kommt es irgendwann vor, dass ein einzelnes Teil defekt ist und ersetzt werden muss. In der Vergangenheit traten häufig Probleme mit den Herstellern auf, da Ersatzteile nicht verfügbar waren, was dazu führte, dass das gesamte Gerät entsorgt werden musste. Seit 2024 gibt es eine neue Richtlinie seitens des Europäischen Parlaments, welche das „Recht auf Reparierbarkeit“ festlegt. Dies kann in Zukunft zur Ressourcenschonung beitragen.¹⁰⁵

*Borglin et al.*¹⁴ untersuchten eine Vorsorgeuntersuchung in einer hypothetischen Zahnarztpraxis. Seife und Reinigungsmittel wurden als Hauptverursacher von umweltschädlichen Einflüssen genannt. Auch Einwegschrürzen und Edelstahlinstrumente haben einen hohen Anteil an den Gesamtauswirkungen. Allerdings ist zu erwähnen, dass die Studie mit 500 Nutzungszyklen für Edelstahlinstrumente und nur 50 Zyklen für

Arbeitskleidung eine sehr pessimistische Berechnungsgrundlage wählte. Im Bereich der Treibhausgas-Emissionen entfällt ein besonders hoher Anteil von 60 % auf den Reiseaufwand der Patienten und Angestellten. Das Gesamtergebnis wird in diesem Bereich mit 0,73 kgCO₂eq angegeben.¹⁴

Eine weitere Studie beschäftigte sich mit der Wurzelkanalbehandlung. *Duane et al.*³⁶ kommen zu einer Gesamtbelastung von 4,9 kgCO₂eq und identifizieren auch hier Reiniger, Einwegschrürzen und Edelmetallinstrumente als die primären Einflussfaktoren. Für diese Studie werden An- und Abreisevorgänge allerdings nicht berücksichtigt.³⁶

*Rawan Hussein Abed*² untersuchte in seiner Dissertation unter anderem acht verschiedene Interdentalprodukte, darunter Nylon-Zahnseide, Bambus-Zahnseide, *Floss Picks* und *Sponge Floss* sowie Interdentalbürsten aus Plastik oder Bambus mit verschiedenen Nutzungsparametern. Er kommt zu dem Ergebnis, dass Bambusbürsten oder Bürsten mit austauschbarem Kopf am nachhaltigsten sind. Dabei werden zahlreiche Wirkungskategorien betrachtet. Um einen Eindruck von der Größenordnung zu bekommen, genügt jedoch ein Blick auf die Treibhausgas-Emissionen. Konkret errechnet er einen Wert von 1,31 kgCO₂eq für die tägliche Reinigung mit Bambusbürsten über fünf Jahre hinweg und 11,42 kgCO₂eq für *Floss picks*, die vergleichsweise schwache Ergebnisse erzielten.²

Eine weitere Studie konzentrierte sich auf die Ökobilanzierung von Alginat. Dabei wurden allerdings lediglich die für die Herstellung nötigen Materialien berücksichtigt, nicht aber der Transport der Algen vom Sammelort zur Fabrik. Eine Aufstellung der Materialien findet sich in Tab. 3.3.¹⁰⁶

Tab. 3.3 : Alginat Bilanz.¹⁰⁶

Pro kg Natriumalginat, nach dem Alginsäureverfahren		
Input-Ströme		
Algen	kg	6,993
Fräsen/Zerkleinern: Strom, Mittelspannung	kWh	0,347
Heizung: Strom, Mittelspannung	kWh	7,416
Leitungswasser	l	172,308
Soda, pulverförmig	g	323,78
Salzsäure, 30% in Wasser	g	50,99
Ethanol aus Ethylen	g	331,05
Output-Ströme		
Behandlung, Abwasser	l	171,126

In einer Studie von 2022 wurde der ökologische Fußabdruck von Einweg- und Mehrwegtüchern für die Dekontamination klinischer Oberflächen untersucht. Im Rahmen der Studie erfolgte zunächst eine Analyse der geltenden Richtlinien zur Oberflächendekontamination im Gesundheitswesen. Anschließend wurde eine Ökobilanz durchgeführt, um die Auswirkungen von wiederverwendbaren Baumwoll- und Mikrofasertüchern im Vergleich zu herkömmlichen Einwegtüchern mit drei kompatiblen Desinfektionsmitteln zu vergleichen. Sieben Länder wurden in die Prüfung der Politik einbezogen. Für die Lebenszyklusanalyse wurden Input- und Output-Ströme sowie Prozesse über den gesamten Lebenszyklus hinweg berücksichtigt, wobei die Ecoinvent 3.10 Datenbank und die Software Open LCIA verwendet wurden. Es wurden 16 von der EU empfohlene Kategorien für Umweltauswirkungen und acht Kategorien für die menschliche Gesundheit berücksichtigt. Das Desinfektionsmittel mit der größten Umweltbelastung war Isopropylalkohol. Die umweltverträglichste Option für die Dekontamination klinischer Oberflächen war das Mikrofasertuch, wenn es mit einer Ammoniumverbindung verwendet wurde. Die am wenigsten umweltverträgliche Option war Baumwolle mit Isopropylalkohol.⁸⁸

In einer Studie von *Smith et al.*¹²⁹ wurden drei verschiedene Materialien für direkte Restaurationen untersucht. Eine Lebenszyklusanalyse wurde durchgeführt, um die Umwelteinflüsse der verschiedenen Materialien zu erfassen. Dabei wies Amalgam den höchsten PCF auf. Amalgam enthält einen Anteil Silber, dessen hoher PCF maßgeblich zu diesem Ergebnis beiträgt.¹²⁹

Eine weitere Lebenszyklusanalyse im zahnmedizinischen Bereich von *Bortoli et al.*⁸³ untersuchte verschiedene Materialien zur Herstellung von Implantaten. Hierbei stellte sich Keramik als umweltfreundlicher als Metall heraus.⁸³

*Duane et al.*⁴¹ untersuchten in einer Produkt-Lebenszyklusanalyse den Umwelteinfluss von Handhygiene in Form von Desinfektionsmitteln oder klassischem Waschen der Hände. Die beiden Verfahren wurden über ein Jahr hinweg betrachtet. Die Desinfektion der Hände hatte insgesamt einen geringeren Umwelteinfluss. Es wurden auch verschiedene Desinfektionsmittel untersucht, wobei das Desinfektionsmittel auf Isopropanolbasis das umweltfreundlichste war.⁴¹ Zu beachten ist, dass im Sinne des Arbeitsschutzes die Händedesinfektion hautschonender ist, als das Händewaschen nach jeder Behandlung.

In einer weiteren Lebenszyklusanalyse wurden Basis-Behandlungssets untersucht. Es wurde ein wiederverwendbares Edelstahlset, bestehend aus Spiegel, Sonde und Pinzette, mit einem Einweg-Set verglichen. Die beiden Produkte wurden in 16 Kategorien und acht Gesundheitskriterien miteinander verglichen. Das Einweg-Set verbrauchte dabei 300 % mehr Kohlenstoffdioxid als die wiederverwendbare Version.²²

Auch in anderen Bereichen der Medizin gibt es bereits Studien zur Nachhaltigkeit. Die Anästhesiologie ist aufgrund der verwendeten volatilen Anästhetika ein erheblicher Emittent von Treibhausgasen. Dies sind Treibhausgase, welche teilweise eine erheblich stärkere Treibhauswirkung als Kohlenstoffdioxid haben. Desfluran hat ein 2.540 höheres, Sevofluran ein 130 höheres Treibhauspotenzial als CO₂.¹¹⁸ Lachgas übersteigt die Treibhauswirkung von Kohlenstoffdioxid um das 298fache.¹⁸ Lachgas wird auch in der Zahnmedizin zur Angstlinderung und Analgesie verwendet.⁷⁵ In einigen Kliniken wird bereits auf Grundlage dieser Studien insbesondere auf die Verwendung von Desfluran verzichtet.¹¹⁸

3.3.1 Lebenszyklusanalysen und PCF-Untersuchungen

Im vorherigen Abschnitt wurden bereits einige Beispielstudien genannt, welche sich mit dem PCF von Produkten oder Prozessen im Gesundheitswesen beschäftigten. Die Methode, um eine PCF-Berechnung durchzuführen, ist in der Literatur in verschiedenen Protokollen beschrieben. Die allgemeinste Methode ist die Lebenszyklusanalyse. Diese ist in den Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 definiert.^{42, 43} Eine Lebenszyklusanalyse kann verschiedene Wirkungskategorien untersuchen. Eine Übersicht über verschiedene Wirkungskategorien findet sich in der Tab. 3.4. Das Ziel einer Lebenszyklusanalyse ist es, die Umwelteinflüsse, die durch ein Produkt oder einen Prozess ausgelöst werden, zu ermitteln.^{42, 43, 71}

Tab. 3.4: Wirkungskategorien Lebenszyklusanalysen.⁷¹

Wirkungskategorie	Schutzgüter
Treibhauseffekt	Menschliche Gesundheit
Versauerung von Böden	
Eutrophierung von Gewässern	Qualität von Ökosystemen
Abbau der Ozonschicht	
Sommersmog	Ressourcen
Ökotoxizität	
Humantoxizität	

Eine Unterform der Lebenszyklusanalyse ist die PCF-Berechnung. Der PCF beschreibt die Menge aller Kohlenstoffdioxid-Emissionen, die im Laufe eines Produktlebens entstehen. Es kann auch ein bestimmtes Verfahren oder eine Dienstleistung betrachtet werden. Der PCF wird bestimmt, um die Klimawirksamkeit von Produkten und Verfahren zu bewerten. Die Wirkungskategorie hierbei ist der Treibhauseffekt. Diese hat vor allem wegen der politischen Relevanz in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Zur Bilanzierung eines PCF gibt es verschiedene Protokolle. In den verschiedenen Protokollen werden Vorgaben zum methodischen Vorgehen definiert. In Detailfragen unterscheiden sich die verschiedenen Protokolle jedoch. Im Folgenden sollen die wichtigsten Methoden zur Kohlenstoffdioxid-Bilanzierung erläutert werden.⁷¹

In Deutschland gibt es das „*Memorandum Carbon Footprint*“.¹⁹ Dieses fordert zum Beispiel die Erfassung direkter und indirekter Landnutzungsänderung in einem PCF. Eine direkte Landnutzungsänderung liegt vor, wenn auf einer Fläche, die vormals Wald war, nun Lebensmittel angebaut werden. Die dadurch entfernten Pflanzen geben das in Ihnen gespeicherte Kohlenstoffdioxid wieder in die Atmosphäre ab. Der Prozess funktioniert jedoch auch umgekehrt. Von indirekter Landnutzungsänderung spricht man, wenn auf einer Fläche, die vorher zum Anbau von Lebensmitteln genutzt wurde, nun Pflanzen mit anderem Nutzungszweck wie Ölpalmen oder Baumwolle angebaut werden. Denn dadurch muss nun eine andere Fläche zum Anbau von Lebensmitteln umgenutzt werden.¹⁹

Die Norm DIN EN ISO 14064-1 ist vor allem im deutschsprachigen Raum üblich und wird bei der Bilanzierung des PCF von Unternehmen häufig verwendet. Durch oxygene Photosynthese können Pflanzen mit Hilfe von Wasser Kohlenstoffdioxid in gebundenen Kohlenstoff umwandeln. Sie fungieren also gewissermaßen als Kohlenstoffdioxid-Speicher. Die Frage, inwiefern ein bestimmtes Produkt Kohlenstoffdioxid speichert, hat Auswirkungen auf dessen PCF. Das gebundene Kohlenstoffdioxid wird erstmal der Atmosphäre entzogen, jedoch später auch wieder freigesetzt. Wann das Kohlenstoffdioxid genau freigesetzt wird, ist allerdings meist nicht abschätzbar. Die Norm DIN EN ISO 14064-1 schlägt vor, dieses gespeicherte (biogene) Kohlenstoffdioxid separat zu bilanzieren und nicht mit dem PCF zu verrechnen. Andere Protokolle haben eine andere Herangehensweise und betrachten das biogene Kohlenstoffdioxid nicht getrennt vom sonstigen im Prozess vorkommenden Kohlenstoffdioxid. Des Weiteren sieht die Norm DIN EN ISO 14064-1 die Erfassung direkter Landnutzungsänderungen vor, sofern diese für die Ergebnisse signifikant waren. Dabei richtet sich die Norm nach den Vorgaben des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).¹³⁷ Das IPCC wurde 1988 als internationale Institution gegründet. Das Ziel dieser Einrichtung ist es wissenschaftlich validierte Informationen für politische Entscheidungsträger zusammenzutragen. Seitens des IPCC wurde 2006 erstmals eine international anerkannte Guideline zur Berechnung von Treibhausgasbilanzen verfasst. 2019 wurde die Methodik noch einmal angepasst.¹

Die Norm DIN EN ISO 14067 befasst sich mit dem PCF von Produkten. Dabei wird ausschließlich die Wirkungskategorie „Klimawandel“ untersucht. Es wird also nur nach dem PCF geschaut. Die Norm inkludiert nicht die Verrechnung von CO₂, wenn beispielsweise durch das untersuchte Produkt CO₂ eingespart werden kann.¹³⁶

Die „*Publicly Available Specification 2050*“ wurde durch die British Standards Institution (BSI) festgelegt. Bei der Diskussion um die Erfassung der Landnutzungsänderung sieht dieses Protokoll lediglich eine Erfassung der direkten Landnutzungsänderung vor. Weiterhin ist die Berechnung des Stroms aus erneuerbaren Energien im PCF ein Spannungsfeld in den verschiedenen Protokollen. Die „*Publicly Available Specification 2050*“ sieht vor, den Strom aus erneuerbaren Energien ausschließlich dann mit einzubeziehen, wenn eine Dopplung der Erfassung durch den landesspezifischen Strommix ausgeschlossen werden kann. Aus dem Stromnetz hinzugekaufter Strom kann somit nie als Strom aus erneuerbaren Energien berechnet werden. Die Norm DIN EN ISO 14064-1 hat einen ähnlichen Berechnungsansatz.⁶⁵

Der Corporate Standard des „*Greenhouse Gas Protocols*“ (GHG-Protokoll) definiert Leitlinien für Unternehmen und andere Organisationen, die einen PCF auf Unternehmensebene erstellen wollen. Das Protokoll wurde durch das World Resources Institute und das World Business Council for Sustainable Development verfasst. In Bezug auf die Frage, inwiefern Strom aus erneuerbaren Energien in die Berechnungen mit einbezogen werden sollte, empfiehlt das GHG-Protokoll die spezifischen Treibhausgasemissionen des Stromanbieters für die Bilanzierung zu verwenden.¹⁴⁰

Zusätzlich gibt es Indikatoren zur Bewertung von PCFs wie beispielsweise den Global Warming Potentials 100 (GWP 100). Neben Kohlenstoffdioxid gibt es, noch einige weitere Treibhausgase wie Methan, Lachgas, fluorierte Treibhausgase, perfluorierte Kohlenwasserstoffe und Schwefelhexafluorid. Seit 2015 wird auch Stickstofftrifluorid dazugerechnet. Die klimaschädliche Wirkung dieser Gase zu vergleichen ist schwierig, da sie unterschiedlich lange in der Atmosphäre verweilen. Auch die Wirkung in der Atmosphäre ist unterschiedlich. Um die verschiedenen Treibhausgase vergleichbar zu machen, gibt es das Konzept der GWPs. Dabei wird die Klimawirkung eines bestimmten Gases für einen bestimmten Zeitraum auf Kohlenstoffdioxid bezogen. Dieser Zeitraum beträgt in den meisten Berechnungen 100 Jahre.¹⁸

3.3.2 Lebenszyklusanalyse

Die Zusammenfassung einer komplexen Umwelt in eine einzige Analyse gestaltet sich oft als schwierig. Viele Faktoren müssen berücksichtigt werden, um ein möglichst präzises und realistisches Ergebnis zu erzielen. Es gibt verschiedene Methoden, die Umwelt zu bewerten. Eine davon ist die Lebenszyklusanalyse. Diese kann mit Schwerpunkt auf Treibhausgasemissionen durchgeführt werden, welche Anwendung in der vorliegenden Studie findet. Die Lebenszyklusanalyse mit Schwerpunkt auf Treibhausgasemissionen wird auch als Carbon-Footprint-Ökoanalyse bezeichnet. Die Lebenszyklusanalyse ist international in den Normen DIN EN ISO 14044 und DIN EN ISO 14040 festgelegt und somit standardisiert. Das Ziel einer Lebenszyklusanalyse ist es, die Umwelteinflüsse, die durch ein Produkt oder einen Prozess ausgelöst werden, zu ermitteln.^{42, 43, 71}

Schritte einer Lebenszyklusanalyse

Die Analyse eines Lebenszyklus umfasst verschiedene Schritte. Sie wird aufgeteilt in

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung.^{42, 43, 71, 98}

Die Abb. 3.3 zeigt eine schematische Übersicht.

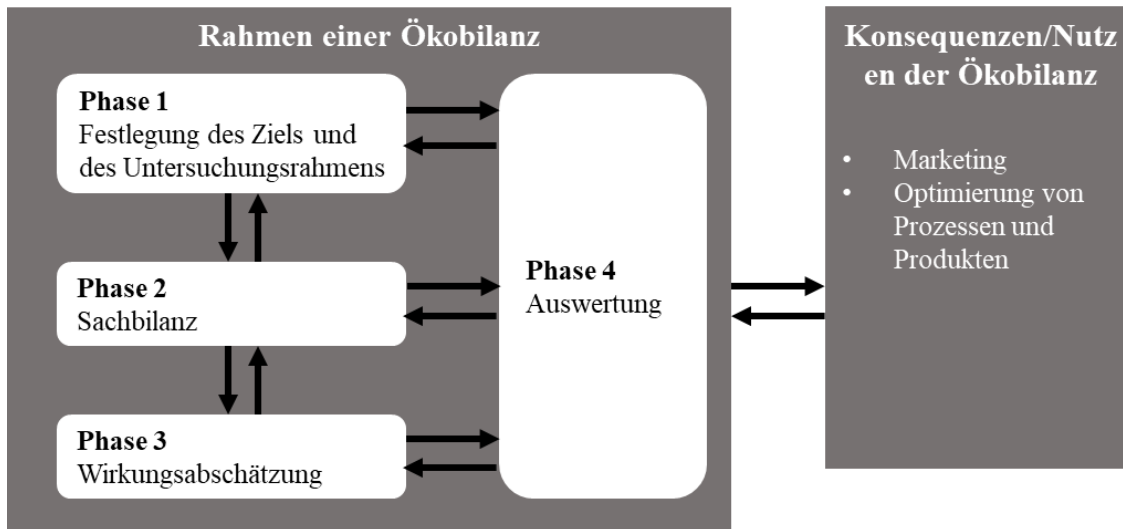


Abb. 3.3: Schritte einer Ökobilanz.⁷¹

Zieldefinition

Bei einer Umweltbewertung müssen zu Beginn die Ziele der Untersuchung und das betrachtete Objekt festgelegt werden. Auch den Rahmen der Analyse gilt es zu bestimmen. Das Ziel einer Umweltbewertung kann eine umfassende Bewertung aller Umwelteinflüsse des Untersuchungsobjekts sein. In diesem Fall werden zwei Produkte oder Prozesse bezüglich ihres PCF miteinander verglichen. Die zu vergleichende Produkte oder Prozesse müssen in ihrem Nutzen und in ihrer Anwendung identisch sein. Um das zu gewährleisten, wird zu Beginn eine funktionelle Einheit festgelegt, diese beschreibt einen festgelegten Nutzen.⁷¹

Sachbilanz

In der Sachbilanz werden alle In- und Outputs für den zu untersuchenden Prozess bestimmt. Relevant sind alle Materialien, sowohl Mehrweg- als auch Einwegprodukte. Auch die Verpackungen der Materialien sowie deren Lieferwege müssen berücksichtigt werden. Die Entsorgung der Abfälle nach Abschluss des Prozesses wurde ebenfalls in die Gesamtbetrachtung des Verfahrens einbezogen. Des Weiteren spielen die Strom- und Wasserverbräuche der verwendeten Maschinen eine Rolle. Es ergibt sich dadurch ein recht komplexes Systemflussbild.⁷¹

Wirkungsabschätzung

Bei der Wirkungsabschätzung wird auf Grundlage der Sachbilanz ermittelt, welche Umweltauswirkungen der untersuchte Prozess haben kann. Bei der Wirkungsabschätzung muss vorher eine Wirkungskategorie festgelegt werden. Die Wirkungsabschätzung muss also schon ganz zu Beginn der Ökoanalyse bedacht werden. Mögliche Wirkungskategorien sind beispielsweise Klimaänderungen, anthropogener Treibhauseffekt, Versauerung von Ökosystemen und mehr.⁷¹

Auswertung

Die letzte Phase einer Ökobilanzierung beschäftigt sich mit der Auswertung der Ergebnisse. Es werden relevante Faktoren mit besonders hohem Impact bestimmt. Daraus lassen sich dann Schlussfolgerungen ziehen und Handlungsempfehlungen ableiten.⁷¹ Es gilt zu beachten, dass nach einer ersten Auswertung unbedingt Rückschlüsse zu den vorangegangenen Schritten zu ziehen sind. So sollten besonders Positionen mit hohem Anteil am Gesamtergebnis mit höherem Detailgrad betrachtet werden. Das kann bedeuten, dass In- und Outputs in ihrer Zusammensetzung weiter aufgeteilt werden sollten, oder aber, dass Unsicherheiten hinsichtlich der Mengen durch noch mehr Versuche verringert werden.

3.3.3 Abfallmanagement im Gesundheitswesen

Die Entsorgung medizinischer Abfälle ist über verschiedene Richtlinien geregelt, zum Beispiel das Infektionsschutzgesetz, die Biostoffverordnung, die Empfehlungen der Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention (KRINKO) oder den Leitfaden zur Abfallentsorgung der Länderarbeitsgemeinschaft. Zu unterscheiden sind verschiedene Arten von Abfall, wie im Folgenden näher erläutert wird.⁶⁴

Pappe und Papier, welches frei von Sekreten, Exkreten oder Blut ist, kann nach Abfallschlüsselnummer (AS) 150101 entsorgt werden und wird somit wie normales Altpapier behandelt. Altpapier wird standardmäßig recycelt.⁹²

Auch Verpackungen, die frei von Sekreten, Exkreten oder Blut sind, können im normalen Verpackungsmüll entsorgt werden.⁹²

In Zahnarztpraxen fallen auch spitze oder scharfe Gegenstände als Müll an. Diese müssen in bruch sicheren Behältnissen gesammelt und nach AS 180101 entsorgt werden. Die verschlossenen Behältnisse werden mit dem Hausmüll entsorgt.⁹²

Einwegartikel, die mit Blut, Sekreten oder Exkreten kontaminiert sind, müssen nach AS 180104 entsorgt werden. Dazu gehören auch dentale Abformmaterialien, Tupfer, Watterollen und Handschuhe. Die Sammelbehälter müssen reißfest, feuchtigkeitsbeständig und dicht sein. Diese Behälter können vom öffentlich-rechtlichen Entsorger abgeholt und der Hausmüllverbrennung zugeführt werden.⁹²

Labor- und Chemikalienabfälle, wie zum Beispiel Desinfektionsmittel, müssen nach AS 180106 entsorgt werden. Die Chemikalien werden somit entweder als Sonderabfall verbrannt oder durch chemisch-physikalische Behandlungsverfahren aufbereitet. Im Folgenden werden die so zu entsorgenden Abfälle als „gefährliche Chemikalien“ bezeichnet.

Infektiöse Abfälle, das heißt Abfälle, die mit meldepflichtigen Krankheitserregern (HIV, Tuberkulose, Diphtherie, etc.) in Kontakt kamen, müssen in gesonderten Behältnissen gesammelt werden. Diese Behälter müssen bis zur endgültigen Verbrennung verschlossen bleiben.⁹²

Amalgam sollte in eigenen Behältern gesammelt und getrennt entsorgt werden. Auch in den Behandlungseinheiten müssen sich Amalgamabscheider befinden.⁹²

4 Material und Methode

4.1 Methodikübersicht

Die Methode, welche zur Kohlenstoffdioxid-Bilanzierung in dieser Studie verwendet wurde, richtet sich nach DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 und den Richtlinien des IPCC.⁴³ Der Schwerpunkt wird in dieser Studie auf den PCF gelegt. Die Wirkungskategorie dieser Studie ist somit der Treibhauseffekt (Tab. 4.1). Diese Methode wurde bereits in vielen anderen Studien erfolgreich zur Ökobilanzierung verwendet.^{36, 87} Da in der vorliegenden Studie der Fokus speziell auf den PCF gelegt wurde, gibt es in der Methodik die Spezifikation, dass als Indikator GWP 100 verwendet wurde.

Tab. 4.1: Wirkungskategorie Treibhauseffekt.⁷¹

Wirkungskategorie	Einheit	Kurzbeschreibung
Treibhauseffekt	kgCO ₂ eq je Produkteinheit	Bezeichnet die Erwärmung der Atmosphäre in Folge der vom Menschen verursachten Freisetzung von klimawirksamen Gasen. Neben Kohlenstoffdioxid (CO ₂) werden auch Methan (CH ₄) und Lachgas (Distickstoffoxid, N ₂ O) sowie eine Reihe von Spurengasen erfasst.

Die Berechnung des PCF der einzelnen Abformmethoden erfolgt über die Software Umberto (*iPoint-systems GmbH, Softwareversion 11, Reutlingen, Deutschland*) sowie ein eigens dafür entwickeltes Excel-Tool. Hier wurden alle Input- und Output-Ströme erfasst und auf Basis der erhobenen Daten der PCF errechnet.

Die Ergebnisse dieser Studie sind in der Einheit [kgCO₂eq] angegeben. Diese Einheit macht die Klimawirkung unterschiedlicher Treibhausgase vergleichbar. Es gibt neben Kohlenstoffdioxid noch andere Treibhausgase wie Wasserdampf, Methan oder Lachgas. Bei der Einheit [kgCO₂eq] wird die Menge eines Treibhausgases in die Menge

Kohlenstoffdioxid umgerechnet, die über denselben Zeitraum, dieselbe Erwärmung der Erde nach sich zieht. Bei dieser Rechnung ist das Treibhauspotenzial des jeweiligen Gases im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid der Faktor, mit dem gerechnet wird. Es wird meist mit einem Zeitraum von 100 Jahren gerechnet, um eine bessere Vergleichbarkeit zu erreichen.

Trotz gewissenhafter Datenerhebung ist es schwierig, alle Eventualitäten zu berücksichtigen. Eine PCF-Berechnung ist daher stets als eine Annäherung an die Realität zu betrachten. Um zu evaluieren, wie sich die Unsicherheiten in der Datenerhebung auf die spätere Bewertung des PCF auswirken, wird eine Monte-Carlo-Simulation mit Hilfe der Software Crystal Ball (*Softwareversion 11.3.0.0, ORACLE Deutschland B.V. & Co. KG, München, Deutschland*) durch die Technische Hochschule Mittelhessen durchgeführt. Die Simulation kann später helfen, die Unsicherheiten in der Datengrundlage zu bereinigen.

Diese Studie wurde durch die Firma Dentsply Sirona und den Strategischer Forschungsfonds der Technischen Hochschule Mittelhessen, Modul C „Aufbau und Ausbau profilbildender Forschungsschwerpunkte in Kooperation mit Universitäten“ im Sinne einer Forschungsförderung unterstützt. Im Rahmen der durchgeführten Studie übernahm Andre Daum von der Technischen Hochschule Mittelhessen die Modellierung des PCFs. Außerdem führt er die Monte-Carlo-Simulation durch.

4.2 Ziel, Untersuchungsrahmen und Systemgrenzen

4.2.1 Ziel

Das Ziel dieser Studie ist es, den *Product Carbon Footprint* (PCF) der analogen Abformung mit dem der digitalen Abformung zu vergleichen. Ausgangspunkt der Untersuchung ist die bisher unzureichende Datenlage im Bereich der Nachhaltigkeit in der Zahnmedizin. Des Weiteren wurde analysiert, welche Input- und Output-Ströme den PCF besonders stark beeinflussen. Darüber hinaus wurden die inhärenten Unsicherheiten der Datenbasis abgeschätzt und zur Verbesserung der Aussagekraft eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Aus den Ergebnissen sollen konkrete Handlungsempfehlungen für die zahnmedizinische Praxis abgeleitet werden.

4.2.2 Untersuchungsrahmen

Das Endprodukt muss bei beiden Abformmethoden vergleichbar sein. Es wurde daher festgelegt, dass das Endprodukt jeweils eine Positiv-Darstellung des abgeformten Bereichs ist. Im Fall der analogen Abformung handelt es sich dabei um ein physisches Gipsmodell. Im Fall der digitalen Abformung ist es ein digitales Modell. Beide Modelle erfüllen die Funktion, dass auf ihnen eine Einzelzahnkrone hergestellt werden kann. Dieses „Endprodukt“ ist die funktionelle Einheit bei der Berechnung des PCF.

Der beispielhafte Fall, auf den sich die Abformmethoden beziehen, ist die Herstellung einer Einzelzahnkrone im Molarenbereich.

Es wird außerdem als Setting eine imaginäre Beispielzahnarztpraxis betrachtet, welche möglichst repräsentativ für die durchschnittliche deutsche Zahnarztpraxis sein soll. Die Nutzung der Praxisräumlichkeiten wird nicht betrachtet.

Es wird davon ausgegangen, dass der Patient bereits angereist ist. Der Patiententransport wird nicht berücksichtigt.

Weiterhin wurde festgelegt, dass nur Instrumente in die Sachbilanz einfließen, welche unmittelbar an der Abformung beteiligt sind. Grundbesteck wie Spiegel, Sonde und Pinzette, die in nahezu jeder Behandlung auf dem Tray vorhanden sind, werden in der Herstellung nicht berücksichtigt. Die Reinigung der Grundinstrumente jedoch schon. Einweginstrumente und die drei verschiedenen Scanspitzen werden ebenfalls in ihrer Herstellung berücksichtigt.

Der Fokus liegt bei allen verwendeten Materialien auf Produkten der Firma Dentsply Sirona, da durch die Zusammenarbeit mit der Firma die benötigten originalen Materialdaten beschafft werden konnten. Aus diesem Grund wird auch als IOS die Primescan AC betrachtet. Die Herstellung der Materialien, die Verpackung und der Versand sowie die Entsorgung, werden in dieser Studie berücksichtigt.

Der Stromverbrauch der Maschinen, welche an den Abformmethoden beteiligt sind, wird in die Berechnung des PCF mit einbezogen. Auch Wartungsintervalle und die zur Wartung verwendeten Materialien werden berücksichtigt. Da die Stromverbräuche teilweise variabel sind, besteht hier eine Unsicherheit in der Datenerhebung, welche mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation bereinigt wurde. Die Herstellung der Maschinen wird in dieser Studie nicht mit einbezogen, da die Maschinen so viele Nutzungszyklen durchlaufen, dass die Herstellung nicht ins Gewicht fällt. Eine Ausnahme ist der IOS Primescan AC. Hier wird sowohl die Herstellung als auch die Nutzung betrachtet, da dies für den Vergleich der PCFs essenziell ist. Die Benutzung der Behandlungseinheit fließt ebenfalls in die Berechnung des PCF mit ein. Auch hier werden sowohl der Stromverbrauch als auch die Wartung mit einbezogen. Die Behandlungseinheit wird sowohl für die analoge als auch für die digitale Abformung benötigt.

In der untenstehenden Aufzählung sind die Grundannahmen festgehalten.

- Nur Prozess „Abformung“ berücksichtigt
- Beispielfall: Einzelzahnkrone, Molarenbereich, Restaurationsmaterial nicht definiert
- Endprodukt: Positiv-Abbildung des abgeformten Bereichs
- IOS Primescan AC der Firma Dentsply Sirona untersucht
- Abformmaterialien der Firma Dentsply Sirona werden untersucht
- Maschinen: Nur laufenden Verbräuche berücksichtigt, Ausnahme Primescan AC: hier auch Herstellung berücksichtigt
- Nur Instrumente in ihrer Herstellung betrachtet, die unmittelbar für die Abformung benötigt werden
- Nutzung der Praxisräumlichkeiten nicht betrachtet
- Kein Patiententransport berücksichtigt
- Mülltrennung in Altpapier und Restmüll
- Lieferwege mit Hilfe eines Seerouten Planers (*SeaRates, DP World, Dubai, Vereinigte Arabische Emirate*) und Google Maps (*Google, Mountain View, USA*) berechnet^{56, 139}
- Einzelverpackungen berücksichtigt, Gebindeverpackungen nicht
- Behandlungseinheit: Strom und Ressourcenverbrauch berücksichtigt
- Sockelformer zur Herstellung des Gipsmodells: Herstellung nicht berücksichtigt, Pflegeprodukte berücksichtigt

Die Annahmen zu den Anteilen der Materialien an einem Gebinde wurden aus dem Gewicht des Materials bei einer einzelnen Anwendung und dem Gesamtgewicht der Füllung der Packung berechnet. Bei einigen Materialien wie z. B. Handschuhen waren bereits Mengenangaben auf der Packung angegeben. Eine Auflistung aller Materialien findet sich in Tab. 12.1.

- Desinfektionsbad (*Zeta 7 Solution, Zhermack SpA, Badia Polesine Italien*): Desinfektion von zehn Abformungen
- Eine Flasche Haftlack (*Universaladhäsiv, Dentsply Sirona/ Fix Tray Adhesive for Alginate, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland*): 70 Portionen
- Sechs Bissregistratrate (*Aquasil Bite, Zhermack SpA, Badia Polesine Italien*) pro Kartusche
- 200 Handschuhe (*Vasco Nitril soft white, B. Braun, Melsungen, Deutschland*) pro Karton, Gewicht eines Handschuhs: Durchschnittsgröße aus XS/S/M/L/XL
- 80 OptraGate (*Ivoclar Vivadent, Ellwangen, Deutschland*) pro Karton
- 50 DryTips (*Microbrush International, Heidelberg, Deutschland*) pro Karton
- 80 Desinfektionstücher (*Mikrozid universal wipes premium, Schülke & Mayr GmbH, Norderstedt, Deutschland*) pro Packung

Der übergeordnete Fall ist die Herstellung einer Einzelzahnkrone im Molarenbereich. Dieser Prozess besteht aus mehreren Unterprozessen und ist in Abb. 4.1 dargestellt. Innerhalb der Aufnahmesitzung werden ggf. bereits eine Situations- sowie Versorgungsabformungen angefertigt. Im Anschluss kann die Präparation des Zahns erfolgen. Gegebenenfalls muss nach abgeschlossener Präparation und vor der Abformung noch ein Gewebemanagement durchgeführt werden, um Blutungen zu stillen oder die Präparationsgrenze darzustellen. Im Anschluss wird die Abformung durchgeführt. Es müssen natürlich auch der Gegenkiefer und die Bisssituation abgeformt werden. Dies kann entweder analog oder digital erfolgen. Diese Studie beschäftigt sich lediglich mit diesem Teilprozess „Abformung“. Im Anschluss wird ein Gipsmodell hergestellt bzw. im Falle des digitalen Workflows ein digitales Modell errechnet. Auf Grundlage des Modells kann im Anschluss die Einzelzahnkrone hergestellt werden. Die fertige Einzelzahnkrone kann im Anschluss in den Patientenmund eingegliedert werden. Die Systemgrenze umfasst den Bereich des Prozesses, der mit in die Berechnung des PCF einfließt. Die Systemgrenzen werden in Abb. 4.2 ersichtlich.



Abb. 4.1: Workflow zur Herstellung einer Einzelzahnkrone.

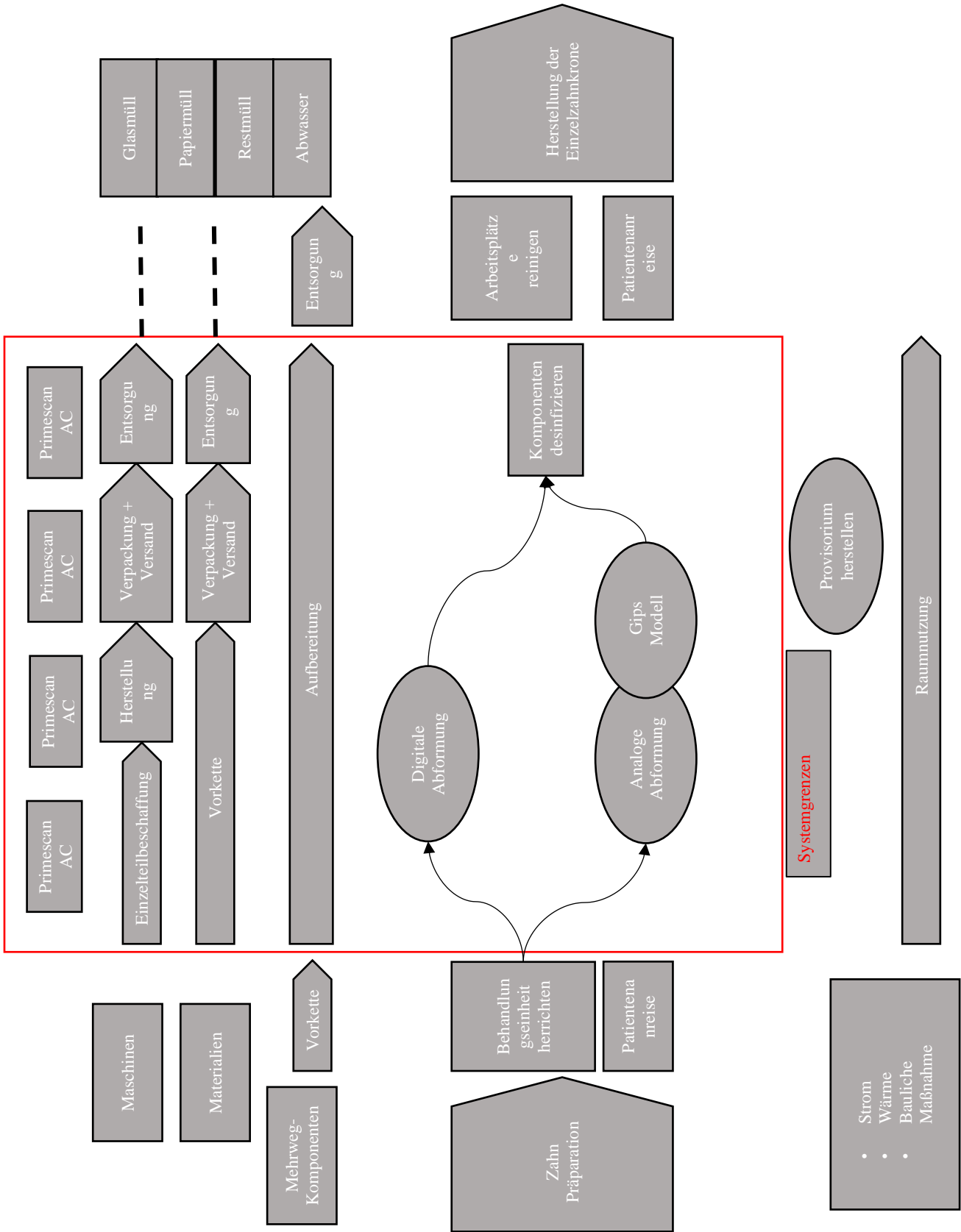


Abb. 4.2: Systemgrenzen.

4.3 Erstellung der Sachbilanz

Nachdem der Untersuchungsrahmen sowie die Systemgrenzen definiert wurden, kann nun mit der Erstellung der Sachbilanz fortgefahren werden. Hierfür wurden zunächst verschiedene Prozesse festgelegt, die in der untenstehenden Tab. 4.1 dargestellt sind. Im nächsten Schritt müssen für die einzelnen Prozesse sämtliche Komponenten und Ressourcen erfasst werden, die in die bei der jeweiligen analogen bzw. digitalen Abformung als Input- und Output-Ströme fließen.

Prozesse		
Analoge Abformung	Digitale Abformung	
Abformung durchführen (Präzision)	Abformung durchführen	
Abformung durchführen (Gegenkiefer)		
Bissregistrat	Scanspitze (WI) reinigen	Scanspitze (AU) autoklavieren
Abformung desinfizieren	Arbeitsplatz reinigen	Scanspitze (EI) entsorgen
Abformlöffel reinigen		
Herstellung Gipsmodell	Anteilige Herstellung Primescan AC	
Komponenten desinfizieren		
Arbeitsplatz reinigen		

Tab. 4.1: Prozesse analoger und digitaler Abformung innerhalb der Systemgrenzen.

Anschließend muss das Material bestimmt werden, aus dem die einzelnen Komponenten bestehen, einschließlich der Gewichtsermittlung. Im Fall von Strom muss der konkrete Stromverbrauch erfasst und gemessen werden. Eine Auflistung der Messgeräte findet sich in

Tab. 12.2. Für die meisten Materialien gibt es in der verwendeten Datenbank Ecoinvent 3.10 bereits bestehende Daten. Eine Auflistung aller in der Sachbilanz vorkommenden Materialien findet sich im Anhang (Kapitel 11). Das alles dient dazu, die bei der Herstellung und dem Transport der Materialien entstehende Menge Treibhausgase zu bestimmen. Es wird dabei der gesamte Lebensweg, der am untersuchten Verfahren beteiligten Materialien untersucht. Der Lebensweg eines Produktes beginnt bei der Rohstoffgewinnung, führt über Transportwege, Weiterverarbeitung und Verpackung bis zur Benutzung. Am Ende muss auch die Entsorgung berücksichtigt werden. Dieses Prinzip wird meistens als „Cradle to Grave“ bezeichnet (Abb. 4.3).⁷¹

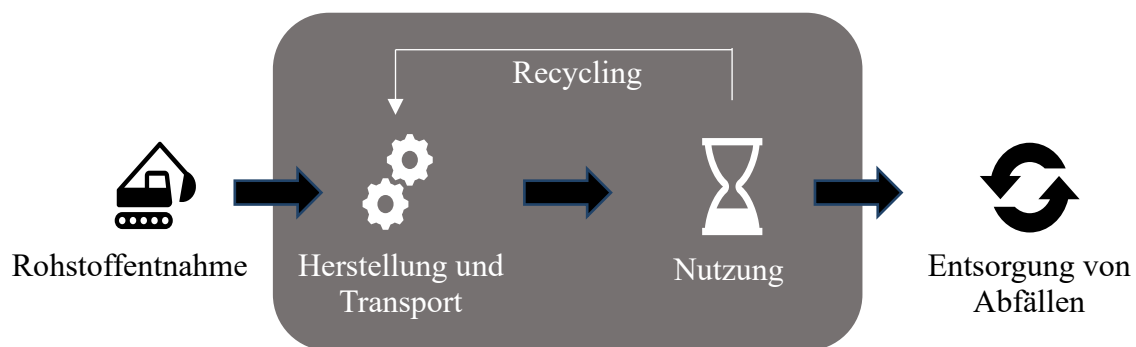


Abb. 4.3: Lebenszyklus eines Produkts.⁷¹

Für einige sehr dental-spezifische Materialien existierten bisher jedoch noch keine Daten. Beispielsweise das hier untersuchte A-Silikon existierte bisher in Bezug auf seinen PCF nicht in der genutzten Datenbank. Ebenso wenig das verwendete Alginat, der Gips und der Primescan AC. Daher müssen für diese Materialien erst neue Daten erhoben werden. Dazu müssen die einzelnen Bestandteile der Materialien, deren Ursprungsort und die Lieferketten berücksichtigt werden. Auch die Mittel, welche für die Instandhaltung und den Betrieb der Maschinen für die A-Silikon- und Alginat-Herstellung nötig sind, müssen berücksichtigt werden. Die dazu notwendigen Daten wurden bei den jeweiligen Herstellern in Erfahrung gebracht. So kann der PCF am Ende genau berechnet werden und muss nicht geschätzt werden, wie es häufig in anderen Studien vorkommt. Die Berechnung des PCF sowie die Monte-Carlo-Simulation wurde durch Andre Daum von der Technischen Hochschule Mittelhessen durchgeführt.

Für die Durchführung der verschiedenen Abformverfahren werden unterschiedliche Maschinen eingesetzt. Hier werden wie bereits erwähnt lediglich die Ressourcen für den „laufenden Betrieb“ berücksichtigt. Dies sind, zum Beispiel der Stromverbrauch oder Materialien und Ressourcen, die für eine Wartung benötigt werden. Eine Auflistung aller untersuchten Maschinen findet sich in Tab. 12.3.

4.3.1 Analoge Abformung

Der analoge Workflow beginnt mit der Abformung (A-Silikon) des präparierten Kiefers. In dieser Studie befindet sich der präparierte Zahn im Unterkiefer. Anschließend wird der Gegenkiefer abgeformt (Alginat) und zuletzt das Bissregistrat (A-Silikon) hergestellt. Die beiden Abformungen und das Bissregistrat müssen hinterher in einem Desinfektionsbad desinfiziert werden. Anschließend müssen die Abformlöffel gereinigt werden. Die Abformungen werden nun mit Gips ausgegossen. Die ausgehärteten Gipsmodelle werden anschließend versäubert und getrimmt. Die Mehrwegkomponenten müssen anschließend noch in den Thermodesinfektor, ein Gerät zur Reinigung und Desinfektion von wiederverwendbaren Medizinprodukten. Nachfolgend muss der Arbeitsplatz gereinigt werden. Die weitere Herstellung der Einzelzahnkrone wird nicht berücksichtigt.

Abformung (Präzision) – A-Silikon

Bei der analogen Abformung wird für den Kiefer, in dem sich der abzuformende Zahn befindet, in dieser Studie der Unterkiefer, eine Präzisionsabformung mit einem A-Silikon untersucht. Die Abformung wird mit der Doppelmischtechnik durchgeführt. Als Abformmaterial wird das Abformmaterial Aquasil Ultra+ Soft-Deca Putty (*Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland*) verwendet. Als dünnfließende Phase wird Aquasil Ultra + XLV (*Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland*) genutzt. Als Haftlack wurde ein Universaladhäsiv (*Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland*) eingesetzt. Es wurde ein Abformlöffel aus Metall angewandt. Der Strom der Behandlungseinheit (*Intego Pro, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland*) und des Silikonmischgeräts (*Pentamix 3, 3M ESPE, Kamen, Deutschland*) wurde in diesem Prozess mit bilanziert. Für die Assistenz und den Zahnarzt wurden zwei Paar Handschuhe für diesen Prozess berücksichtigt. Im Verlauf des Prozesses wurde die Flasche des Haftlacks anteilig als Altglas erfasst. Des Weiteren fielen anteilig die Verpackung der Handschuhe und des Haftlacks (Altpapier) und die gebrauchten A-Silikone (Restmüll) zur Entsorgung an.

Die Herstellung der verschiedenen Silikone fließt mit in die Berechnung des PCF ein. Dazu wurde die Fabrik (*Zhermack SpA, Via Bovazecchino 100, 45021 Badia Polesine (RO), Italien*) im März 2024 besichtigt, in welcher die Silikone hergestellt wurden. Es wurde der Gas-, Wasser- und Stromverbrauch der einzelnen Abteilungen der Fabrik erhoben. So konnte den einzelnen Abteilungen (z. B. „Silikonherstellung“) der Fabrik ein definierter Ressourcenverbrauch zugeordnet werden. Des Weiteren stellte die Firma Zhermack SpA Daten zur Verfügung, welche die verkaufte Menge der einzelnen Materialien aufzeigten. So konnte der Energieverbrauch der Fabrik auf das Kilogramm hergestellten Materials umgerechnet werden. Auch die Materialmengen, die bei der Herstellung in den Anrührgeräten der Fabrik verblieben und hinterher entsorgt wurden, wurden mit eingerechnet. Außerdem konnte durch den engen Kontakt mit Zhermack SpA eine genaue Zusammensetzung der Materialien ermittelt werden. Durch die Kenntnis der einzelnen Inhaltsstoffe konnte ein sehr genauer PCF errechnet werden.

Auch der Zeitaufwand der analogen Abformung ist relevant, da sich danach die Belegzeit der Behandlungseinheit richtet. Diese verbraucht ein gewisses Maß an Strom, der in die Berechnung des PCF mit einfließt. Der Zeitaufwand der analogen Abformung, bestehend aus Präzisionsabformung, Bissregistrat und Gegenkieferabformung, wurde im Vorfeld anhand von 15 Patientenfällen ermittelt. Die Zeit wurde bei verschiedenen Zahnärzten bestimmt. Es wurden die Einzelzeiten für Präzisionsabformung, Bissregistrat und Gegenkieferabformung gemessen. Diese Zeiten beinhalten jeweils die Auswahl des Löffels, das Bestreichen des Löffels mit Haftlack, die Durchführung der Abformung, den Abbindevorgang gemäß Herstellerangaben (3 Min. 50 Sek. Min. Abbindezeit) und die Entnahme und Inspektion der Abformung (Abb. 4.4).

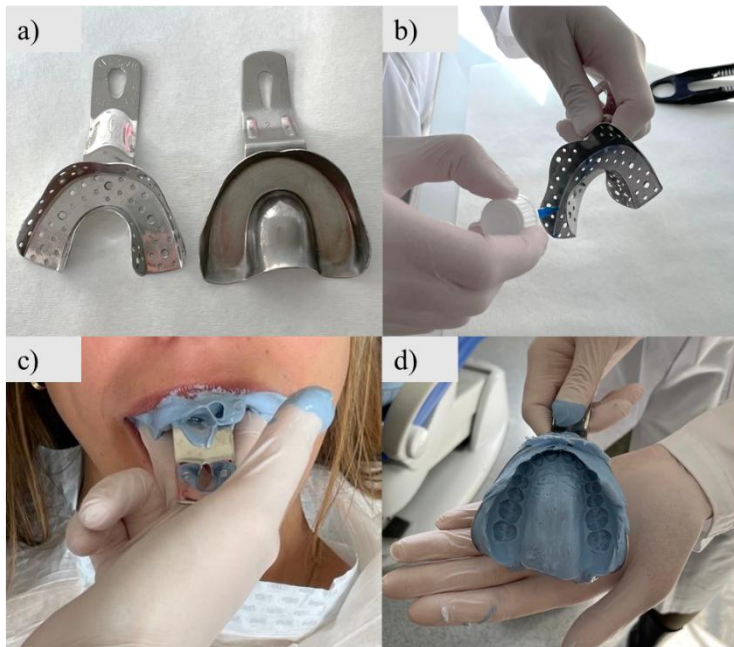


Abb. 4.4 Schritte Abformvorgang analog. a) Auswahl des Löffels, b) Bestreichen des Löffels mit Haftlack, c) Durchführung der Abformung d) Entnahme und Inspektion der Abformung

Im Fall des Bissregistrats beinhaltet die gemessene Zeit die Durchführung des Registrats, den Abbindevorgang gemäß Herstellerangaben (30 Sek.) und die Entnahme und Inspektion des Registrats. Auch die Wechselzeiten wurden gemessen und flossen mit in die Gesamtzeit ein. In den Wechselzeiten wurden die Komponenten für den nächsten Arbeitsschritt zurechtgelegt und die des vorherigen Arbeitsschritts beseitigt. Aus den 15 Patientenfällen wurde ein durchschnittlicher Zeitaufwand ermittelt.^{125, 127}

Durch die Versuche konnte auch ein durchschnittlicher Materialverbrauch ermittelt werden. Dazu wurde der Löffel mit dem Abformmaterial nach der Abformung gewogen, und das Gewicht des Löffels subtrahiert.

Es wurde außerdem die Zeit gemessen, welche zum Befüllen eines Abformlöffels mit dem Silikonanmischgerät nötig war. Eine Auflistung aller verwendeten Maschinen findet sich in Tab. 12.3.

Abformung (Gegenkiefer) – Alginat

Die Abformung des Gegenkiefers erfolgte mit dem Alginat Blueprint® Xcreme (*Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland*). Als Haftlack wurde Fix-Haftlack (*Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland*) eingesetzt. Für die Abformung wurde ein Abformlöffel aus Metall verwendet. Auch beim Alginat wurde die Fabrik (*Zhermack SpA, Via Bovazecchino 100, 45021 Badia Polesine (RO), Italien*) im März 2024 besichtigt und wiederum der Ressourcenverbrauch der Fabrik auf das Kilogramm hergestellten Materials umgerechnet. Der Stromverbrauch der Behandlungseinheit (*Intego Pro, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland*) und des Alginatanmischgeräts (*Cavex Alginat Mixer II, Cavex, Norden, Deutschland*) wurde in diesem Prozess mit bilanziert. Zum Anmischen des Alginats wurde Leitungswasser in die Sachbilanz mit aufgenommen. An Abfall fiel in diesem Prozess die Flasche des Haftlacks (Altglas) anteilig an. Des Weiteren fielen anteilig die Verpackung des Haftlacks (Altpapier) und das gebrauchte Alginat (Restmüll) an.

Bissregistrat

Das Bissregistrat wurde mit Aquasil-Bite (*Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland*) hergestellt. Hier wurde die Annahme getroffen, dass mit einer Kartusche sechs Bissregistrate hergestellt werden können. Der Strom der Behandlungseinheit wurde in diesem Prozess mit bilanziert. An Abfall fiel in diesem Prozess das gebrauchte A-Silikon (Restmüll) zur Entsorgung an.

Abformung desinfizieren

In diesem Prozess wird die fertige Abformung bzw. das Bissregistrat zur Desinfektion in ein Bad mit isopropanolhaltigem Desinfektionsmittel (*Zeta 7 Solution, Zhermack SpA, Badia Polesine, Italien*) gelegt. In der Sachbilanz sind das Desinfektionsmittel sowie anteilig die Flasche für das Desinfektionsmittel enthalten. Außerdem wird zur Verdünnung des Desinfektionsmittels Leitungswasser benötigt. An Abfall fiel in diesem Prozess die Kunststoffflasche für das Desinfektionsmittel (Restmüll) anteilig an. Des Weiteren fiel das Desinfektionsmittel (gefährliche Chemikalien) als Abfall an.

Abformlöffel reinigen

In diesem Prozess werden Leitungswasser zum Abspülen des Abformlöffels sowie Sterillium (*PAUL HARTMANN AG, Heidenheim, Deutschland*) zum Lösen der Haftlackreste und Papiertücher benötigt. Auch die Kunststoffflasche für das Desinfektionsmittel fließt anteilig in die Sachbilanz ein. An Abfall fielen in diesem Prozess anteilig die Kunststoffflasche für das Desinfektionsmittel und die Papiertücher (Restmüll) an. Des Weiteren fiel die Entsorgung von Abwasser an.

Herstellung Gipsmodell

Als Gips zur Modellherstellung (Abb. 4.5) wurde Elite Rock (*Zhermack SpA, Badia Polesine, Italien*) verwendet. Bei diesem Gips handelt es sich um einen Superhartgips, welcher für die Herstellung von festsitzendem Zahnersatz geeignet ist. Auch beim Gips wurde die Fabrik des Herstellers (*Zhermack SpA, Via Bovazecchino 100, 45021 BadiaPolesine (RO), Italien*) im März 2024 besichtigt und wiederum der Ressourcenverbrauch der Fabrik auf das Kilogramm hergestellten Materials umgerechnet.



Abb. 4.5 Gipsmodell.

Zur Herstellung des Gipsmodells wurde ein Sockelformer aus Silikon verwendet. Der Silikon-Sockelformer durchläuft so viele Nutzungszyklen, dass die Herstellung in dieser Studie nicht berücksichtigt wird. Des Weiteren wurde beim Anrühren des Gipses ein Vakuumanrührbecher (*Vakuumanrührbecher für Multivac, Degudent/Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland*), verwendet. Der Anrührbecher und ein Anrührspatel durchlaufen ebenfalls so viele Nutzungszyklen, dass die Herstellung dieser Komponenten bei der Berechnung des PCF nicht berücksichtigt wird. Für die Herstellung des Gipsmodells wurde der Strom für den Rüttler (*BEGO, Bremen, Deutschland*) und das Vakuumanrührgerät (*Multivac compact, Degussa dental, München, Deutschland*) berücksichtigt. Es wurde außerdem anteilig die Batterie für die Gipswaage (*KS 19 Black, Beurer, Ulm, Deutschland*) mit in die Sachbilanz aufgenommen. Zum Anmischen des Gipses wird destilliertes Wasser benötigt, die Kunststoffflasche und deren Herstellung werden in der Sachbilanz berücksichtigt. Da es für destilliertes Wasser keinen eigenen Datensatz in den einschlägigen Datenbanken gab, wurde der Datensatz für Leitungswasser angenommen. Abschließend wird das Gipsmodell getrimmt. Der Strom welcher für den Betrieb des Trimmers (*HSS-88, Wassermann, Hamburg, Deutschland*)

notwendig war, wurde in die Sachbilanz aufgenommen. An Abfall fiel in diesem Prozess die Batterie (Recycling) anteilig an. Des Weiteren fielen anteilig die Verpackung des Gips (Altpapier) und das gebrauchte Gipsmodell sowie anteilig die Kunststoffflasche für das destillierte Wasser (Restmüll) an. Es wurde außerdem die Zeit, welche der Rüttler bei der Herstellung eines Gipsmodells in Betrieb war, gemessen.

Komponenten desinfizieren

Im Prozess „Komponenten desinfizieren“ wurde die Reinigung der Abformlöffel im Thermodesinfektor (*PG 8591 [WWAD], Miele, Gütersloh, Deutschland*) untersucht. Das Wasser, welches für den Spülvorgang benötigt wird, ist in der Sachbilanz aufgeführt. Als Zusatzmittel werden ein Neutralisationsmittel sowie ein Flüssigreiniger und ein Nachspüler benötigt. Anteilig fließen auch deren Kunststoffflaschen in die Sachbilanz mit ein. Es wurde ein Paar Handschuhe für die Person aufgenommen, welche den Thermodesinfektor belädt. Die Handschuhe wurden entsprechend des Beladungsanteils der Instrumente an der Gesamtladung des Thermodesinfektor berechnet. An Abfall fielen in diesem Prozess das Abwasser sowie anteilig die Kunststoffflaschen der Spülmittel (Restmüll) an.

Der Stromverbrauch des Thermodesinfektors und des Autoklavs (*Vacuclave 318, Melag, Berlin, Deutschland*) ist ein wenig komplizierter zu ermitteln. Da das jeweilige Gerät nicht ausschließlich für die Instrumente der Abformungen läuft, muss der Anteil berechnet werden, welchen die Instrumente an der Füllung des Thermodesinfektors und des Autoklavs haben.

Im Fall des Thermodesinfektors wurde der Stromverbrauch anhand der Herstellerinformationen ermittelt. Anschließend, wurden das Volumen und das Gewicht der Instrumente bestimmt. Es wurde ein Messbecher mit 800 ml Wasser gefüllt und jeweils ein Instrument hinzugegeben. Das Volumen, welches nun hinzugekommen war, konnte einfach an der Skala des Messbechers abgelesen werden (Tab. 12.5). Nun wurde aus der vom Hersteller angegebenen Maximalfüllmenge des Thermodesinfektors dessen Volumen berechnet. So kann der Anteil, den die Instrumente an der Füllmenge haben, berechnet werden. Als alternative Methode zur Bestimmung des Beladungsanteils wurde die Anzahl der Instrumente herangezogen, die anschließend mit der Anzahl der für die

jeweiligen Prozesse relevanten Instrumente verrechnet wurde. Aus den beiden Werten wurde ein Durchschnittswert errechnet.

Der Autoklav war nur bei der autoklavierbaren Mehrweg-Scanspitze relevant. Als beispielhafter Autoklav wurde hier der Autoklav angenommen, da für diesen Autoklav gute Daten inklusive Stromverbrauch vorlagen. Es wurde das Universal-B-Programm als Berechnungsgrundlage verwendet, da dies das Standardprogramm ist. Der Anteil der autoklavierbaren Mehrweg-Scanspitze an der maximalen Beladung wurde auf zwei verschiedene Arten berechnet. Zunächst wurde entsprechend der Maße der Tablett, welche Bestandteil des Autoklaven sind, berechnet wie viele Scanspitzen in den Autoklaven passen. Daraus ergab sich der Beladungsanteil nach Anzahl der Instrumente. Dann wurde der Beladungsanteil nach Gewicht berechnet. Das bedeutet, das maximale Beladungsgewicht wurde mit dem Gewicht der Scanspitze verrechnet. Aus diesen beiden Beladungsanteilen wurde ein Durchschnitt gebildet. Der Stromverbrauch des Autoklavs wurde zum Schluss auf diesen Beladungsanteil heruntergerechnet.

Arbeitsplatz reinigen (Gipslabor und Behandlungseinheit)

In diesen Prozess flossen Papiertücher, Wasser und Scheuermilch (*Clean and Clever, Neumünster, Deutschland*) zum Reinigen der Arbeitsfläche mit ein. Die Flasche der Scheuermilch wurde anteilig berücksichtigt. Zur Reinigung der Behandlungseinheit wurden Desinfektionstücher und anteilig deren Verpackung in die Sachbilanz aufgenommen. Für die Person, welche die Behandlungseinheit reinigt, wurde ein Paar Handschuhe und anteilig deren Verpackung berücksichtigt. An Abfall fielen in diesem Prozess das Abwasser sowie anteilig die Handschuhe und die Papiertücher (Restmüll) an. Außerdem waren die Desinfektionstücher (gefährliche Chemikalien) und anteilig die Verpackung der Handschuhe (Altpapier) zu entsorgen.

Stromverbrauch der Maschinen und Behandlungseinheit

Der Stromverbrauch aller an den Abformmethoden beteiligten Maschinen muss wie oben erwähnt auch berücksichtigt werden. Zunächst muss bestimmt werden, wie lange die Belegzeit der einzelnen Maschinen während des Abformvorgangs ist. Für diese Zeit muss der Stromverbrauch mittels eines Strommessgerätes gemessen werden. Es wurde dazu der SEM5000, Energy Logger (*Voltcraft, Düsseldorf, Deutschland*) verwendet.

Auch der Stromverbrauch der Behandlungseinheit wurde ermittelt. Bei unterschiedlichen Belegzeiten bei der Anwendung der analogen beziehungsweise der digitalen Abformung fällt somit auch der Stromverbrauch der Behandlungseinheit unterschiedlich aus. Da die Behandlungseinheit fest mit dem Stromnetz verbunden ist, ließ sich keine Strommessung mit Hilfe eines Strommessgeräts durchführen. Die Daten zum Stromverbrauch der Behandlungseinheit wurden den Herstellerinformationen entnommen. Es waren Daten zum minimalen und maximalen Stromverbrauch verfügbar. Es wurde für 90 % der Belegzeit jedes Einzelprozesses der minimale Stromverbrauch und für 10 % der Belegzeit der maximale Stromverbrauch angenommen. Die durchschnittliche Zeit für einen Scan beispielsweise betrug 09:49 min. 10 % davon sind 59 Sekunden. Diese Zeit ist notwendig zur Trockenlegung (Püster und Absaugung). Die Behandlungseinheit benötigt in dieser Zeit mehr Strom. Die Stromverbräuche sind in Tab. 11.4 aufgeführt.

4.3.2 Digitale Abformung

Die digitale Abformung wurde mit dem Intraoralscanner Primescan AC (Cerec-Software Version 5.2, Dentsply Sirona) durchgeführt. Da es verschiedene Scanspitzen für dieses System gibt, wurden alle drei Möglichkeiten betrachtet (Abb. 4.6). Ein Grund für das Vorhandensein der verschiedenen Scanspitzen sind u.a. länderspezifische Hygienevorschriften. Es gibt zum einen eine Einweg-Scanspitze aus Kunststoff (EI). Außerdem ist eine autoklavierbare Mehrweg-Scanspitze aus Edelstahl (AU) verfügbar. Des Weiteren gibt es eine wischdesinfizierbare Mehrweg-Scanspitze, ebenfalls aus Edelstahl (WI).



Abb. 4.6: Übersicht der Scanspitzen für den Primescan AC.

Die Arbeitsabläufe unterscheiden sich bei den verschiedenen Scanspitzen nur im Hinblick auf die Reinigung bzw. Entsorgung. Die Einweg-Scanspitze wird nach erfolgtem Einsatz im Restmüll entsorgt. Die autoklavierbare Mehrweg-Scanspitze wird zunächst wischdesinfiziert, das Fenster wird entsorgt und anschließend wird die Scanspitze im Autoklaven sterilisiert. Die wischdesinfizierbare Mehrweg-Scanspitze wird mit einem Desinfektionstuch gereinigt.

Abformung durchführen

Die digitale Abformung beginnt mit der Erfassung der intraoralen Situation mittels eines Intraoralscanners. Dabei wird die analoge Ausgangssituation in einen virtuellen Datensatz überführt. An die Datenerfassung schließt sich die Datenverarbeitung an, bei der durch automatisierte Softwarealgorithmen (Cerec-Software 5.2) eine Filterung und Zusammenführung der aufgenommenen Scandaten erfolgt. Das Ergebnis ist ein optimierter Datensatz, der ein digitales Modell der intraoralen Verhältnisse darstellt. Die digitale Abformung besteht aus einem Scan des Oberkiefers (OK), einem Scan des Unterkiefers (UK) und einem Scan des Zusammenbisses. Das digitale Bissregistrat stellen hier die blauen Markierungen auf den Okklusalflächen dar (Abb. 4.7).

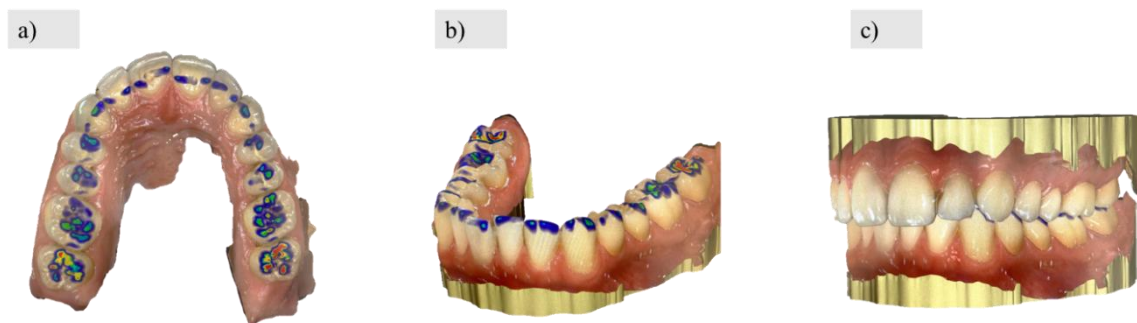


Abb. 4.7: Scan gesamt. a) Scan des Oberkiefers (OK), b) Scan des Unterkiefers (UK), c) Scan des Zusammenbisses.

Der IOS wurde nach Herstellerangabe verwendet und der vorgegebene Scanpfad eingehalten, wobei zuerst die Okklusalflächen, anschließend die Oralflächen und zum Schluss die Bukkalflächen der Zähne gescannt wurden. Zum Abhalten der Lippen wurde OpraGate (*Ivoclar Vivadent, Ellwangen, Deutschland*) verwendet. Zum Abhalten der Zunge wurde ein Holzspatel verwendet. Um die Zahnreihen während des Scans trocken zu halten, wurden DryTips (*Microbrush International, Heidelberg, Deutschland*) verwendet. Die Verpackungen der DryTips und des OpraGate wurden anteilig mitberücksichtigt. Es wurden zwei Paar Handschuhe (Zahnarzt + Assistenz) mit in die

Sachbilanz aufgenommen. Der Stromverbrauch der Behandlungseinheit wurde nach demselben Vorgehen berechnet, wie bereits bei der analogen Abformung beschrieben.

Der Stromverbrauch des Primescan AC wurde mithilfe von Messungen bestimmt. Dazu wurden 15 Patienten jeweils im Oberkiefer, Unterkiefer und Zusammenbiss gescannt. Die Patienten waren vollbezahnt, wobei das Vorhandensein von Weisheitszähnen nicht berücksichtigt wurde. Es wurde dabei jeweils die Zeit gemessen und der Stromverbrauch während dieser Zeit aufgezeichnet. Der Zeitaufwand ist ein wichtiger Faktor, da sich mit verlängerter Scanzeit auch der Stromverbrauch erhöht. Auch die Belegzeit und damit der Stromverbrauch der Behandlungseinheit erhöhen sich dadurch. Die Erfahrung des Zahnarztes spielt hier eine große Rolle. In diversen Studien wurde nachgewiesen, dass ein erfahrener Zahnarzt deutlich präziser und zeitsparender scannt als ein unerfahrener Zahnarzt.^{4, 112} Um diese Diskrepanz abzubilden, wurden die Scanzeiten sowohl bei einem unerfahrenen Zahnarzt als auch bei einem erfahrenen Zahnarzt gemessen. Aus den gemessenen Zeiten und Stromverbräuchen wurden Durchschnittswerte berechnet. Die ermittelten Werte wurden anschließend in die Unsicherheitsberechnung einbezogen, um die Bandbreite zwischen Anfänger und erfahrenem Zahnarzt abzubilden.

Der Ruhestrom, welchen der IOS in den Wechselzeiten verbraucht, wurde aufgezeichnet. Die Wechselzeit umfasste die Trockenlegung des Scanfeldes und die Vorbereitung des nächsten Scanschritts. Es wurde außerdem der Stromverbrauch des IOS bei der Berechnung der Modelle gemessen.

An Abfall fielen in diesem Prozess der Holzspatel, das OptraGate, die DryTips und die Handschuhe sowie die Kunststoff-Verpackungen der DryTips und des OptraGate (Restmüll) an. Außerdem musste die Entsorgung der Papier-Verpackungen der DryTips und des OptraGate (Altpapier) anteilig berücksichtigt werden.

Scanspitze reinigen (WI)

Im Rahmen dieses Prozesses wurden Desinfektionstücher als Reinigungsmaterial eingesetzt. Für die wischdesinfizierbare Mehrweg-Scanspitze wurde ein zusätzliches Desinfektionstuch berücksichtigt. Die Verpackung der Desinfektionstücher wurde anteilig in die Sachbilanz integriert. Für die Durchführung der Reinigung wurde ein Paar Handschuhe vorgesehen, deren Verpackung wurde ebenfalls anteilig bilanziert. Im Rahmen der Abfallentsorgung fielen die gebrauchten Handschuhe sowie anteilig die Verpackungen der Desinfektionstücher als Restmüll an. Die Desinfektionstücher sind aufgrund des enthaltenen Isopropanols als gefährlicher Abfall zu entsorgen. Die Verpackung der Handschuhe wurde anteilig als Altpapier in die Bilanz aufgenommen.

Scanspitze autoklavieren (AU)

Dieser Prozess ist nur bei Verwendung der autoklavierbaren Mehrweg-Scanspitze relevant. Es wird dabei, wie schon bei der analogen Abformung beschrieben, der Beladungsanteil des Autoklavs berechnet und darüber der anteilige Stromverbrauch ermittelt. Der Autoklav benötigte außer Strom noch Leitungswasser für den Reinigungsprozess. In den Prozess flossen außerdem ein Paar Handschuhe für die Person ein, welche den Autoklaven belädt. Die Handschuhe wurden entsprechend dem Anteil der Scanspitze an der Gesamtbeladung des Autoklavs (2 %) berechnet. Es wurde die sterile Verpackung für die Scanspitze mitbilanziert. An Abfall fiel ein Teil der sterilen Verpackung und anteilig die Verpackung der Handschuhe (Altpapier) an. Außerdem musste die Entsorgung der Handschuhe und des Plastikteils der sterilen Verpackung (Restmüll) berücksichtigt werden. Auch das Abwasser floss in die Sachbilanz mit ein.

Arbeitsplatz reinigen

Für diesen Prozess sind Desinfektionstücher essenziell. Die Verpackung der Desinfektionstücher wurde anteilig mit in die Sachbilanz aufgenommen. Es wurde ein Paar Handschuhe für die Person, welche die Reinigung durchführt, berücksichtigt. Deren Verpackung wurde ebenfalls anteilig berücksichtigt. An Abfall fielen die Handschuhe und anteilig die Verpackung der Desinfektionstücher (Restmüll) an. Die Desinfektionstücher (gefährliche Chemikalien) müssen ebenfalls entsorgt werden. Die Verpackung der Handschuhe (Altpapier) wurde ebenfalls berücksichtigt.

Scanspitze entsorgen (EI)

Die Verwendung der Einweg-Scanspitze wurde in die Sachbilanz einbezogen. Sowohl deren Herstellung als auch deren Entsorgung wurden berücksichtigt. Nach dem Scannen fällt die Einwegspitze als Restmüll an.

Anteilige Herstellung des Primescan AC

Die Herstellung des Primescan AC wurde ebenfalls mit in den PCF der digitalen Abformung einbezogen. Dazu ist es nötig, die Bestandteile der Einheit zu kennen. Für die einzelnen Bestandteile muss ebenfalls die gesamte Herstellungskette in die Berechnung des PCF einfließen. Dazu wurden direkt von der Herstellerfirma Dentsply Sirona Informationen bezogen. In einem öffentlich zugänglichen Recyclingpass des Primescan AC IOS konnte das Vorkommen verschiedener Materialien im IOS nachvollzogen werden.¹²⁶ Die Entsorgung der einzelnen Bauteile unterscheiden sich voneinander. Einige können recycelt werden, während andere speziell entsorgt werden müssen.¹²⁶ Nachdem die einzelnen Bestandteile des Primescan AC in Erfahrung gebracht worden waren, wurden die einzelnen Materialien mit Hilfe der Datenbank Ecoinvent 3.10 in die Sachbilanz aufgenommen.

Der Ressourcenaufwand, der für die Herstellung der Primescan AC nötig ist, muss zunächst als Gesamtes erfasst werden. Es musste ein Weg gefunden werden, den Ressourcenaufwand zur Herstellung des IOS auf die einzelne Abformung herunterzurechnen.

Zunächst wurde die Nutzungsdauer des IOS ermittelt. Laut Hersteller liegt die Lebensdauer bei ca. acht Jahren. Es wurden daher die Werte zwei, vier, sechs oder acht Jahre Lebensdauer angenommen. Pro Jahr wurde mit 220 Arbeitstagen gerechnet. Je länger der IOS genutzt werden kann, desto besser ist die Umweltverträglichkeit. Auch die Häufigkeit der Nutzung des IOS spielt eine Rolle. Je öfter der IOS benutzt wird, desto geringer ist der PCF der Herstellung des IOS auf die einzelne Abformung gesehen. Ein weiterer Faktor ist die Anzahl der Abformungen, die pro Tag mit dem Primescan AC zur Herstellung einer Einzelzahnkrone durchgeführt werden. Dafür wurden Daten der Kassenzahnärztlichen Vereinigungen (KZV) aus dem Jahr 2022 herangezogen.²¹ Insgesamt wurden 16,75 Mrd. € für zahnärztliche Behandlungen ausgegeben. Davon 3,87 Mrd. € für Zahnersatz. Der Prozentsatz der Versorgung mit Einzelzahnkronen beträgt 47,9 %. Eine Einzelzahnkrone kostet im einfachen Satz 94,37 €. Dies ergibt eine Anzahl von 196 Mio. Kronen pro Jahr in Deutschland. Wird die Gesamtzahl der hergestellten Kronen auf die Arbeitstage und die Anzahl der praktizierenden Zahnärzte in Deutschland aufgeteilt, ergibt sich ein Durchschnittswert von etwa 1,1 Kronen pro Tag und Zahnarzt. Eine Studie zum Stand der Digitalisierung von Zahnarztpraxen fand heraus, dass 26,79 % der Behandelnden die Abformung digital durchführen.¹⁷ Daraus ergeben sich 0,29

digitale Abformungen pro Tag und Behandelnden. Des Weiteren ist die Gesamtlaufzeit des IOS pro Tag zu beachten. Es wurde eine variable Laufzeit von 0 bis 8 Stunden pro Tag zugrunde gelegt, eine genauere Eingrenzung der Einsatzzeit war aus der Literatur nicht ersichtlich. Die Einsatzzeit pro Scan wurde durch eigene Versuche erhoben und lag im Durchschnitt bei 09:49 min. Diese vier Variablen wurden nun verwendet, um sich dem Anteil, den die Herstellung am PCF des IOS hat, zu nähern. In der untenstehenden Abbildung sind die Variablen zusammengefasst. Mit Hilfe der Variablen wurde eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt.

Der Anteil der Herstellung an der Nutzung der Primescan AC wurde mit der untenstehenden Formel berechnet (Abb. 4.8).

$$\text{Anteil Herstellung} \left[\frac{\text{kg} - \text{CO}_2 - \text{eq}}{\text{Abformung}} \right] = \frac{\text{Gesamtkosten} [\text{kg} - \text{CO}_2 - \text{eq}] * n_{\text{Abf.}}}{\text{ND in Arbeitstagen} [\text{d}] * \text{Abformung pro Tag} [\text{d}^{-1}]}$$

$$n_{\text{Abf.}} = \frac{\text{Abformung pro Tag} [\text{d}^{-1}] * \text{Dauer je Abformung} [\text{h}]}{\text{Einsatzzeit je Tag} \left[\frac{\text{h}}{\text{d}} \right]}$$

Abb. 4.8 Anteil Herstellung Primescan AC Formel. kgCO₂eq: Kilogramm CO₂-Äquivalent, $n_{\text{Abf.}}$: Anzahl der Abformungen, ND: Nutzungsdauer, d: Tag, h: Stunde.

4.4 Berechnung des PCF

Für die Berechnung des PCF wurde die Software Umberto (*Version 11, iPoint-systems GmbH, Reutlingen, Deutschland*) verwendet, ein modellbasiertes Tool zur Erstellung und Auswertung von Stoffstromnetzen im Rahmen von Lebenszyklusanalysen, welches auf Daten ausgewählter Datenbanken zugreift. Die Prozesse werden im Umberto-Modell als sogenannte Prozessknoten abgebildet und durch Stoffstromverbindungen verknüpft. Dabei werden Input- und Output-Ströme wie Rohstoffe, Energieverbräuche, Emissionen und Produkte erfasst. Die Kernaufgabe der Software ist jedoch die Berechnung des PCF. Nachdem alle benötigten Daten in die Software integriert wurden, konnte eine Berechnung durchgeführt werden. Für die Hintergrundprozesse wurde auf die Ökobilanzdatenbank Ecoinvent 3.10 zurückgegriffen (Tab. 12.6). Diese ermöglicht eine nachvollziehbare Bilanzierung. Für jede verwendete Komponente wird der gesamte Lebensweg betrachtet, an jeder Komponente der Sachbilanz hängen weitere Daten, welche die Herstellung, die Transportwege, die Verpackung etc. beschreiben.

4.5 Berechnung der Unsicherheiten in der Datenerhebung

Bei der Erstellung von Lebenszyklus Analysen herrscht ein großer Bedarf, die Unsicherheiten in der Datenerhebung durch verschiedene Methoden darzustellen und zu bereinigen. Dies ist besonders wichtig, da die Ergebnisse der Ökobilanz oft durch Daten mit unbekannter Zuverlässigkeit bestimmt werden. Die Ungewissheit wurde von *Walker et al.*¹³⁸ als „Abweichung von dem unerreichbaren Ideal einer vollständig deterministischen Kenntnis des betreffenden Systems“ (*Walker et al.*, 2003)¹³⁸ beschrieben. Die Autoren der Studie definierten drei Dimensionen der Unsicherheit:

1. „Den Ort, d. h. die Position der Unsicherheit innerhalb des Modellierungsrahmens
2. Das Niveau, d. h. der Grad der Unsicherheit
3. Die Art, d. h. die Beziehung der Unsicherheit zur Realität.“ (*Walker et al.*, 2003)¹³⁸

Die Unsicherheiten in den verschiedenen Phasen der Ökobilanz sollten möglichst vollständig aufgelistet werden und ihr Niveau qualitativ definiert werden. Bei der Charakterisierung der quantitativen Unsicherheit wird versucht, den Variabilitätsbereich der Daten je nach Bestimmungsmethode zu definieren. Mehrere Indikatoren werden üblicherweise verwendet: Intervalle (untere und obere Grenze), Varianz (Streuung), Wahrscheinlichkeitsverteilung (Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Zufallsvariable) und Möglichkeitsverteilung.

Der gängigste Ansatz zur Bestimmung von Datenunsicherheiten in der Ökobilanz ist die Monte-Carlo-Simulation.¹²² Diese Methode ist in allen gängigen LCA-Programmen (mit Ausnahme von Umberto LCA+) implementiert. Als Ausgangspunkt für die Monte-Carlo-Simulation wurde in dieser Studie eine Excel-Tabelle verwendet. Diese Zufallsstichprobenmethode erfordert eine hohe Anzahl von Simulationen, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten (in der Literatur werden 1000 bis 50.000 Durchläufe genannt), was zu einer Berechnungszeit von mehreren Stunden führt. Leider ist es schwierig, die Anzahl der erforderlichen Simulationen vorherzusagen. Normalerweise wird eine Faustregel von 10.000 Iterationen angewendet, um eine stabile Varianz zu gewährleisten.⁴⁷ Die Monte-Carlo-Simulation in dieser Studie wurde mit Hilfe der Software Crystal Ball durch Andre Daum von der Technischen Hochschule Mittelhessen mit jeweils 20.000 Iterationen durchgeführt.

Die Parameter, nach denen die Monte-Carlo-Simulation in dieser Studie durchgeführt wurde, sind in Tab. 12.7 und Tab. 12.8 aufgelistet.

Die Menge an Handschuhen, um die analoge und digitale Abformung durchzuführen, schwankt von ein bis drei Paar Handschuhen. Als wahrscheinlichster Wert (50 %) wurden zwei Paar Handschuhe angenommen. Jeweils ein Paar für den Zahnarzt und ein Paar für die Assistenz. Für den Fall, dass einer der Handschuhe reißt und ersetzt werden muss, wurden 2,5 Paar mit 5 % Wahrscheinlichkeit angenommen. Drei Paar Handschuhe wurde angenommen, für den Fall das ein Paar Handschuhe aufgrund von Verschmutzung oder Materialversagen komplett ersetzt werden muss (20 %). Des Weiteren wurde ein Paar Handschuhe für den Fall angenommen, dass der Zahnarzt oder die Assistenz die Abformung alleine durchführt (20 %). 1,5 Paar Handschuhe wurden angenommen, für den Fall, dass einer der Handschuhe reißt und ersetzt werden muss. Die Menge der Handschuhe, die für die Reinigung des Arbeitsplatzes und das Einräumen der Komponenten in den Thermodesinfektor bzw. Autoklaven angenommen wurde, schwankt zwischen ein bis zwei Paar Handschuhen. Ein Paar Handschuhe wurde mit 70 % Wahrscheinlichkeit angenommen. Dieses ist für die Assistenz vorgesehen. Für den Fall, dass einer der Handschuhe reißt und ersetzt werden muss, wurden 1,5 Paar Handschuhe (5 %) angenommen. Es wurden zwei Paar Handschuhe angenommen, für den Fall, dass ein Paar Handschuhe aufgrund von Verschmutzung oder Materialversagen komplett ersetzt werden muss (25 %).

Der Stromverbrauch der Behandlungseinheit, des Silikonanmischgeräts, des Rüttlers und des Intraoralscanners wurde innerhalb der gemessenen Versuchsergebnisse schwanken gelassen.

Das Desinfektionsbad für die Abformung wird laut Gebrauchsanweisung einmal pro Woche getauscht. Wie viele Abformungen darin in dieser Zeit desinfiziert werden, hebt oder senkt den Anteil, den das Desinfektionsbad am PCF der jeweiligen Abformung hat. Als wahrscheinlichster Wert wurden 2,5 Abformungen pro Woche angenommen. Diese Annahme beruht auf den Daten der KZV, nach denen berechnet wurde, dass pro Tag in etwa 0,5 Abformungen in einer deutschen Zahnarztpraxis durchgeführt werden.²¹ In einer Dreiecksverteilung wurde die Zahl der Abformungen pro Woche außerdem zwischen 1-25 Abformungen schwanken gelassen.

Die Menge an Papiertüchern und Desinfektionsmittel, die zur Reinigung eines Abformlöffels benötigt werden, richtet sich nach dem Verschmutzungsgrad des Abformlöffels. Dieser bewegte sich zwischen dem Faktor 0,5-1,5. Desinfektionsmittel, Papiertüchern und Wassermenge steigen im gleichen Verhältnis. Bei den Papiertüchern wurde eine Menge von +/- 2,5 angenommen. Bei Desinfektionsmittel +/- 50 % der Menge.

Bei der Reinigung des Arbeitsplatzes wurde ähnlich vorgegangen. Es wurde wieder ein Verschmutzungsgrad gebildet. Die Desinfektionstücher schwankten zwischen +/- 5, das Wasser betrug immer 1/5 der Papiertücher-Menge und die Scheuermilch immer 0,1 % der Wassermenge. Das Desinfektionstuch schwankte zwischen ein bis drei Stück. Diese Werte wurden anhand von Versuchen ermittelt.

Die Berechnung des Befüllungsanteils des Thermodesinfektors und Autoklavs wurde bereits weiter oben erläutert. Der Befüllungsanteil schwankte zwischen den errechneten 2 % bzw. 5,5 % und 100 %, für den Fall, dass die Komponenten einmal alleine desinfiziert/sterilisiert würden.

Das Fenster der autoklavierbaren Mehrweg-Scanspitze wird meist nur einmal benötigt (90 %). Für den Fall, dass das Fenster verschmutzt oder versehentlich unbrauchbar wird, wurde mit 10 % Wahrscheinlichkeit ein zweites Fenster angenommen.

Für 75 % der Fälle wurde ein OptraGate angenommen. Der Fall, dass sich der Behandelnde in der Größe verschätzt und ein zweites OptraGate verwendet werden muss, wurde mit einer Wahrscheinlichkeit von 25 % berücksichtigt.

Mit 80% Wahrscheinlichkeit wurden zwei DryTips angenommen. Für den Fall, dass der Patient einen starken Speichelfluss hat, wurden vier DryTips (20 %) angenommen.

Die Holzspatel schwankten zwischen ein bis zwei Stück. Je nach Vorliebe des Zahnarztes reicht diesem ein Holzspatel (80 %) zum Abhalten der Zunge, gelegentlich wird jedoch ein zweiter Holzspatel zum Abhalten der Wange benötigt (20 %).

Um den Arbeitsplatz zu reinigen, schwankte die Anzahl der getränkten Desinfektionstücher bei der digitalen Abformung für die Einweg-Scanspitze und die autoklavierbare Mehrweg-Scanspitze zwischen einem (15 %), zwei (70 %) und drei (15 %). Je nach Verschmutzung des Arbeitsplatzes. Bei der wischdesinfizierbaren Mehrweg-Scanspitze schwankte die Anzahl der getränkten Desinfektionstücher zwischen zwei bis vier Desinfektionstücher. Hier wurde ein Desinfektionstuch mehr zur Reinigung der wischdesinfizierbaren Mehrweg-Scanspitze angenommen.

4.6 Statistische Analyse

Die statistische Auswertung der Daten wurde mit dem Programm SPSS (Version 28, IBM SPSS Statistics, New York, USA) durchgeführt.

Zur statistischen Aufbereitung der Ergebnisse zu den verschiedenen Scanspitzen wurde Friedmans Rang-ANOVA mit paarweisen posthoc-Tests verwendet. Der Vorteil dieses Tests ist es, dass die Daten nicht normalverteilt sein müssen. Die Daten werden statt nach den wahren Werten nach Rängen sortiert. Das Signifikanzniveau lag bei $p \leq 0,05$. Um die Alphafehlerwahrscheinlichkeit zu begrenzen wurde eine Bonferroni Korrektur durchgeführt. Dies ist auch aufgrund der hohen Fallzahl von 20.000 Iterationen in der Monte-Carlo-Simulation vorteilhaft. Zu vergleichen waren in dieser Studie der PCF der analogen Abformung mit dem der digitalen Abformungen mit einer Einweg-Scanspitze, der digitalen Abformung mit einer autoklavierbaren Mehrweg-Scanspitze und der digitalen Abformung mit einer wischdesinfizierbaren Mehrweg-Scanspitze.

5 Ergebnisse

5.1 Zwischenergebnisse

5.1.1 Analoge Abformung

Zeitmessung analoge Abformung

Die Ergebnisse der Zeitmessung der analogen Abformung sind in Tab. 12.9 aufgeführt. Der durchschnittliche Zeitaufwand für eine analoge Abformung inklusive Gegenkieferabformung und Bissregistrator betrug 14:04 min.

Materialverbräuche analoge Abformung

Bei den Versuchen zur analogen Abformung wurde auch das Materialgewicht für die einzelnen Abformungen ermittelt. Dies war notwendig, um einen Mittelwert der Materialgewichte zu erhalten. Der Durchschnittswert wurde verwendet, um die Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, mit der eine Abformung ein bestimmtes Gewicht hat. Die Wahrscheinlichkeit wurde mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation ermittelt. Die Wahrscheinlichkeit ist am Ende relevant, um die Menge des verbrauchten Materials pro Abformung zu errechnen. Die einzelnen Materialverbräuche finden sich in Tab. 12.10.

Stromverbräuche der Maschinen

Der Stromverbrauch der Maschinen für die analoge Abformung wurde mit Hilfe eines Strommessgerätes ermittelt. Es wurde eine beispielhafte Abformung durchgeführt und daraus anschließend ein Gipsmodell hergestellt. Die aus diesen Vorgängen resultierenden Zeiten und Stromverbräuche sind in Tab. 12.11 aufgelistet.

Stromverbrauch des Thermodesinfektors

Zunächst wurden das Volumen der Instrumente und das Füllvolumen des Thermodesinfektors bestimmt. Die Volumina der einzelnen Instrumente Tab. 12.12 zu entnehmen.

Das Füllvolumen des Thermodesinfektors wird nach Herstellerangaben berechnet. Dort werden pro Charge 44 Instrumente angenommen und eventuelles anderes Instrumentarium. Für die Übertragungsinstrumente wird ein Volumen von 10 ml angenommen. Dies entspricht einem Füllvolumen von 440 ml. Das weitere Instrumentarium wird nochmals auf 525 ml geschätzt. Das gesamte Füllvolumen beträgt also 965 ml.

Die Mehrweg-Instrumente, welche für die analoge Abformung verwendet wurden, bilden zusammen ein Volumen von 55 ml. Der Anteil der Instrumente am Gesamtvolumen des Thermodesinfektors beträgt somit 5,7 %.

Die zweite Methode, um sich dem Beladungsanteil der Instrumente zu nähern, ist die Berechnung über die Anzahl der Instrumente. Laut Hersteller können im mittleren Tablett 44 Instrumente gereinigt werden. Aufgrund der Maße wurde angenommen, dass im oberen und unteren Korb nochmal 50 Instrumente Platz finden. Für die analoge Abformung wurden fünf Instrumente verwendet, die im Thermodesinfektor gereinigt werden müssen. Somit ergibt sich ein Beladungsanteil von 5,3 %.

Aus beiden Werten wurde ein Durchschnittswert berechnet. Somit liegt der Anteil der Instrumente für die analoge Abformung an der Gesamtbeladung des Thermodesinfektors bei 5,5 %.

Der Stromverbrauch des Thermodesinfektors beträgt anteilig für die analoge Abformung mit 5,5 % des Gesamtvolumens 108 Wh.

5.1.2 Digitale Abformung

Strom- und Zeitmessung Primescan AC

Der Stromverbrauch des IOS wurde anhand von 15 Beispielpatienten bestimmt. Es wurde sowohl von einem erfahrenen Behandler als auch von einem unerfahrenen Behandler gescannt, um einen realistischen Mittelwert zu ermitteln. Die Ergebnisse der Strommessung sind in Tab. 12.13 aufgeführt.

Der durchschnittliche Zeitaufwand für den Scan des Ober- und Unterkiefers inklusive Biss Scan betrug 09:49 min. Der Durchschnittliche Stromverbrauch hierbei betrug 35,5 Wh.

Der größte zeitliche Anteil bei der Erstellung des Scans war der Scan an sich. Die Ruhezeit hatte den zweitgrößten zeitlichen Anteil. Der zeitliche Anteil der Berechnung des Modells nahm die geringste Zeit in Anspruch (Abb. 5.1). Am höchsten war der Stromverbrauch beim Scannen. Der zweithöchste Stromverbrauch trat bei der Berechnung der Modelle auf. Der geringste Stromverbrauch wurde im Ruhezustand gemessen (Abb. 5.2).

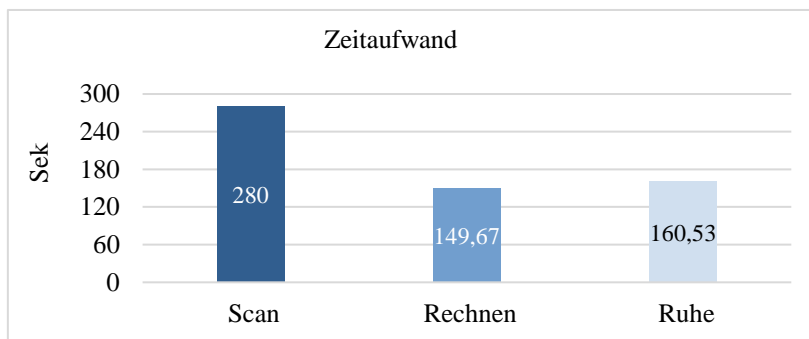


Abb. 5.1: Primescan AC Zeitaufwand. Sek: Sekunde.

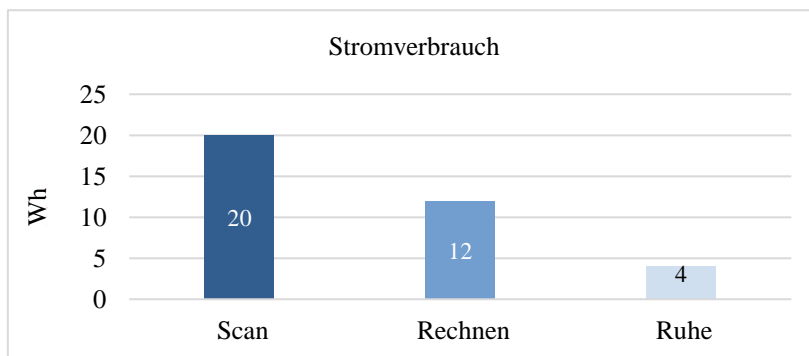


Abb. 5.2: Primescan AC Stromverbrauch. Wh: Wattstunde.

Stromverbrauch Autoklav

Der Anteil der autoklavierbaren Mehrweg-Scanspitze an der maximalen Beladung wurde auf zwei verschiedene Arten berechnet. Zunächst wurde entsprechend der Maße der Tablets, welche zum Autoklaven gehören, berechnet, wie viele Scanspitzen in den Autoklaven passen würden (47). Daraus ergab sich ein Beladungsanteil von 2,1 %.

Anschließend wurde der Beladungsanteil nach Gewicht berechnet. Das bedeutet, dass maximale Beladungsgewicht (4 kg) wurde mit dem Gewicht der Scanspitze verrechnet. Daraus ergab sich ein Beladungsanteil von 1,9 %.

Aus diesen beiden Beladungsanteilen wurde ein Durchschnitt gebildet. Der Anteil der Scanspitze an der Gesamtbeladung des Autoklavs beträgt somit 2 %.

Der Stromverbrauch des Autoklavs wurde zum Schluss auf diesen Beladungsanteil heruntergerechnet. Dieser betrug bei 2 %, 26 Wh.

Die Ergebnisse im Einzelnen sind Tab. 12.14 zu entnehmen.

5.2 Sachbilanz

Die Sachbilanz beinhaltet alle Input- und Output-Ströme der einzelnen Prozesse. Die Sachbilanz ist in den Tab. 12.15 bis Tab. 12.32 aufgeführt. Da unter anderem die drei verschiedenen Scanspitzen auf ihren PCF hin untersucht werden sollen, gibt es für die digitale Abformung drei separate Sachbilanzen.

Die Sachbilanz zur Durchführung der analogen Abformung beinhaltet Strom, Handschuhe, Haftlack, A-Silikon, Wasser, Altglas, Altpapier und Restmüll. Für die Herstellung der Gipsmodelle wurden Strom, Druckluft, Batterie, Gips, Destilliertes Wasser, Verbrauchte Batterie, Altpapier und Restmüll in der Sachbilanz erfasst. Bei der Desinfektion der analogen Abformung wurden Desinfektionsmittel, Wasser, Restmüll und Gefährliche Chemikalien bilanziert. In der Sachbilanz des Prozesses „Abformlöffel reinigen“ sind Wasser, Papiertuch, Desinfektionsmittel, Restmüll und Abwasser enthalten. Die Sachbilanz zur Desinfektion der Komponenten beinhaltete Strom, Wasser, Zusatzmittel Thermodesinfektor, Handschuhe, Abwasser und Restmüll. In der Sachbilanz des Prozesses „Arbeitsplatz reinigen“ waren Papiertuch, Wasser, Scheuermilch, Getränktes Tuch, Handschuhe, Abwasser, Gefährliche Chemikalien und Altpapier enthalten.

In der Sachbilanz zur Durchführung der digitalen Abformung (EI), waren Strom, Handschuhe, OptraGate, DryTips, Holzspatel, Restmüll und Altpapier inkludiert. Bei der Reinigung des Arbeitsplatzes (EI), waren ein getränktes Tuch, Handschuhe, Einweg-Scanspitze, Restmüll, Gefährliche Chemikalien und Altpapier enthalten. Die Sachbilanz der anteiligen Herstellung der Primescan AC beinhaltete Batterien + Akkumulatoren, Leiterplatten, LCD-Display + Folientastatur, Glas, Aluminium-Halbzeuge, Alu-Guss Legierungen, Edelstähle, Eisenmetalle, Zink-Guss-Legierungen, Leitungen + Kabelabfälle, Silikon, Gummi, Elastomere, Kunststoffe, Aluminiumschrott, Stahlschrott, Elektroschrott, Kunststoffabfall und nicht-recyclebaren Abfall.

Die Sachbilanz zur Durchführung der digitalen Abformung (AU), enthielt Strom, Handschuhe, OptraGate, DryTips, Holzspatel, Restmüll und Altpapier. Bei der Reinigung des Arbeitsplatzes (AU) ein getränktes Tuch, Handschuhe, Fenster Scanspitze, Restmüll, Gefährliche Chemikalien und Altpapier berücksichtigt. Die Sachbilanz zum Prozess „Komponenten desinfizieren“ enthielt Strom, Handschuhe, Sterile Verpackung, Wasser, Altpapier, Abwasser und Restmüll. Die Sachbilanz der anteiligen Herstellung der

Primescan AC beinhaltet Batterien + Akkumulatoren, Leiterplatten, LCD-Display + Folientastatur, Glas, Aluminium-Halbzeuge, Alu-Guss Legierungen, Edelstähle, Eisenmetalle, Zink-Guss-Legierungen, Leitungen + Kabelabfälle, Silikon, Gummi, Elastomere, Kunststoffe, Autoklavierbare Mehrweg-Scanspitze, Aluminiumschrott, Stahlschrott, Elektroschrott, Kunststoffabfall und nicht-recyclebaren Abfall.

In der Sachbilanz zur Durchführung der digitalen Abformung (WI), waren Strom, Handschuhe, OptraGate, DryTips, Holzspatel, Restmüll und Altpapier enthalten. Bei der Reinigung des Arbeitsplatzes (WI), waren ein getränktes Tuch Handschuhe, Restmüll, Gefährliche Chemikalien und Altpapier inkludiert. Die Sachbilanz der anteiligen Herstellung der Primescan AC enthielt Batterien + Akkumulatoren, Leiterplatten, LCD-Display + Folientastatur, Glas, Aluminium-Halbzeuge, Alu-Guss Legierungen, Edelstähle, Eisenmetalle, Zink-Guss-Legierungen, Leitungen + Kabelabfälle, Silikon, Gummi, Elastomere, Kunststoffe, wischdesinfizierbare Mehrweg-Scanspitze, Aluminiumschrott, Stahlschrott, Elektroschrott, Kunststoffabfall und nicht-recyclebaren Abfall.

5.3 Ergebnis Monte-Carlo-Simulation

Anhand der Sachbilanz, welche die Ergebnisse der Patienten- und Materialversuche enthielt, wurde eine Monte-Carlo-Simulation erstellt. Die Monte-Carlo-Simulation durchlief 20.000 Iterationen. In Tab. 12.33 kann anhand der Min.- und Max.-Werte die Spanne, in der die Ergebnisse liegen, abgelesen werden.

Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation, können Abb. 5.3 entnommen werden.

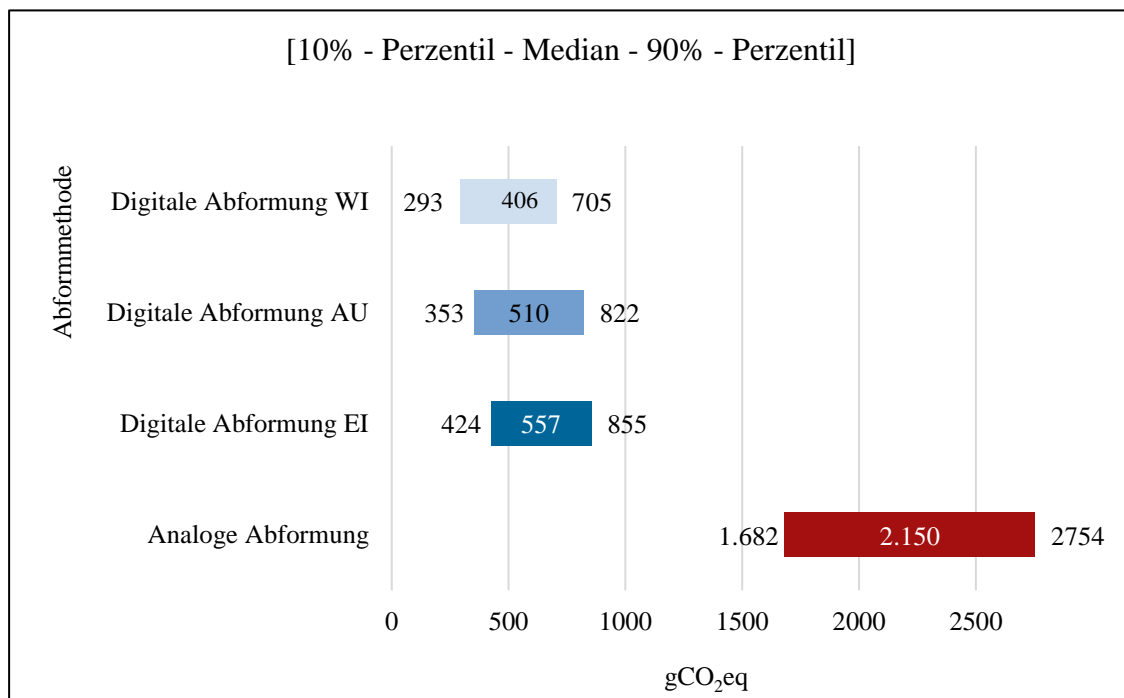


Abb. 5.3: Unsicherheiten der Endergebnisse in gCO₂eq. 10% Perzentil: angenommene Untergrenze der Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation, Median: Zentralwert der Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation, 90% Perzentil: angenommene Obergrenze der Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation.

5.4 PCF der digitalen und analogen Abformung im Vergleich

Anhand der Sachbilanz, welche die Ergebnisse der Patienten- und Materialversuche enthielt, wurde eine Monte-Carlo-Simulation erstellt. Die Monte-Carlo-Simulation durchlief 20.000 Iterationen. Die Ergebniswerte wurden anschließend statistisch aufbereitet. Zum Vergleich der analogen und digitalen Abformung wurde Friedmans Rang-ANOVA mit paarweisen posthoc-Tests durchgeführt. Wie in Abb. 5.4 zu sehen ist, wies die analoge Abformung mit einigem Abstand am häufigsten Rang vier auf. Aus Tab. 5.1 lässt sich ableiten, dass der PCF der analogen Abformung statistisch signifikant höher ist, als der der digitalen Abformung.

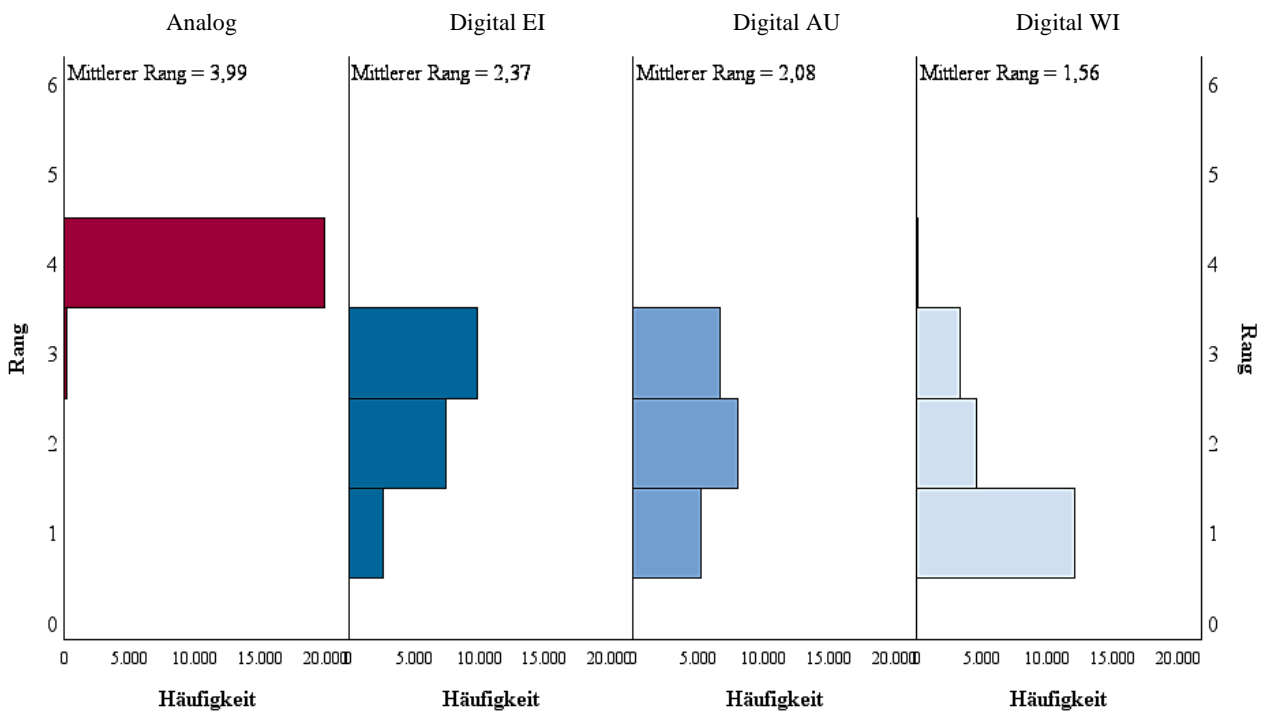


Abb. 5.4: Zweifaktorielle Varianzanalyse für Ränge nach Friedman bei verbundenen Stichproben.

Tab. 5.1: Signifikanztest.

Sample 1-Sample 2	Teststatistik	Std.-Fehler	Standardteststatistik	Korr. Sig. ^a
Digital WI Gesamt kgCO ₂ eq - Digital AU Gesamt kgCO ₂ eq	,514	,013	39,795	,000
Digital WI Gesamt kgCO ₂ eq - Digital EI Gesamt kgCO ₂ eq	,803	,013	62,185	,000
Digital WI Gesamt kgCO ₂ eq - Analog kgCO ₂ eq	2,430	,013	188,231	,000
Digital AU Gesamt kgCO ₂ eq - Digital EI Gesamt kgCO ₂ eq	,289	,013	22,390	,000
Digital AU Gesamt kgCO ₂ eq - Analog kgCO ₂ eq	1,916	,013	148,436	,000
Digital EI Gesamt kgCO ₂ eq - Analog kgCO ₂ eq	1,627	,013	126,046	,000

Jede Zeile prüft die Nullhypothese, dass die Verteilungen in Stichprobe 1 und Stichprobe 2 gleich sind.

Asymptotische Signifikanzen (zweiseitige Tests) werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist 0,05.

a. Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst.

Aus Abb. 5.4 lässt sich auch der Vergleich der PCFs der verschiedenen Scanspitzen ablesen. Die Ergebnisse der Analyse zeigen eine klare Rangordnung in Bezug auf die Verwendung verschiedener Scanspitzen. Die digitale Abformung mit einer Einweg-Scanspitze belegte am häufigsten den dritten Rang. Die digitale Abformung mit einer autoklavierbaren Mehrweg-Scanspitze erreichte am häufigsten den zweiten Rang. Den ersten Rang belegte am häufigsten die digitale Abformung mit einer wischdesinfizierbaren Mehrweg-Scanspitze. Daraus lässt sich ableiten, dass die digitale Abformung unter Verwendung einer Einweg-Scanspitze den höchsten PCF aufweist. Im Vergleich dazu zeigt die digitale Abformung mit einer autoklavierbaren Mehrweg-Scanspitze einen geringeren PCF. Der niedrigste PCF wurde bei der digitalen Abformung mit einer wischdesinfizierbaren Mehrweg-Scanspitze festgestellt. Aus Tab. 5.1 lässt sich ablesen, dass die Unterschiede der PCFs der verschiedenen Scanspitzen statistisch signifikant sind.

5.5 Einfluss verschiedener Inputgrößen auf den PCF der Abformmethoden

Die Inputanteile können auf verschiedene Weisen eingeteilt werden. Um eine Übersicht zu erhalten, wurden die Input-Ströme zunächst nach Prozessschritten eingeteilt.

Die Inputanteile lassen sich auch nach Materialinputs einteilen. Dies ist von Bedeutung für den Behandler, da sich dadurch Materialien identifizieren lassen, die einen besonders großen Einfluss auf den PCF der jeweiligen Abformmethode haben.

Die Inputs lassen sich aber auch nach Rohstoffanteilen einteilen. Daraus können für Firmen Handlungsempfehlungen gezogen werden, welche Rohstoffe einen besonders großen Einfluss auf den PCF haben.

Einteilung nach Prozessschritten

Im Hinblick auf die Prozessschritte machte bei der analogen Abformung die Präzisionsabformung, gefolgt von der Herstellung des Gipsmodells, den größten Anteil am PCF aus. Bei der digitalen Abformung unter Verwendung der Einweg-Scanspitze und der wischdesinfizierbaren Mehrweg-Scanspitze machte die Reinigung des Arbeitsplatzes den größten Anteil am PCF aus. Danach folgten die Durchführung der Abformung und die anteilige Herstellung des Primescan AC. Bei der digitalen Abformung mit der autoklavierbaren Mehrweg-Scanspitze ist die Verteilung etwas anders, da der Prozess „Reinigung des Arbeitsplatzes“ in mehrere Unterschritte aufgliedert ist. Hier hatte die Durchführung der Abformung den größten Einfluss auf den PCF. Eine detaillierte Übersicht findet sich in Abb. 12.1 bis Abb. 12.4.

Einteilung nach Materialinputs

Bei der analogen Abformung fällt auf, dass der Restmüll einen erheblichen Anteil am gesamten PCF ausmacht. Direkt darauf folgten das A-Silikon für das Bissregistrat, das hochvisköse A-Silikon sowie der Gips. Die Einwegmaterialien und deren Entsorgung, machten den Großteil des PCFs der analogen Abformung aus.

Bei der digitalen Abformung machten den größten Anteil die Handschuhe für den Behandler und die Assistenz aus. Weitere große Inputfaktoren waren die im IOS verbauten Leiterplatten und gefährliche Chemikalien (Isopropanol). Im Fall der digitalen Abformung mit der Einweg-Scanspitze, war auch deren Herstellung ein großer Inputfaktor. Die Entsorgung von Abfällen spielte bei der digitalen Abformung eine untergeordnete Rolle.

Eine detaillierte Übersicht findet sich in Abb. 12.5 bis Abb. 12.8.

Einteilung nach Rohstoffanteilen

Die Rohstoffe, welche bei der analogen Abformung die größte Rolle spielten, waren der Restmüll und das hochvisköse A-Silikon sowie der Gips. Darauf folgten Polypropylen und Acrylnitril. Acrylnitril wird vor allem in der Produktion von Kunststoffkomponenten verwendet.

Bei der digitalen Abformung war unabhängig von der verwendeten Scanspitze immer das Acrylnitril der größte Input unter den Rohstoffen. Darauf folgten gefährliche Chemikalien (Isopropanol) und die Computereinheit. Wenn auch nicht bei allen Scanspitzen in derselben Reihenfolge. Eine detaillierte Übersicht findet sich in Abb. 12.9 bis Abb. 12.12.

5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die statistische Auswertung der beiden Abformmethoden zeigte anhand der ermittelten PCFs statistisch signifikante Unterschiede. Der PCF der analogen Abformung (Median 2,150 kgCO₂eq) war statistisch signifikant höher, als der der digitalen Abformung (Median 0,406-0,557 kgCO₂eq in Abhängigkeit der verwendeten Scanspitze). Die digitale Abformung unter Verwendung einer Einweg-Scanspitze wies den höchsten PCF auf. Im Vergleich dazu zeigte die digitale Abformung mit einer autoklavierbaren Mehrweg-Scanspitze einen geringeren PCF. Der niedrigste PCF wurde bei der digitalen Abformung mit einer wischdesinfizierbaren Mehrweg-Scanspitze festgestellt. Die Unterschiede der PCFs der drei Scanspitzen waren statistisch signifikant. Die Nullhypothese, nach welcher kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der analogen und digitalen Abformung in Bezug auf deren PCF besteht, wurde verworfen.

Im Hinblick auf die Prozessschritte konnte festgestellt werden, dass bei der analogen Abformung die Präzisionsabformung den größten Anteil am PCF ausmacht. Bei der digitalen Abformung mit der Einweg-Scanspitze sowie der wischdesinfizierbaren Mehrweg-Scanspitze stellte sich die Reinigung des Arbeitsplatzes als der Hauptfaktor für deren PCF heraus. Im Fall der digitalen Abformung mit der autoklavierbaren Mehrweg-Scanspitze hingegen hatte die Durchführung der Abformung den größten Einfluss auf den PCF.

Im Rahmen der Analyse der Materialinputs wurde bei der analogen Abformung festgestellt, dass der Restmüll einen erheblichen Anteil an deren gesamtem PCF ausmacht. Bei der digitalen Abformung zeigte sich, dass Handschuhe, die sowohl vom Behandler als auch von der Assistenz verwendet werden, den größten Einfluss auf den PCF hatten. Weitere maßgebliche Einflussfaktoren auf den PCF der digitalen Abformung waren die Leiterplatten innerhalb des IOS sowie der Einsatz von gefährlichen Chemikalien, insbesondere Isopropanol, welches für Reinigungs- und Desinfektionszwecke verwendet wird.

Die Rohstoffe, welche bei der analogen Abformung den größten Einfluss auf den PCF hatten, waren der Restmüll und das hochvisköse A-Silikon sowie der Gips. Bei der digitalen Abformung hingegen zeigte sich, dass Acrylnitril, unabhängig von der verwendeten Scanspitze, der dominierende Rohstoff war. Die Nullhypothese, dass es

keine signifikanten Unterschiede in der Prägung des PCFs der beiden Abformmethoden durch verschiedene Input- und Output-Ströme, Prozessschritte und Lebenszyklusphasen gibt, wurde somit verworfen.

Bereits in der Datenerhebung zur Erstellung der Sachbilanz zeigten sich diverse Unsicherheitsfaktoren. Dies wird auch durch die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation bestätigt, die eine breite Spanne an möglichen Ergebnissen zeigt. Die Simulation verdeutlicht die Unsicherheit und die Variabilität der Input-Ströme. Die Monte-Carlo-Simulation ermöglicht es somit, die möglichen Schwankungen und Unsicherheiten in den Ergebnissen zu quantifizieren und zu visualisieren. Die Nullhypothese, dass inhärente Unsicherheiten in der Datengrundlage keinen Einfluss auf die probabilistische Bewertung des PCFs haben und nicht durch Bereinigungsmaßnahmen im Sinne einer Monte-Carlo-Simulation verbessert werden können, wurde verworfen.

6 Diskussion

6.1 Methodikdiskussion

6.1.1 Annahmen und Systemgrenzen

Um die analoge und digitale Abformung miteinander vergleichen zu können, wurde als klinisches Anwendungsbeispiel die Versorgung mit einer Einzelzahnkrone gewählt. Der Fall wurde gewählt, weil hier die Funktion entscheidend ist und die Ästhetik eine eher untergeordnete Rolle spielt. Das Material, aus welchem die Einzelzahnkrone besteht, wird nicht definiert, da es für die Abformung keine Rolle spielt.

Die funktionelle Einheit war jeweils ein Positivmodell des abgeformten Bereichs. In der Praxis wird zur Herstellung einer Einzelzahnkrone oft nur der betreffende Quadrant und der antagonistische Bereich inklusive einseitigem Bissregistrat gescannt.³⁰ In dieser Studie wurde der Ganzkieferscan beider Kiefer untersucht, um die beiden funktionellen Einheiten vergleichbar zu halten. Insbesondere könnte der PCF tendenziell verringert werden, wenn der Scan auf den spezifischen Bereich beschränkt wird, der für die Anfertigung einer Einzelzahnkrone relevant ist.

Theoretisch muss für alle Materialien ein Datensatz in einer Datenbank wie Ecoinvent 3.10 bestehen oder neu erstellt werden, um die Berechnung des PCF durchführen zu können. Für die wichtigsten Materialien wurde dieses Vorgehen gewählt. Jedoch sind manche Einzelbestandteile der Materialien nicht in einer Datenbank hinterlegt. Jeden einzelnen Bestandteil zu bilanzieren ist in der Realität nahezu unmöglich. Daher wurden für einige Materialien verwandte Ersatzmaterialien als Datensätze genutzt oder Annahmen getroffen. Es zeigt sich immer wieder, dass dieser Ansatz in vielen Studien verwendet wird.^{22, 88}

In der Datenbank Ecoinvent 3.10 existierte kein Datensatz für den Prozess „Zink gießen“, daher wurde als Ersatz der Datensatz „Messing gießen“ gewählt. Die beiden Prozesse ähneln sich aufgrund der Materialverwandtschaft sehr. Das Material Zink als solches war als Datensatz verfügbar. Zink als Material kommt in der Herstellung des IOS vor.

Der Recyclingpass des IOS (Intraoralscanner) enthielt diverse Kunststoffe. Nicht für alle konnte ein passender Datensatz in Ecoinvent 3.10 gefunden werden. Diese Kunststoffe wurden unter dem Kunststoff ABS (*acrylonitrile-butadiene-styrene-copolymer*) zusammengefasst. Dieser Kunststoff hat im Vergleich mit anderen Kunststoffen einen

eher hohen PCF. Das Ergebnis (der PCF der digitalen Abformung) würde also bei genauer Kenntnis aller PCFs der im IOS vorkommenden Kunststoffe, eher niedriger werden. Es würde sich am Gesamtergebnis, dem Vergleich des PCF der analogen mit der digitalen Abformung, nichts ändern.

Des Weiteren wurde im Recyclingpass des IOS relativ unspezifisch von „Leiterplatten“ als Hauptbestandteil der Computereinheit berichtet. Ein Computer besteht nicht nur aus Leiterplatten, sondern zusätzlich aus verschiedenen Blechen und metallischen Kleinteilen. Um einen genaueren PCF des IOS erheben zu können, wurden PCFs von vergleichbaren Computern herangezogen. So wurde ein Durchschnittswert aus den PCFs drei verschiedener Computer gebildet. Die drei Computer, über die bereits PCF-Berechnungen verfügbar waren, sind der HP 215 Pro G5 MT, der Dell OptiPlex 5090 Tower sowie der Lenovo ThinkCentre M90/M930 Tower. Bei der Berechnung des Bildschirms des IOS wurde ähnlich verfahren. Wieder war nur ein relativ unspezifischer Wert im Recyclingpass verfügbar. Daher wurde erneut der Durchschnittswert dreier vergleichbarer Bildschirme herangezogen. Die drei Bildschirme, welche aufgrund der gut verfügbaren PCF-Daten und der Vergleichbarkeit betrachtet wurden, sind ein Apple 24" Bildschirm, ein Dell 22" Bildschirm, sowie ein Dell 21,5" Bildschirm.

Im Prozess „Gipsmodell herstellen“ wird destilliertes Wasser benötigt. In der Datenbank Ecoinvent 3.10 existierte dazu kein Datensatz. Daher wurde hier der Datensatz für Leitungswasser verwendet. Die Plastikflasche, die zur Aufbewahrung des destillierten Wassers verwendet wird, wurde bilanziert.

Das Grundbesteck, wie beispielsweise Spiegel, Sonde und Pinzette, wird in dieser Studie nicht berücksichtigt, da diese Instrumente sowohl bei einer analogen als auch bei einer digitalen Abformung verwendet werden können. Daher haben sie keinen Einfluss auf die Differenz der PCFs der beiden Prozesse. Es wird davon ausgegangen, dass Mehrweg-Instrumente verwendet werden und keine Einweg-Instrumente. In einer Studie von *Byrne et al.* (2022)²² wurde die Verwendung eines Einweg- vs. Mehrweg-Untersuchungskits in 16 Wirkungskategorien untersucht. Die Mehrweg-Untersuchungskits waren um den Faktor 300 umweltfreundlicher als die Einweg-Variante.²²

Einige Instrumente werden in dieser Studie betrachtet, da sie unterschiedlich in die beiden Abformverfahren einfließen. Bei der analogen Abformung sind das die metallenen Abformlöffel. Bei der digitalen Abformung sind es die verschiedenen Scanspitzen. Die

Lebenszeit der Edelstahlscanspitzen wurde in dieser Studie als identisch zur Lebenszeit des IOS angenommen. Es gibt beispielsweise autoklavierbare Mehrweg-Scanspitze anderer Hersteller, deren Lebensdauer mit 100 Nutzungszyklen angegeben wird.²⁵ Diese Scanspitzen sind aus Kunststoff. Die Lebenszeit der Edelstahl-Scanspitzen wird höher eingeschätzt. Doch selbst bei 100 Nutzungszyklen würde der PCF der Scanspitze kaum noch ins Gewicht fallen.

Bei Mehrweginstrumenten, wie dem Grundbesteck, wird ausschließlich die Aufbereitung und nicht die Herstellung berücksichtigt, da diese Instrumente eine so hohe Anzahl an Nutzungszyklen durchlaufen, dass die Herstellungskosten im Vergleich zur Aufbereitung vernachlässigbar sind. Es gibt auch einige Einweg- Komponenten in deren Verwendung sich die analoge und digitale Abformung unterscheiden. Bei der digitalen Abformung sind das der Holzspatel, OptraGate und DryTips.

Die Nutzung der Räumlichkeiten wird in dieser Studie nicht berücksichtigt. In diesem Kontext wären der Stromverbrauch für Beleuchtung, Belüftung und Heizung sowie die Energie für bauliche Maßnahmen zu berücksichtigen. Zudem müsste der insgesamt verbrauchte Strom- und Ressourcenaufwand anteilig auf die reine Abformung umgerechnet werden, um eine vollständige Betrachtung des Energieverbrauchs zu ermöglichen. Zur Bestimmung des Zeitaufwands der analogen und digitalen Abformung existieren verschiedene Studien. In dieser Studie wurden eigene Zeitmessungen durchgeführt, basierend auf 15 Patientenfällen. Da es sowohl Studien gibt, die belegen, dass die analoge Abformung schneller durchzuführen ist, als auch Studien welche belegen das die digitale Abformung weniger Zeit beansprucht.^{33, 89, 133} Bei unseren Versuchen zeigte sich, dass der Zeitaufwand für die analoge Abformung im Durchschnitt höher war als der für die digitale Abformung.

Es wurde in dieser Studie lediglich der reine Abformungsprozess betrachtet. Die Fokussierung auf den Abformprozess klammert viele weitere Faktoren aus, welche den PCF des analogen oder digitalen Herstellungswegs einer Einzelzahnkrone beeinflussen können. Die Implementierung eines rein digitalen Herstellungsprozesses für Zahnersatz, insbesondere durch Chairside-Fertigung, macht die Herstellung eines Provisoriums obsolet. Es wird außerdem davon ausgegangen, dass der Patient bereits angereist ist, sodass die Anfahrt nicht berücksichtigt wird. Für den reinen Prozess der „Abformung“ ist die Anfahrt nicht relevant, da lediglich mit einem Termin für die Abformung gerechnet

wird. Dabei sind An- und Abreise bei beiden Abformvarianten identisch. Es geht jedoch aus verschiedenen Studien hervor, dass der Patiententransport den größten Einfluss auf den PCF der zahnmedizinischen Versorgung hat.⁴⁹ Bei der Betrachtung des kompletten Herstellungsweges ist es unerlässlich, die logistischen Aspekte und den Zeitaufwand für die An- und Abreise der Patienten zu berücksichtigen. Bei der analogen Abformung ist es unvermeidlich, dass der Patient mindestens ein zweites Mal zur Eingliederung der Einzelzahnkrone anreisen muss, da die Einzelzahnkrone auf Grundlage der Abformung im Zahntechniklabor hergestellt werden muss. Zudem verschlechtert der Transport der Abformung ins Zahntechniklabor den PCF der analogen Abformung zusätzlich. Nur 32 % der deutschen Zahnarztpraxen haben ein eigenes Praxislabor, welches den Transportweg ersparen würde.¹⁰⁷ Müssen nach der Herstellung noch Korrekturen an der Einzelzahnkrone durchgeführt werden, entstehen erneut Transportwege, die den PCF der analogen Abformung weiter erhöhen. Die digitale Abformung kann durch die Möglichkeit der Chairside-Fertigung einer Einzelzahnkrone allein durch das Einsparen der Transportwege den Kohlenstoffdioxid-Ausstoß enorm reduzieren. Der Patient muss nur einmal anreisen, da alle Schritte – von der Präparation über die Abformung bis hin zur Fertigstellung der Einzelzahnkrone – an einem einzigen Termin durchgeführt werden können. Auch die Transportwege ins Zahntechniklabor sind somit obsolet. Auf den gesamten Herstellungsweg einer Einzelzahnkrone betrachtet, würde sich die Relation der analogen und digitalen Abformung in Bezug auf ihren PCF also vermutlich zugunsten des digitalen Herstellungswegs verschieben.

6.1.2 Datenerhebung Analoge Abformung

Bei der analogen Abformung bestand der erste Schritt darin, die Mengen der verwendeten Materialien sowie den Stromverbrauch der Maschinen, die an der Durchführung der analogen Abformung beteiligt sind, zu ermitteln. Die beteiligten Komponenten, wie beispielsweise die verschiedenen A-Silikone, wurden gewogen, um anschließend anhand des Gewichts den PCF berechnen zu können.

Auch die Verpackungseinheiten der verwendeten A-Silikone und des Alginats wurden in die Betrachtung einbezogen. Da eine Kartusche mehr Material enthält, als für eine einzelne Abformung erforderlich ist, wurde aus den variierenden Materialmengen ein Mittelwert gebildet. Auf dieser Grundlage wurde berechnet, wie viele Abformungen mit einer Kartusche durchgeführt werden können. Für das dickfließende A-Silikon wurde die Annahme getroffen, dass sich mit einer Kartusche acht Abformungen durchführen lassen. Für das dünnfließende A-Silikon wurde die Annahme getroffen, dass sich mit einer Kartusche 25 Abformungen durchführen lassen. Ähnlich wurde die Menge des Haftlacks pro Abformung berechnet. Es wurde der Abformlöffel vor und nach dem Auftragen des Haftlacks gewogen. So konnte auch festgestellt werden, dass 70 Portionen aus einer Flasche Haftlack zu entnehmen sind. Die genaue Zusammensetzung des Haftlacks konnte lediglich für den Alginat-Haftlack der Firma Dentsply Sirona ermittelt werden. Auf dieser Grundlage war es möglich, den PCF des Alginat-Haftlacks präzise zu bestimmen. Aufgrund der mangelnden Kenntnisse über die Zusammensetzung des Silikon-Haftlacks, wurde auch hierfür der Datensatz des Alginat-Haftlacks verwendet. Die Zusammensetzung der beiden Haftlacke dürfte sich vermutlich nicht erheblich unterscheiden.

Die exakte Zusammensetzung der A-Silikone wurde von den Herstellern für diese Studie zu einem Grad preisgegeben, der eine ausreichend genaue Berechnung des PCF der einzelnen Inhaltsstoffe erlaubt. Eine Ökobilanzierung stellt jedoch stets eine Annäherung an die Realität dar und beansprucht nicht, die Realität in ihrer Gesamtheit perfekt abzubilden. Auch die Zusammensetzung des Desinfektionsmittels für die Abformungen konnte, dank der Angaben des Herstellers, in ausreichendem Maße ermittelt werden. Auf Basis der angegebenen Inhaltsstoffe wurde anschließend eine möglichst präzise Berechnung durchgeführt.

Im Prozess „Komponenten desinfizieren“, insbesondere bei der Reinigung der Komponenten im Thermodesinfektor, wurden neben dem verbrauchten Wasser und Strom auch die benötigten Reinigungsmittel berücksichtigt. Diese wurden in anderen Studien nicht mit in die Berechnungen eingeschlossen.²²

Nach der Durchführung der Abformung muss die Abformung in einem Desinfektionsbad desinfiziert werden. Dieses wird einmal wöchentlich gewechselt. Der Hauptbestandteil der Desinfektionslösung ist Isopropanol. Der Anteil des Desinfektionsmittels im Bad, der für eine einzelne Abformung benötigt wird, hängt von der Annahme ab, wie viele Abformungen pro Woche in diesem Bad desinfiziert werden. Für die Berechnungen in dieser Studie wurde angenommen, dass pro Woche zehn Abformungen in das Desinfektionsbad gegeben werden. Sollte sich die Anzahl der Abformungen, die im Desinfektionsbad desinfiziert werden verdoppeln, würde der Anteil des Desinfektionsbads pro Abformung entsprechend sinken. Dies verdeutlicht, dass die Effizienz der Nutzung des Desinfektionsbads einen signifikanten Einfluss auf den PCF ausüben kann. Eine optimierte Auslastung des Desinfektionsbads könnte folglich den PCF pro Abformung verringern und somit die Gesamtbilanz verbessern.

Materialmengen

Die Menge an benötigtem A-Silikon, Alginat und A-Silikon für das Bissregistrat wurde anhand von 15 Patientenfällen ermittelt. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass für die Abformung eines Oberkiefers mehr A-Silikon benötigt wird als für einen Unterkiefer. Zusätzlich gibt es verschiedene Löffelgrößen, da sich jeder Kiefer in seiner Anatomie unterscheidet. Es kann nicht von einer festen Menge A-Silikon ausgegangen werden, die für jede Abformung verwendet wird. Vielmehr ergibt sich ein variabler Materialbedarf, der innerhalb einer bestimmten Spanne liegt und abhängig von den unterschiedlichen Kiefergrößen variiert. Um diese Ungenauigkeit auszuräumen, wurde eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt.

Ähnliches gilt auch für das Alginat sowie das A-Silikon, welches für das Bissregistrat verwendet wird. Auch hier sind die verwendeten Mengen sehr variabel, abhängig von der jeweiligen Kiefergröße.

Einer der 15 Probanden wies sowohl im Oberkiefer (OK) als auch im Unterkiefer (UK) die Löffelgröße eins auf. Neun der 15 Probanden hatten im OK sowie im UK die Löffelgröße zwei. Ein weiterer Proband hatte im OK und UK die Löffelgröße drei. Drei Probanden wiesen im OK Löffelgröße zwei und im UK Löffelgröße eins auf. Ein Proband hatte im OK Löffelgröße drei und im UK Löffelgröße zwei.

Beim A-Silikon für die Präzisionsabformung betrug die durchschnittliche Materialmenge 32,07 g. Für das Alginat wurde eine durchschnittliche Materialmenge von 56,79 g ermittelt, während für das A-Silikon zur Herstellung des Bissregistrats eine durchschnittliche Materialmenge von 4,45 g festgestellt wurde.

Dennoch ist zu sagen, dass die Stichprobe aufgrund der beschränkten Größe keinen repräsentativen Einblick in die Bevölkerung liefert.

Da es im Bereich Abformungen in der Zahnheilkunde bisher keine Studien zur PCF-Bilanzierung gab, liegen zu den Materialmengen keine Vergleichswerte vor.

Stromverbräuche der Maschinen

Der Stromverbrauch der für die analoge Abformung notwendigen Maschinen wurde, wie im Kapitel „Material und Methoden“ beschrieben, ermittelt.

Das Anmischgerät für das A-Silikon wies unterschiedliche Laufzeiten auf, die in Abhängigkeit von der Löffelgröße variierten. Daher wurden im Rahmen der Versuche sowohl die jeweiligen Laufzeiten als auch der Stromverbrauch des Silikon-Anmischgeräts erfasst und ein Durchschnittswert berechnet. Für das Silikon-Anmischgerät ergab sich eine durchschnittliche Laufzeit von 33,13 Sek. und ein durchschnittlicher Stromverbrauch von 1,5 Wh.

Das Alginat-Anmischgerät lief immer mit einer definierten Laufzeit von zehn Sekunden. Diese Laufzeit wurde auf Grundlage klinischer Erfahrungen gewählt. Der Stromverbrauch betrug 1 Wh.

Der Gipsrüttler wies ebenfalls variable Laufzeiten auf. Auch in diesem Fall wurden im Rahmen der Versuche sowohl die Laufzeit als auch der Stromverbrauch des Gipsrüttlers gemessen. Für den Rüttler ergab sich eine durchschnittliche Laufzeit von 02:09 min. und ein durchschnittlicher Stromverbrauch von 1 Wh.

Das Vakuumanmischgerät lief immer mit einer definierten Laufzeit von 03:00 min. Die Laufzeit ergab sich aus dem Programm, welches speziell zum Anmischen des Gipses geeignet war. Der Stromverbrauch betrug 6 Wh.

Der Trimmer benötigte 01:22 min. und wies einen Stromverbrauch von 9 Wh auf.

Es ist zudem anzumerken, dass die meisten Maschinen, die in dieser Studie Teil des Prozesses sind, nicht zwingend für die Durchführung der analogen Abformung erforderlich sind. Alginat kann alternativ auch manuell angemischt werden. Der Rüttler sowie das Vakuumanmischgerät stellen ebenfalls optionale Hilfsmittel dar, deren Einsatz jedoch die Qualität des Gipsmodells verbessern kann.

Da es im Bereich Abformungen in der Zahnheilkunde bisher keine Studien zur PCF-Bilanzierung gab, liegen auch hier keine Vergleichswerte vor.

Stromverbrauch Thermodesinfektor

Der Stromverbrauch des Thermodesinfektors wurde, wie bereits beschrieben, anhand des Befüllungsanteils und der Herstellerangaben berechnet. Es ergab sich ein anteiliger Stromverbrauch von 108 Wh. Der Befüllungsanteil wurde speziell für die in dieser Studie verwendeten Instrumente errechnet und hat daher nur eine begrenzte Gültigkeit, sollten weniger oder andere Instrumente verwendet werden.

In einer Studie aus dem Jahr 2020 wurde der PCF einer Wurzelkanalbehandlung untersucht. Es wurde angenommen, dass sich nur das Endo-Tray und EMS-Scaling-Tips im Thermodesinfektor befinden. Es wurde ein Stromverbrauch von 83 Wh errechnet.³⁶ Dabei wurde angenommen, dass sich sechs Endo-Trays gleichzeitig im Thermodesinfektor befinden können. Diese Studie ist schwer mit der vorliegenden Studie zu vergleichen, da es sich um eine andere Art von Instrumenten handelt.

6.1.3 Datenerhebung Digitale Abformung

Die Daten, die in Bezug auf den Primescan AC IOS erhoben wurden, bezogen sich hauptsächlich auf den Stromverbrauch sowie den Ressourcenverbrauch während der Nutzung des Primescan AC IOS. Bei der Strommessung zeigte sich, dass es einen Zusammenhang zwischen der Zeit, die zum Scannen benötigt wurde, und dem Stromverbrauch gab. In einer Studie wurde nachgewiesen, dass die Zeit, die Anfänger für einen Scan brauchen, höher ist als die von erfahrenen Behandlern.¹⁴⁹ Die Strommessung wurde daher sowohl bei unerfahrenen Behandlern als auch bei erfahrenen Behandlern durchgeführt. Aus den Ergebnissen der Zeit- und Strommessungen wurde ein Mittelwert berechnet, der möglichst realitätsnah ist. Zudem wurde eine Unsicherheitsberechnung durchgeführt, die die Verteilung der kürzeren und längeren Scanzeiten mit einbezog. Eine Verblindung der Behandler und der Patienten war in dieser Studie nicht möglich, da die Gruppeneinteilung (analoge Abformung/ digitale Abformung) durch die Versuchsdurchführung offensichtlich war.

Die Ermittlung der Daten zur Herstellung des Primescan AC gestaltet sich komplex, da hierfür detaillierte Informationen über die verwendeten Rohstoffe, deren Abbau sowie die Transportwege erforderlich sind. Bei der Weiterverarbeitung der Rohstoffe sind insbesondere die eingesetzten Maschinen und deren Stromverbrauch von Relevanz. Zudem müssen der Transport zu Versandzentren oder Endverbrauchern sowie die verwendeten Verpackungsmaterialien in die Analyse einbezogen werden. Diese Daten unterliegen teilweise der Geheimhaltung, da der genaue Aufbau des Primescan AC und die damit verbundenen Lieferketten Unternehmensgeheimnisse darstellen. Daher erfordert die Datenerhebung eine sorgfältige Abwägung, um einerseits die Vertraulichkeit der Firmengeheimnisse zu wahren und andererseits die erforderlichen Informationen in einer präzisen und unverfälschten Form zu erheben. Durch die Abhängigkeit von Herstellerdaten kann es zu gewissen Verzerrungen kommen. Jedoch ist dies unvermeidlich, da die Daten der Hersteller für die Berechnung des PCF unerlässlich sind. Die Daten wurden bestmöglich auf ihre Richtigkeit überprüft. Auch viele andere Studien im Bereich Ökobilanzierung stützen sich auf Herstellerangaben.^{2, 78, 88}

Die Lieferwege und Entfernungen wurden mit Hilfe von Google Maps ermittelt. Die Kilometeranzahl wurde auf den Kraftstoffverbrauch des jeweils wahrscheinlichen Verkehrsmittels umgerechnet. Die Lieferwege, welche auf dem Meer stattfinden, wurden

mit Hilfe eines Seeroutenplaners berechnet. Dies wurde bereits in anderen Ökobilanzierungsstudien auf ähnliche Weise durchgeführt.⁸⁸

Im Vergleich zur analogen Abformung gestaltet sich die Bestimmung genauer Fehlerquoten bei der digitalen Abformung als schwierig. Häufig wird der Fehler direkt erkannt, und der fehlerhafte Bereich nachgescannt. In einer Übersichts-Studie aus dem Jahr 2021 betrug die Anzahl der Fälle in denen es nötig war erneut zu scannen $2,33 \pm 1,52$.¹²⁴ Allerdings gilt auch hier: je später der Fehler auffällt, desto mehr Schritte müssen wiederholt werden. Fällt beim Festlegen der Präparationsgrenze am digitalen 3D-Modell beispielsweise nicht auf, dass die Präparationsgrenze falsch oder unzureichend abgebildet ist, so muss hinterher die ganze Restauration neu angefertigt werden.

Strom und Zeit Messung

Der Strom- und Zeitaufwand für einen Intraoralscan von OK, UK und Bissregistrator wurde anhand von 15 Versuchen mit Hilfe eines Strommessgeräts gemessen. Es wurde die Zeit gemessen, welche für den Scan benötigt wurde, die Zeit, welche der IOS zum Berechnen der Modelle benötigte, sowie die Zeit, in welcher der IOS nicht aktiv genutzt wurde. Dies war bei der Vorbereitung des Patienten mit OpraGate und DryTips und bei Zwischenphasen der Fall. Aus den 15 gemessenen Zeiten wurde jeweils ein Mittelwert gebildet.

Die Zeit, welche für den Scan von OK, UK und Bissregistrator benötigt wurde, betrug im Mittelwert 04:40 min. Der Stromverbrauch lag mittelwertig bei 20 Wh.

Die Zeit, welche für die Berechnung der 3D-Modelle benötigt wurde, betrug im Mittelwert 02:29 min. Der Stromverbrauch lag mittelwertig bei 12 Wh.

Die Ruhezeit des IOS lag mittelwertig bei 02:40 min. Der Stromverbrauch betrug mittelwertig 4 Wh.

Insgesamt betrug die Zeit für alle Schritte zusammen mittelwertig 09:49 min. Der Stromverbrauch lag bei 36 Wh.

Der Stromverbrauch war somit beim aktiven Scannen am höchsten, während der IOS in Ruhe nur einen Bruchteil des Stroms benötigte. Dies war der Fall, obwohl die Ruhezeit die meiste Zeit im Gesamtprozess einnahm. Die wenigste Zeit entfiel auf die Berechnung der Modelle.

Die Ergebnisse der Zeitmessung der Scanzeiten decken sich weitestgehend mit den Ergebnissen einer Studie aus dem Jahr 2020. In dieser Studie wurde die Zeit für den Scan eines Quadranten mit präparierter Einzelzahnkrone in verschiedenen Auflösungen gemessen. Die Ergebnisse bewegten sich zwischen $75,05 \pm 11,7$ Sek. und $121,5 \pm 25,5$ Sek. Die Multiplikation des ermittelten Wertes mit vier, entsprechend der Anzahl der gescannten Quadranten, zeigt dass dieser Wert unserer Zeitmessung sehr ähnlich ist. Diese Studie wurde allerdings mit dem TRIOS 3 durchgeführt.³⁰

In einer Studie aus dem Jahr 2019 untersuchte den Patientenkomfort und die Zeiteffizienz von analoger vs. digitaler Abformung bei Kindern. Die gemessene Zeit für einen Intraoralscan betrug $465,89 \pm 76,71$ Sek. Damit ist die Zeit etwas niedriger als in der vorliegenden Studie. Dies lässt sich auf die kleineren Kiefer der Kinder und den dadurch reduzierten Zeitaufwand zurückführen.¹⁴⁸

In einer Review-Studie aus dem Jahr 2021 wurden 17 Studien untersucht im Hinblick auf Scanzeit und Patientenkomfort bei analoger und digitaler Abformung. Die Ergebnisse für den Scan des kompletten Kiefers lagen zwischen 07:30 min und 28:24 min. Die Zeit, welche für die analoge Abformung benötigt wurde, war immer höher. Dabei fiel auf, dass vor allem ältere Studien höhere Scanzeiten angeben. Dies liegt an den verwendeten, älteren IOS-Systemen.¹²⁴ Die in der Studie ermittelten Zeiten für einen Scan decken sich (bei den jüngeren IOS Systemen) weitestgehend mit den in dieser Studie gemessenen Zeiten. Auch der Vergleich der benötigten Zeit für die analoge und digitale Abformung zeigte in der vorliegenden Studie, dass die digitale Abformung zeiteffizienter war.

Stromverbrauch Autoklav

Der Stromverbrauch des Autoklavs wurde, wie bereits beschrieben, anhand des Befüllungsanteils und der Herstellerangaben berechnet. Es ergab sich ein anteiliger Stromverbrauch von 26 Wh.

In einer Studie aus dem Jahr 2014 wurde im Rahmen eines LCAs die Aufbereitung von wiederverwendbaren Bohrern untersucht. Dazu wurde in zehn Versuchen der Stromverbrauch eines Autoklavs gemessen und daraus ein Mittelwert gebildet. Es ergab sich ein Stromverbrauch von 330 Wh. Dabei wurde angenommen, dass sich nur die Bohrer im Autoklav befinden. Daher ist der Stromverbrauch in dieser Studie nicht wirklich vergleichbar mit der vorliegenden Studie.⁷⁸

In einer weiteren Studie aus dem Jahr 2020 wurde der PCF einer Wurzelkanalbehandlung untersucht. Es wurde angenommen, dass sich nur das Endo-Tray und EMS-Scaling-Tips im Autoklav befinden. Es wurde ein Stromverbrauch von 19,95 kWh errechnet.³⁶ Dieser Wert ist bedeutend höher als der Wert in der vorliegenden Studie, dies lässt sich jedoch damit begründen, dass in der vorliegenden Studie der Stromverbrauch anteilig auf das zu autoklavierende Instrument heruntergerechnet wurde. In der täglichen Praxis wäre es unrealistisch, den Autoklaven mit nur einem Instrument zu beladen.

6.1.4 Datengrundlagen und PCF Berechnung

Die Methode, die zur Berechnung des PCF verwendet wurde, ist in den Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 festgelegt.⁴³ Dies ist eine gängige Methode, die standardmäßig in Studien zur Ökobilanzierung verwendet wird.^{36, 88, 129} Es wurde sich außerdem nach den Guidelines des IPCC gerichtet. Als Indikator wurde GWP 100 verwendet.

Für die Berechnung des PCF stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Darunter speziell in Deutschland entwickelte Protokolle wie das *Memorandum Carbon Footprint* oder die Norm DIN EN ISO 14064-1. Diese Norm ist jedoch hauptsächlich für die Bilanzierung des PCF von Unternehmen geeignet. Auch eine weitere Leitlinie, das *Greenhouse Gas Protocol*, ist primär auf Unternehmen ausgerichtet. In dieser Studie wurde die renommierte Methode des IPCC verwendet, da diese auch international Anerkennung findet. Die Leitlinie wurde 2019 zuletzt aktualisiert. An der Entstehung der Leitlinie waren 280 Experten und Wissenschaftler aus 47 Ländern beteiligt. Die Leitlinie bietet eine gute wissenschaftliche Grundlage zur Berechnung von Treibhausgasemissionen.^{1, 71}

Die Daten, auf deren Grundlage der PCF berechnet wurde, teilweise eigenständig erhoben. In einzelnen Fällen war es jedoch erforderlich, auf externe Quellen zurückzugreifen. Zu diesem Zweck wurde ein Verzeichnis erstellt, in dem die Herkunft jedes einzelnen Datensatzes systematisch dokumentiert wurde. Jeder Datensatz wurde, soweit es möglich war, durch eine zweite Quelle validiert. Gab es zu einem Datensatz mehrere Informationen, wurde ein Mittelwert aus den Datensätzen gebildet.

Bei einigen Komponenten war das exakt übereinstimmende Material nicht in der Datenbank Ecoinvent 3.10 verfügbar. Teilweise mussten Kompromisse getroffen werden und dem Originalmaterial ähnliche Materialien flossen in die Berechnung mit ein. Die Daten wurden daher auf ihre Genauigkeit hin beurteilt. Die Skala reichte von „*poor*“ über „*medium*“, „*good*“ bis „*very good*“. Die Datensätze, welche mit „*poor*“ oder „*medium*“ bewertet waren, wurden in der Unsicherheitsberechnung mit einer größeren möglichen Wertspanne versehen.

Zu Beginn war vorgesehen, ausschließlich die Bilanzierungssoftware Umberto zur Berechnung des PCF zu verwenden. Aufgrund von Problemen mit der Schnittstelle zur Software der Monte-Carlo-Simulation wurde jedoch zusätzlich ein eigenes

Bilanzierungstool auf Basis einer Excel-Datei entwickelt. Für jeden Datensatz konnte so auf Grundlage von Material und Gewicht sein PCF in kgCO₂eq errechnet werden. Es wurde für den Gesamtprozess „analoge Abformung“ ein PCF generiert. Bei der digitalen Abformung wurden drei unterschiedliche Berechnungen durchgeführt. Jeweils eine für jede mögliche Scanspitze.

6.1.5 Berechnung der Unsicherheiten in der Datenerhebung

Für die Berechnung der Unsicherheiten in der Datengrundlage mussten unter anderem die Menge der verwendeten Handschuhe festgelegt werden.

Die vorhandene Literatur zur Haltbarkeit von Handschuhen liefert uneinheitliche Ergebnisse. Es werden Versagensraten von 3-42 % beschrieben. Unterschiede traten je nach Hersteller und Nutzungsdauer auf.^{61, 74} Da die Tragedauer für die Abformungen mit ca. 9-14 min relativ gering war, wurden geringe Versagensraten angenommen. Für den Fall, dass ein ganzes Paar Handschuhe ersetzt werden muss, wurden etwas höhere Wahrscheinlichkeiten angenommen, da zusätzlich zu Materialversagen der Fall eintreten kann, dass der Handschuh wegen Verschmutzung gewechselt wird.

Die Menge an A-Silikon, Alginat und Gips ist von der Kiefergröße des Patienten abhängig. Daher ist es nicht sinnvoll, die Mengen der verschiedenen Materialien in beliebiger Weise schwanken zu lassen. Ein Patient mit einer Löffelgröße 3 im Oberkiefer wird auch für den Gegenkiefer eine größere Löffelgröße und somit einen höheren Materialbedarf haben. Die Mengen an dünnfließendem A-Silikon, Alginat, A-Silikon für das Bissregistrat und Gips wurden daher abhängig von der Menge an dickfließendem A-Silikon innerhalb der Versuchsergebnisse variiert.

6.1.6 Einschränkungen der PCF Berechnung

Die Anwendung der PCF-Berechnung ist mit einigen Einschränkungen verbunden. In dieser Studie wurde ausschließlich der PCF der Abformung selbst berechnet. Somit kann über die Systemgrenzen kritisch diskutiert werden. Es wäre ebenfalls von Interesse, den PCF des gesamten Herstellungsprozesses einer Einzelzahnkrone zu ermitteln. Insbesondere die Transportwege der Patienten sowie die laborseitigen Tätigkeiten könnten einen signifikanten Einfluss auf den Gesamt-PCF haben, wurden jedoch in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt. Auch alle Kohlenstoffdioxid-Emissionen aus dem persönlichen Bereich, wie die Anreise des Behandlers/der Assistenz oder deren Kleidung und Nahrungsmittel, wurden nicht einkalkuliert. Auch die Raumnutzung während der Abformung wurde nicht in die Berechnung des PCF einbezogen. Zudem ist fraglich, ob alle Herstellerinformationen der Realität entsprechen, da es bislang kein Gesetz gibt, das Hersteller dazu verpflichtet, ihre Lieferketten offenzulegen. Dies könnte aber in Zukunft eine wichtige Hilfe bei der Erstellung von Kohlenstoffdioxid Bilanzen für Produkte sein. Der PCF sollte in jedem Fall als Entscheidungshilfe dienen, um zwischen verschiedenen Produkten oder Prozessen abzuwägen und eine fundierte Wahl zu treffen.

Die Berechnung des PCF beruht auf mehreren Annahmen, die den Anwendungsbereich der Methodik definieren und sich letztlich auf die Gültigkeit der Daten auswirken. In dieser Studie wurden in Fällen, in denen bestimmte Materialien oder Prozesse in der Ecoinvent 3.10 Datenbank nicht verfügbar waren, vergleichbare Ersatzstoffe gewählt.

6.1.7 Statistische Analyse

Zur statistischen Aufbereitung der Ergebnisse wurde Friedmans Rang-ANOVA mit paarweisen posthoc-Tests verwendet. Der Test vergleicht mehr als zwei abhängige Stichproben anhand von vergebenen Rängen auf signifikante Unterschiede. Der Vorteil des Friedman-Tests ist es, dass die untersuchten Daten nicht normalverteilt sein müssen. Die Anzahl der Iterationen (20.000) wurde anhand der bestehenden Fachliteratur im Bereich Ökobilanzierung gewählt. Dort wurde von einer Anzahl zwischen 5000 – 50.000 Iterationen berichtet.^{122, 132} P-Werte sind bei der Menge der Fallzahlen nicht aussagekräftig, da mit 20.000 Iterationen der statistische Test eine zu hohe Testpower hat. Sehr kleine Effekte können so bereits statistisch signifikant erscheinen. Deshalb ist es sinnvoll, Effektstärken substanziell zu interpretieren. Es reichen in diesem Fall die unstandardisierte Effektstärken, also die deskriptiven Statistiken, da die Ergebnisse eindeutig interpretierbar sind.

6.2 Ergebnisdiskussion

6.2.1 Sachbilanz

In der Sachbilanz der analogen Abformung ist auffällig, dass die Menge des verwendeten A-Silikons für das Bissregistrat der Menge des niedrigviskösen A-Silikons für die Präzisionsabformung stark ähnelt. Die Kartuschengröße ist identisch. Dennoch trägt das A-Silikon für das Bissregistrat einen mindestens doppelt so großen Teil zum PCF der analogen Abformung bei wie das A-Silikon für die Präzisionsabformung. Das lässt sich durch den Inhaltsstoff Platin erklären, welcher im A-Silikon für das Bissregistrat enthalten ist.

Wie in der Sachbilanz ersichtlich, tragen die Leiterplatten, die im Primescan AC enthalten sind, erheblich zum PCF der digitalen Abformung bei. Die Informationen zur Menge der Leiterplatten wurden dem Recyclingpass des Primescan AC entnommen. Wie präzise die Informationen in diesem Recyclingpass sind, lässt sich nicht feststellen. Jedoch ist zu vermuten, dass auch Blech und metallische Kleinteile im Recyclingpass unter dem Inputpunkt „Leiterplatten“ zusammengefasst wurden. Der PCF von Blech wäre deutlich geringer als der von Leiterplatten. Daher könnte der PCF der digitalen Abformung bei genaueren Informationen zu den Bestandteilen des IOS potenziell günstiger ausfallen.

Bei der Sachbilanz der verschiedenen Scanspitzen fällt auf, dass die Einweg-Scanspitze nicht wie die beiden anderen Scanspitzen im Prozess „Herstellung Primescan AC“ auftaucht. Dies liegt daran, dass die Einweg-Scanspitze nach jedem Scanvorgang entsorgt werden muss. Somit ist der Anteil des Prozesses „Herstellung Primescan AC“ bei der Einweg-Scanspitze an deren gesamtem PCF um 0,1 gCO₂eq geringer. Die Herstellung und Entsorgung der Einweg-Scanspitze wird im Prozess „Arbeitsplatz reinigen“ berücksichtigt.

Die Sachbilanz, die alle Input- und Output-Ströme auflistet, lässt sich aufgrund des Fehlens vergleichbarer Studien nicht mit anderen Daten abgleichen.

6.2.2 Ergebnis Monte-Carlo-Simulation

Die Unsicherheiten in der Datenerhebung führen zu Unsicherheiten im Ergebnis. In dieser Studie wurden die Unsicherheiten in der Datenerhebung mit einer Monte-Carlo-Simulation abgebildet. Es wurden 20.000 Iterationen durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind als Bereich angegeben, nicht als fester Wert. Der Bereich lässt sich beliebig weit einschränken, jedoch nimmt damit die Wahrscheinlichkeit ab, dass das Ergebnis korrekt ist. In dieser Studie wurde ein Bereich gewählt, der sich mit 80 % Sicherheit bestimmen lässt. Des Weiteren wurde aufgrund der Schiefe der Verteilung in dieser Studie der Median statt eines Mittelwerts gewählt.

Für die analoge Abformung lag das Minimum bei 1,15 kgCO₂eq und das Maximum bei 5,28 kgCO₂eq. Mit 80 % Sicherheit liegt das Ergebnis zwischen 1,682 kgCO₂eq und 2,754 kgCO₂eq. Der Median lag bei 2,150 kgCO₂eq.

Bei der digitalen Abformung mit einer Einweg-Scanspitze lag das Minimum bei 0,26 kgCO₂eq und das Maximum bei 4,57 kgCO₂eq. Mit 80 % Sicherheit liegt das Ergebnis zwischen 0,424 kgCO₂eq und 0,855 kgCO₂eq. Der Median lag bei 0,557 kgCO₂eq.

Bei der digitalen Abformung mit einer autoklavierbaren Mehrweg-Scanspitze lag das Minimum bei 0,21 kgCO₂eq und das Maximum bei 5,15 kgCO₂eq. Mit 80 % Sicherheit liegt das Ergebnis zwischen 0,353 kgCO₂eq und 0,822 kgCO₂eq. Der Median lag bei 0,510 kgCO₂eq.

Bei der digitalen Abformung mit einer wischdesinfizierbaren Mehrweg-Scanspitze lag das Minimum bei 0,19 kgCO₂eq und das Maximum bei 3,67 kgCO₂eq. Mit 80 % Sicherheit liegt das Ergebnis zwischen 0,293 kgCO₂eq und 0,705 kgCO₂eq. Der Median lag bei 0,406 kgCO₂eq.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich bereits ein deutlicher Trend ablesen. Der PCF der analogen Abformung war in jedem Fall bedeutend höher als der der digitalen Abformung, unabhängig von der verwendeten Scanspitze.

In den wenigsten LCA-Studien wird eine Monte-Carlo-Simulation verwendet, obwohl die Methode zur Unsicherheitsanalyse von LCAs sehr gut geeignet ist und in mehreren Studien explizit empfohlen wird.^{47, 122} Die traditionelle Ökobilanz (LCA) führt keine quantitative Unsicherheitsanalyse durch. Ohne die damit verbundene Unsicherheit zu beschreiben, kann die Zuverlässigkeit der Bewertungsergebnisse jedoch zweifelhaft sein.

In dieser Studie wurden für die Monte-Carlo-Simulation 20.000 Iterationen gewählt. Dies liefert eine ausreichend große Stichprobengröße. Des Weiteren erwiesen sich 20.000 Iterationen als guter Mittelweg im Vergleich zu anderen Studien.

In einer Lebenszyklusanalyse und Monte-Carlo-Simulation zur Bewertung der Umweltauswirkungen der Förderung von LNG (Liquified Natural Gas) -Fahrzeugen wurden beispielsweise 50.000 Iterationen gewählt.¹³²

In einer anderen Studie aus dem Jahr 2004, welche sich speziell mit der Quantifizierung und Reduktion von Unsicherheiten in LCAs beschäftigte, wurden hingegen nur 5.000 Iterationen durchgeführt.¹²²

6.2.3 PCF der analogen und digitalen Abformung im Vergleich

Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation wurden statistisch ausgewertet. Dazu wurde die zweifaktorielle Varianzanalyse für Ränge nach Friedman bei verbundenen Stichproben verwendet.

Es zeigte sich deutlich, dass die analoge Abformung stets den höchsten PCF aufwies. Diese Abformmethode hatte somit am häufigsten Rang vier inne. Die digitale Abformung mit einer Einweg-Scanspitze belegte am häufigsten Rang drei. Und wies somit unter den Scanspitzen den höchsten PCF auf. Die digitale Abformung mit einer autoklavierbaren Mehrweg-Scanspitze belegte am häufigsten Rang zwei. Die digitale Abformung mit einer wischdesinfizierbaren Mehrweg-Scanspitze belegte am häufigsten Rang eins. Diese Abformmethode wies somit insgesamt den niedrigsten PCF auf. Die Unterschiede aller Abformmethoden waren statistisch signifikant.

Die Wischdesinfektion wird momentan stark diskutiert. Seit Jahrzehnten wird die Wischdesinfektion in der zahnärztlichen Praxis angewendet. Für große Geräte wie Behandlungseinheiten, Tubus-Röntgengeräte oder Intraoralscanner ist diese Form der Desinfektion unerlässlich. Andere Desinfektionsarten wie maschinelle Verfahren oder die Tauchdesinfektion sind für größere Geräte in der Zahnarztpraxis nicht anwendbar. Im Oktober 2021 wurde jedoch vom Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) und dem Robert Koch-Institut (RKI) ein Schreiben zum Thema „Validierung der abschließenden Desinfektion von semikritischen Medizinprodukten mittels Wischdesinfektion.“ versandt. Darin wurde gefordert, dass die maschinellen Desinfektionsverfahren validierbar und daher vorrangig anzuwenden seien. Die Verfahrensschritte der Wischdesinfektion müssten von der durchführenden Person für jedes aufbereitete Medizinprodukt reproduzierbar belegt werden können. Bisher gibt es jedoch keine offizielle Leitlinie zur Wischdesinfektion. Die Durchführbarkeit einer Validierung der Wischdesinfektion vor Ort ist äußerst fraglich. Noch konnte keine abschließende Einigung der Bundeszahnärztekammer und der Länderbehörden herbeigeführt werden.¹⁰³

Es wird bereits an Validierungsmethoden der Wischdesinfektion geforscht. Eine Studie aus dem Jahr 2020 kam zu dem Schluss, dass die Wischdesinfektion ebenfalls zu einer akzeptablen Reduktion der Testbakterien *S. aureus* und *P. aeruginosa* führte.⁶⁸

In einer Studie wurde die Desinfektion von Krankenhausböden, Waschbecken und Türgriffen mit verschiedenen Reinigungsmitteln verglichen. Getestet wurden Seife, Desinfektionsmittel und ein probiotisches Reinigungsmittel. Es konnte gezeigt werden, dass die Diversität der Bakterien sich bei allen drei Reinigungsmitteln nur unwesentlich unterschied. Die Krankenhausinfektionen (pro 1000 Patiententage) waren bei der Desinfektion und dem probiotischen Reinigungsmittel gleich.⁷⁷

In der Praxis kommt es regelmäßig vor, dass analoge Abformungen wiederholt werden müssen, wenn diese unvollständig oder fehlerhaft sind. Je früher der Fehler erkannt wird, desto geringer sind die Folgefehler. Der Prozentsatz der wiederholungsbedürftigen Abformungen liegt je nach Quelle zwischen 39 % und 89,1 %.^{7, 116} Die benötigten Materialien, um eine erfolgreiche Abformung durchzuführen, verdoppeln sich so bei einem Fehler. Der PCF der analogen Abformung ist somit maßgeblich davon abhängig, ob und wie oft eine Abformung wiederholt werden muss. Diese Unsicherheit wurde in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

In einer Studie aus dem Jahr 2021 wurden 17 Studien zum Thema analoge vs. digitale Abformung untersucht. Die Anzahl der Wiederholungen wurde bei der analogen Abformung mit $1,66 \pm 1,15$ angegeben. Bei der digitalen Abformung waren es $3,33 \pm 3,51$. Dabei wurde das Nachscannen eines Bereichs bereits als Wiederholung gewertet.¹²⁴ Somit ergibt sich die höhere Zahl der Wiederholungen bei der digitalen Abformung. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass Fehler bei der digitalen Abformung zeiteffizient und ressourcensparend korrigiert werden können.

Frühere Studien stellten fest, dass vor allem Transportwege stark zum PCF eines Prozesses beitragen.⁴⁰ So zum Beispiel die An- und Abreise des Patienten. Im Hinblick auf den PCF des kompletten Herstellungswegs einer Einzelzahnkrone sind auch Transportwege ins Zahntechniklabor relevant. Diese Faktoren wurden in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt. Behandlungen, bei denen die Abformung digital durchgeführt wird, ist teilweise sogar nur eine einzige Behandlungssitzung nötig. Der Weg ins Zahntechniklabor und die erneute Anreise des Patienten fallen also weg. Bei der Analyse des vollständigen Workflows zur Herstellung einer Einzelzahnkrone lässt sich annehmen, dass der PCF des digitalen Herstellungswegs signifikant niedriger ist als der des analogen Herstellungswegs.

6.2.4 Input- und Output-Ströme, welche den PCF der Abformverfahren besonders stark prägen

Die Inputs wurden nach verschiedenen Aspekten kategorisiert. Zunächst erfolgte eine Sortierung der Hauptinputs gemäß den einzelnen Prozessschritten. Anschließend wurde eine Aufstellung erstellt, welche Materialien einen signifikanten Einfluss auf den PCF haben. Darüber hinaus wurden die Hauptinputs unter den Rohstoffen identifiziert.

Die Einwegmaterialien und deren Entsorgung machten den größten Anteil des PCFs der analogen Abformung aus. Daher stellt die Reduzierung des Einsatzes dieser Einwegmaterialien die wichtigste Stellschraube dar, um den PCF der analogen Abformung zu senken. Es sollte stets nur die absolut notwendige Menge an Material verwendet werden. In einer Studie aus dem Jahr 2012 wurde festgestellt, dass die Herstellung von Silikonen höhere Treibhausgasemissionen verursacht als die von Stahl oder verschiedenen Kunststoffen.¹³⁵ Was den PCF der Silikone laut dieser Studie deutlich verbessern kann, ist das Recyceln der Silikone. Es gibt bereits Unternehmen, welche sogenanntes Post-Industrial-Silikon wiederverwerten. Die Silikonteile werden zunächst zerkleinert, dann hoch erhitzt und durchlaufen schließlich noch chemische Prozesse, um anschließend wiederverwertet zu werden. Dies wird momentan nur für Silikone im industriellen Umfeld genutzt, da hier größere Mengen anfallen.¹¹ Das Recycling von Dental-Silikonen ist aufgrund der Hygienerichtlinien und Abfallentsorgungsschlüssel schwierig. Es gibt jedoch bereits Unternehmen, welche Dubliersilikon recyceln und erneut zur Verwendung aufbereiten. Derzeit entsteht etwa die Hälfte des Gipses als Abfallprodukt der Kohlekraftwerke. Mit dem Umstieg auf erneuerbare Energie entfällt diese Quelle. Daher könnte das Recycling von Gips in Zukunft an Relevanz gewinnen. Die Gipsmodelle könnten im Zuge der Wiederaufbereitung gesiebt, gemahlen und Störstoffe werden entfernt.¹²³ Auch hier stehen aber die Hygienerichtlinien an oberster Stelle und die Wiederverwendung von kontaminierten Materialien ist aktuell verboten.

Beim PCF der analogen und digitalen Abformung spielen unter anderem die Herstellung und Entsorgung der Handschuhe eine wesentliche Rolle. Ein erster Schritt zur Reduzierung der Kohlenstoffdioxidemissionen wäre es, den Verbrauch an Handschuhen so gering wie möglich zu halten. Auch die Art der Handschuhe spielt eine Rolle. Die wenigsten Behandler werden sterile Handschuhe für eine einfache Abformung wählen. Es ist jedoch zu erwähnen, dass sterile Handschuhe einen höheren PCF haben als

unsterile. Der Unterschied von Latex- und Nicht-Latex Handschuhen bezüglich ihres PCFs war sehr gering.⁶⁹ Wird ein Handschuh bei der Abformung verwendet, ist er jedoch meist mit Speichel oder Blut kontaminiert. Dann muss er entsprechend AS 180104 entsorgt und verbrannt werden. Im Jahr 2023 untersuchte eine Studie das Recycling von gebrauchten Einweghandschuhen. Dabei sollten die Handschuhe später als Bestandteil von 3D gedrucktem Beton genutzt werden.⁹⁴ Das ist nur möglich, wenn die Handschuhe vorher nicht kontaminiert wurden. Ein Faktor um Handschuhe einzusparen ist die Verwendung von hochwertigen Handschuhen, um zu vermeiden das ein Handschuh reißt und ersetzt werden muss.

Die Rohstoffe, welche bei der analogen Abformung die größte Rolle spielten, waren unter anderem Polypropylen und Acrylnitril. Diese beiden Rohstoffe kommen in Kunststoffen vor. Kunststoffe wurden unter anderem benötigt, um die Kartuschen für das A-Silikon herzustellen. Bei einer kleineren Menge A-Silikon pro Kartusche ist der Anteil, den die Verpackung an der einzelnen Abformung hat, höher. Es sind daher im Hinblick auf den PCF größere Packungen zu bevorzugen. Das Isopropanol spielte als Desinfektionsmittel im PCF der analogen und digitalen Abformung eine Rolle. Es wurde in einer Studie zum Vergleich von Desinfektionstüchern nachgewiesen, dass Isopropanol, im Vergleich zu zwei anderen Desinfektionsmitteln, den höchsten Einfluss auf die Umwelt hatte. Das Desinfektionsmittel, welches in dieser Studie am besten abschnitt, war quartäres Ammonium.⁸⁸

Wie bereits erwähnt, hängt der endgültige PCF der digitalen Abformung maßgeblich davon ab, wie der Anteil der einzelnen Abformung an der Herstellung des Primescan AC IOS ausfällt. Das wiederum ist abhängig von der Nutzungsdauer, den digitalen Abformungen pro Tag, der Nutzungsdauer des Primescan AC pro Tag und der benötigten Zeit pro digitale Abformung. In den Tab. 12.34 bis Tab. 12.37 finden sich einige Beispiele mit verschiedenen Use-Cases. Für die Lebensdauer wurden Zeiträume von zwei, vier, sechs und acht Jahren angenommen, wobei ein Jahr mit 220 Arbeitstagen veranschlagt wurde. Als benötigte Zeit pro Abformung wurde die in den Versuchen ermittelte durchschnittliche Zeit angenommen. Das Ergebnis wird in gCO₂eq angegeben. Aus den Tab. 12.34 bis Tab. 12.37 kann entnommen werden, dass selbst im schlechtesten Szenario (zwei Jahre Lebenszeit, eine Abformung pro Woche, 0,17 Std. Nutzung pro Tag) die digitale Abformung der analogen in Bezug auf den PCF überlegen ist. Der ideale Fall hingegen wäre, den IOS möglichst lange zu benutzen (Lebenszeit < acht Jahre) und

möglichst viele Abformungen damit durchzuführen, um somit analoge Abformungen zu ersetzen.

6.2.5 Handlungsempfehlungen aus der Pilotstudie zum Thema Abformungen für weitere Bereiche einer nachhaltigen Zahnmedizinischen Versorgung

Aus dieser Studie lassen sich einige Handlungsempfehlungen für die Praxis ableiten.

Die digitale Abformung sollte im Hinblick auf den PCF der analogen Abformung vorgezogen werden. Bei der digitalen Abformung sollte die wischdesinfizierbare Mehrweg-Scanspitze, wenn die regionalen Hygienevorschriften dies erlauben, bevorzugt werden.

Einwegprodukte sollten, soweit möglich, vermieden werden. Das OpraGate, welches bei der digitalen Abformung verwendet wurde, kann durch einen wischdesinfizierbaren Wangenretraktor ersetzt werden. Es sollte außerdem eine minimale Anzahl an Handschuhen verwendet werden. Dies lässt sich durch den Kauf von hochwertigen Handschuhen, welche weniger oft reißen, realisieren.

Statt Isopropanol sollte ein umweltfreundlicheres Desinfektionsmittel, wie zum Beispiel quartäre Ammoniumverbindungen verwendet werden.

Die korrekte Mülltrennung kann dazu beitragen, den PCF zu reduzieren, indem Papier der Kreislaufwirtschaft zugeführt wird, anstatt im Restmüll verbrannt zu werden.

Seitens der Hersteller wäre es vorteilhaft für den PCF, möglichst große Packungsgrößen zu verwenden.

Der IOS sollte für eine maximale Anzahl von Abformungen verwendet werden und über möglichst viele Jahre genutzt werden, um den PCF der digitalen Abformung weiter zu senken.

Einige dieser Handlungsempfehlungen lassen sich auch auf andere Bereiche der Zahnmedizin übertragen. Die Nullhypothese, nach welcher die Ergebnisse der Pilotstudie der Abformung sich nicht auf weitere Bereiche der zahnmedizinischen Versorgung übertragen lassen, wurde demnach abgelehnt.

7 Zusammenfassung

Ziel dieser Pilotstudie war es, den PCF der analogen und digitalen Abformung bei der Versorgung mit einer Einzelzahnkrone zu bestimmen und zu vergleichen. Es wurden Untersuchungen zum Zeitbedarf, zur Materialmenge und zum Stromverbrauch der Abformverfahren unter Berücksichtigung von 15 Patientenfällen durchgeführt. Außerdem wurde analysiert, welche Input- und Output-Ströme den PCF besonders beeinflussen. Zudem wurden Unsicherheiten in der Datengrundlage bewertet und mit einer Monte-Carlo-Simulation bereinigt. Der PCF der analogen Abformung war statistisch signifikant höher als der der digitalen Abformung. Die digitale Abformung mit Einweg-Scanspitze hatte den höchsten PCF, gefolgt von der autoklavierbaren Mehrweg-Scanspitze. Der niedrigste PCF wurde bei der wischdesinfizierbaren Mehrweg-Scanspitze festgestellt. Bei der analogen Abformung beeinflussten vor allem die Einwegmaterialien wie A-Silikon, Alginat und Gips den PCF. Bei der digitalen Abformung waren die Hauptfaktoren die verwendeten Handschuhe, die Leiterplatten im IOS und Isopropanol für Reinigungszwecke. Bei der Datenerhebung für die Sachbilanz traten verschiedene Unsicherheitsfaktoren auf. Die Monte-Carlo-Simulation ermöglichte es, Schwankungen und Unsicherheiten in den Ergebnissen zu quantifizieren und zu visualisieren. Aus dieser Studie lassen sich praxisnahe Handlungsempfehlungen ableiten. Die digitale Abformung sollte der analogen Abformung in Bezug auf den PCF vorgezogen werden. Wenn es die lokalen Hygienevorschriften erlauben ist eine wischdesinfizierbare Mehrweg-Scanspitze zu bevorzugen. Einwegprodukte sollten, wenn möglich, vermieden werden. Das OpraGate kann durch einen wischdesinfizierbaren Wangenretraktor ersetzt werden. Eine minimale Verwendung von Handschuhen ist anzustreben, was durch den Einsatz hochwertiger Handschuhe möglich ist. Hersteller sollten größere Packungsgrößen anbieten. Der IOS sollte für viele Abformungen und über längere Zeiträume genutzt werden, um den PCF weiter zu senken.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass diese Studie einen Beitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit, wie sie im Triple Bottom Line Modell definiert ist, leisten konnte. Diese Pilotstudie zeigt, dass es auch unter Einhaltung aller Hygienerichtlinien möglich ist den ökologischen Fußabdruck einer zahnmedizinischen Behandlung zu reduzieren, etwa durch Digitalisierung und die Verwendung hochwertiger Materialien sowie die Vermeidung von Einwegmaterialien.

8 Summary

The aim of this pilot study was to determine and compare the Product Carbon Footprint (PCF) of analogue and digital impression systems in the context of single-tooth crown restorations. The study evaluated the time requirements, material consumption, and energy usage associated with each impression system. An analysis was conducted to identify which input and output flows had the greatest impact on the PCF. Furthermore, uncertainties in the data basis were assessed and addressed using a Monte Carlo simulation. The PCF of the analogue impression was found to be statistically significantly higher than that of the digital impression systems with intraoral scanner (IOS). Among digital systems, the impression using a disposable scan tip resulted in the highest PCF, followed by the use of an autoclavable reusable scan tip. The lowest PCF was achieved with a wipe-disinfectable reusable scan tip. For analogue impressions, disposable materials such as A-silicone, alginate and dental stone contributed most significantly to the PCF. In contrast, for digital impressions, key contributing factors included gloves, electronic components of the IOS, and isopropanol for disinfection. Several sources of uncertainty emerged during the data collection for the life cycle assessment. The application of Monte Carlo simulation allowed for the quantification and visualization of variability and uncertainty in the results.

Based on the findings, practical recommendations can be drawn: Digital impressions should be preferred over analogue impressions in terms of PCF. Where hygiene regulations permit, wipe-disinfectable reusable scan tips are recommended. The use of disposable items should be minimized. For instance, OptraGate can be substituted with a wipe-disinfectable cheek retractor. Glove consumption can be reduced by using high-quality gloves with longer durability. Additionally, manufacturers should be encouraged to offer products in larger packing units. To further lower the PCF, IOS should be used for a high number of impressions over extended periods.

In summary, this study contributes to environmental sustainability in line with the triple bottom line model. It demonstrates that the ecological footprint of dental treatments can be reduced without compromising hygiene standards through digitalization, the use of high-quality materials, and the avoidance of disposable materials.

9 Abkürzungsverzeichnis

UN: Vereinte Nationen

ESG: Environmental, Social and Corporate Governance

PCF: Product Carbon Footprint

LCA: Life Cycle Assessment

CAD/CAM: Computer-aided Design und Computer-aided Manufacturing

CNC: Computerized Numerical Control

IOS: Intraoralscanner

STL: Standard Tessalation Language

IPCC: The Intergovernmental Panel on Climate Change

BSI: British Standards Institution

GHG: Green House Gas

GWP: Global warming potential

KRINKO: Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention

AS: Abfallschlüsselnummer

THM: Technische Hochschule Mittelhessen

OK: Oberkiefer

UK: Unterkiefer

AU: autoklavierbare Mehrweg-Scanspitze

EI: Einweg-Scanspitze

WI: wischdesinfizierbare Mehrweg-Scanspitze

KZV: Kassenzahnärztlichen Vereinigungen

DGCZ: Deutsche Gesellschaft für computergestützte Zahnheilkunde

ABS: Acrylonitrile-butadiene-styrene-copolymer

LNG: Liquefied Natural Gas

RKI: Robert Koch-Institut

BfArM: Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte

10 Darstellungsverzeichnis

10.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1: Einteilung der analogen Abformmaterialien. ⁶⁷	5
Abb. 3.2: Schematischer Ablauf eines analogen (links) und digitalen Workflows mit indirekter Digitalisierung (rechts); CAD = <i>computer-aided design</i> . ^{12, 144}	12
Abb. 3.3: Schritte einer Ökobilanz. ⁷¹	31
Abb. 4.1: Workflow zur Herstellung einer Einzelzahnkrone.	40
Abb. 4.2: Systemgrenzen.	41
Abb. 4.3: Lebenszyklus eines Produkts. ⁷¹	43
Abb. 4.4 Schritte Abformvorgang analog. a) Auswahl des Löffels, b) Bestreichen des Löffels mit Haftlack, c) Durchführung der Abformung d) Entnahme und Inspektion der Abformung	46
Abb. 4.5 Gipsmodell.	49
Abb. 4.6: Übersicht der Scanspitzen für den Primescan AC.	53
Abb. 4.7: Scan gesamt. a) Scan des Oberkiefers (OK), b) Scan des Unterkiefers (UK), c) Scan des Zusammenbisses	54
Abb. 4.8 Anteil Herstellung Primescan AC Formel. kgCO_2eq : Kilogramm CO_2 -Äquivalent, η_{Abf} : Anzahl der Abformungen, ND: Nutzungsdauer, d: Tag, h: Stunde ...	60
Abb. 5.1: Primescan AC Zeitaufwand. Sek: Sekunde.....	67
Abb. 5.2: Primescan AC Stromverbrauch. Wh: Wattstunde.....	67
Abb. 5.3: Unsicherheiten der Endergebnisse in gCO_2eq . 10% Perzentil: angenommene Untergrenze der Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation, Median: Zentralwert der Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation, 90% Perzentil: angenommene Obergrenze der Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation.....	71
Abb. 5.4: Zweifaktorielle Varianzanalyse für Ränge nach Friedman bei verbundenen Stichproben.....	72
Abb. 11.1: Prozessschritte Analog.	162
Abb. 11.2: Prozessschritte digital, EI.	162
Abb. 11.3: Prozessschritte digital, AU.	163
Abb. 11.4: Prozessschritte digital, WI.....	163

Abb. 11.5: Materialanteile analog.....	164
Abb. 11.6: Materialanteile digital, EI.....	164
Abb. 11.7: Materialanteile digital, AU.....	165
Abb. 11.8: Materialanteile digital, WI.	165
Abb. 11.9: Rohstoffanteile analog, (*Datensatz Ecoinvent).....	166
Abb. 11.10: Rohstoffanteile digital, EI, (*Datensatz Ecoinvent).....	167
Abb. 11.11: Rohstoffanteile digital, AU, (*Datensatz Ecoinvent).....	168
Abb. 11.12: Rohstoffanteile digital, WI, (*Datensatz Ecoinvent).	168

10.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Einteilung der Abformmaterialien nach Viskosität. ⁶⁷	6
Tab. 3.2: Einordnung PCF im Alltag.	20
Tab. 3.3 : Alginat Bilanz. ¹⁰⁶	25
Tab. 3.4: Wirkungskategorien Lebenszyklusanalysen. ⁷¹	27
Tab. 4.1: Prozesse analoger und digitaler Abformung innerhalb der Systemgrenzen. ...	42
Tab. 5.1: Signifikanztest.....	73
Tab. 11.1: Materialien	124
Tab. 11.2: Messmittel.....	125
Tab. 11.3: Maschinenliste.	126
Tab. 11.4: Stromverbrauch Behandlungseinheit.	127
Tab. 11.5: Archimedisierung Ergebnisse.	127
Tab. 11.6: Datenblatt, Auflistung aller Dateninputs	128
Tab. 11.7: Monte-Carlo-Simulation, Parameter, analoge Abformung.....	132
Tab. 11.8: Monte-Carlo-Simulation, Parameter, digitale Abformung.	133
Tab. 11.9: Analoge Abformung Zeitmessung.....	134
Tab. 11.10 Analoge Abformung Materialgewicht.	135

Tab. 11.11: Stromverbrauch Maschinen (analog).....	135
Tab. 11.12: Stromverbrauch Thermodesinfektor.....	136
Tab. 11.13: Primescan AC Strom/Zeitmessung 2.....	136
Tab. 11.14: Stromverbrauch Autoklav.....	137
Tab. 11.15: Sachbilanz analog, Abformung (Präzision).....	137
Tab. 11.16: Sachbilanz analog, Abformung (Gegenkiefer).....	139
Tab. 11.17: Sachbilanz analog, Abformung (Bissregistrator).....	140
Tab. 11.18: Sachbilanz analog, Herstellung Gipsmodell.....	141
Tab. 11.19: Sachbilanz analog, Abformung desinfizieren.....	142
Tab. 11.20: Sachbilanz analog, Abformlöffel reinigen.....	143
Tab. 11.21: Sachbilanz analog, Komponenten desinfizieren.....	143
Tab. 11.22: Sachbilanz analog, Arbeitsplatz reinigen.....	145
Tab. 11.23: Sachbilanz digital, Abformung durchführen.....	146
Tab. 11.24: Sachbilanz digital EI, Arbeitsplatz reinigen.....	148
Tab. 11.25: Sachbilanz digital EI, Anteilige Herstellung Primescan AC.....	149
Tab. 11.26: Sachbilanz digital AU, Abformung durchführen.....	151
Tab. 11.27: Sachbilanz digital AU, Arbeitsplatz reinigen.....	152
Tab. 11.28: Sachbilanz digital AU, Komponenten desinfizieren.....	154
Tab. 11.29: Sachbilanz digital AU, Anteilige Herstellung Primescan AC.....	155
Tab. 11.30: Sachbilanz digital WI, Abformung durchführen.....	157
Tab. 11.31: Sachbilanz digital WI, Arbeitsplatz reinigen.....	158
Tab. 11.32: Sachbilanz digital WI, Anteilige Herstellung Primescan AC.....	159
Tab. 11.33: Werte Monte-Carlo-Simulation.....	161
Tab. 11.34: Anteil der Herstellung bei durchschnittlicher Abformdauer [gCO ₂ eq], Nutzungsdauer acht Jahre.....	169
Tab. 11.35: Anteil der Herstellung bei durchschnittlicher Abformdauer [g CO ₂ -eq], Nutzungsdauer sechs Jahre.....	170

Tab. 11.36: Anteil der Herstellung bei durchschnittlicher Abformdauer [g CO₂-eq],
Nutzungsdauer vier Jahre171

Tab. 11.37: Anteil der Herstellung bei durchschnittlicher Abformdauer [g CO₂-eq],
Nutzungsdauer zwei Jahre.....172

11 Literaturverzeichnis

1. (IPCC). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2019.
2. Abed R, Ashley P, Duane B, Crotty J, Lyne A. An environmental impact study of inter-dental cleaning aids. *Journal of clinical periodontology* 2023;50 (1):2-10, 2023.
3. Afrashtehfar KI, Alnakeb NA, Assery MKM. Accuracy of Intraoral Scanners versus traditional Impressions: A rapid umbrella review. *The journal of evidence-based dental practice* 2022;22 (3):101719, 2022.
4. Al Hamad KQ. Learning curve of intraoral scanning by prosthodontic residents. *The Journal of prosthetic dentistry* 2020;123 (2):277-283, 2020.
5. Antoniadou M, Varzakas T, Tzoutzas I. Circular Economy in Conjunction with Treatment Methodologies in the Biomedical and Dental Waste Sectors. *Circular economy and sustainability* 2021;1 (2):563-592, 2021.
6. Arora S, Mittal S, Dogra V. Eco-friendly dentistry: Need of future. An overview. *Journal of Dental & Allied Sciences* 2017;6 (1), 2017.
7. Ashley M, McCullagh A, Sweet C. Making a good impression: (a 'how to' paper on dental alginate). *Dental update* 2005;32 (3):169-170, 172, 174-165, 2005.
8. Aswani K, Wankhade S, Khalikar A, Deogade S. Accuracy of an intraoral digital impression: A review. *Journal of Indian Prosthodontic Society* 2020;20 (1):27-37, 2020.
9. Avinash B, Avinash BS, Shivalinga BM, Jyothikiran S, Padmini MN. Going green with eco-friendly dentistry. *The journal of contemporary dental practice* 2013;14 (4):766-769, 2013.
10. Bader F, Setz J. Benetzbarkeit und Wiedergabegenauigkeit von Abformmassen. *Dtsch Zahnärztl Z* 1991;46:346-348, 1991.
11. Bernd Brandt EK, Harald Pilz, Dariya Hadzhiyska, Peter Seizov. Silicon-Chemistry Carbon balance, an assessment of Greenhouse Gas emissions and reductions, 2012.
12. Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *British dental journal* 2008;204 (9):505-511, 2023.
13. Bock NC, Klaus K, Liebel MM, Ruf S, Wöstmann B, Schlenz MA. What to Prefer in Patients with Multibracket Appliances? Digital vs. Conventional Full-Arch Impressions-A Reference Aid-Based In Vivo Study. *Journal of clinical medicine* 2023;12 (9), 2023.

14. Borglin L, Pekarski S, Saget S, Duane B. The life cycle analysis of a dental examination: Quantifying the environmental burden of an examination in a hypothetical dental practice. *Community dentistry and oral epidemiology* 2021;49 (6):581-593, 2021.
15. Bosniac P, Rehmann P, Wöstmann B. Comparison of an indirect impression scanning system and two direct intraoral scanning systems in vivo. *Clin Oral Investig* 2019;23 (5):2421-2427, 2019.
16. Bowden B, Iomhair AN, Wilson M. Evaluating the environmental impact of the Welsh national childhood oral health improvement programme, Designed to Smile. *Community dental health* 2021;38 (1):15-20, 2021.
17. Buchmann D, Schlenz-Helmke MA, Wöstmann B. Untersuchung zum Stand der Digitalisierung von Zahnarztpraxen in Deutschland. In: Medizinisches Lehrzentrum für Zahn- M-uK, Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Fachbereich Medizin der Justus-Liebig- Universität Gießen, editor.; 2023.
18. Bundesamt U; Die Treibhausgase, Emissionen vergleichbar machen: die Treibhausgaspotenziale – Global Warming Potentials (GWP) [abgerufen am 09.09.2025. Link: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>.
19. Bundesministerium für Umwelt N, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz Memorandum Product Carbon Footprint, 2009.
20. Bundestag D. Environmental Social Governance (ESG) in der EU-Taxonomie. In: WD 5: Wirtschaft und Verkehr EuL, editor.; 2022.
21. Bundesvereinigung K. Statistische Basisdaten zur Vertragszahnärztlichen Versorgung, 2022-2024.
22. Byrne D, Saget S, Davidson A, Haneef H, Abdeldaim T, Almudahkah A, et al. Comparing the environmental impact of reusable and disposable dental examination kits: a life cycle assessment approach. *British dental journal* 2022;233 (4):317-325, 2022.
23. Cao Y, Chen JK, Deng KH, Wang Y, Sun YC, Zhao YJ. [Accuracy of three intraoral scans for primary impressions of edentulous jaws]. *Beijing Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban* 2020;52 (1):129-137, 2020.
24. Caputi S, Varvara G. Dimensional accuracy of resultant casts made by a monophasic, one-step and two-step, and a novel two-step putty/light-body impression technique: an in vitro study. *J Prosthet Dent* 2008;99 (4):274-281, 2008.
25. Center“ HfHCMH; Wie oft kann die i700-Spitze im Autoklaven sterilisiert werden? [abgerufen am 09.09.2025. Link: <https://support.medit.com/hc/de-de/articles/4408236228109-Wie-oft-kann-die-i700-Spitze-im-Autoklaven-sterilisiert-werden>.
26. Cervino G, Fiorillo L, Herford AS, Laino L, Troiano G, Amoroso G, et al. Alginate Materials and Dental Impression Technique: A Current State of the Art and Application to Dental Practice. *Marine drugs* 2018;17 (1), 2018.

27. Chai J, Pang IC. A study of the "thixotropic" property of elastomeric impression materials. *The International journal of prosthodontics* 1994;7 (2):155-158, 1994.
28. Chee WW, Donovan TE. Fine detail reproduction of very high viscosity poly(vinyl siloxane) impression materials. *The International journal of prosthodontics* 1989;2 (4):368-370, 1989.
29. Chen SY, Liang WM, Chen FN. Factors affecting the accuracy of elastometric impression materials. *J Dent* 2004;32 (8):603-609, 2004.
30. Chiu A, Chen YW, Hayashi J, Sadr A. Accuracy of CAD/CAM Digital Impressions with Different Intraoral Scanner Parameters. *Sensors (Basel, Switzerland)* 2020;20 (4), 2020.
31. Craig RG. Review of dental impression materials. *Advances in dental research* 1988;2 (1):51-64, 1988.
32. Craig RG, Powers JM, Wataha JC. Zahnärztliche Werkstoffe - Eigenschaften und Verarbeitung. München: *Urban & Fischer*, 2006.
33. Derksen W, Tahmaseb A, Wismeijer D. A Randomized Clinical Trial comparing the clinical fit of CAD/CAM monolithic zirconia Fixed Dental Prostheses (FDP) on ti-base abutments based on digital or conventional impression techniques. One year follow-up. *Int J Prosthodont* 2021;34 (6):733-743, 2021.
34. Derrien G, Le Menn G. Evaluation of detail reproduction for three die materials by using scanning electron microscopy and two-dimensional profilometry. *The Journal of prosthetic dentistry* 1995;74 (1):1-7, 1995.
35. Diker B, Tak Ö. Comparing the accuracy of six intraoral scanners on prepared teeth and effect of scanning sequence. *J Adv Prosthodont* 2020;12 (5):299-306, 2020.
36. Duane B, Borglin L, Pekarski S, Saget S, Duncan HF. Environmental sustainability in endodontics. A life cycle assessment (LCA) of a root canal treatment procedure. *BMC oral health* 2020;20 (1):348, 2020.
37. Duane B, Croasdale K, Ramasubbu D, Harford S, Steinbach I, Stancliffe R, et al. Environmental sustainability: measuring and embedding sustainable practice into the dental practice. *British dental journal* 2019;226 (11):891-896, 2019.
38. Duane B, Harford S, Ramasubbu D, Stancliffe R, Pasdeki-Clewer E, Lomax R, et al. Environmentally sustainable dentistry: a brief introduction to sustainable concepts within the dental practice. *British dental journal* 2019;226 (4):292-295, 2019.
39. Duane B, Harford S, Steinbach I, Stancliffe R, Swan J, Lomax R, et al. Environmentally sustainable dentistry: energy use within the dental practice. *British dental journal* 2019;226 (5):367-373, 2019.
40. Duane B, Hyland J, Rowan JS, Archibald B. Taking a bite out of Scotland's dental carbon emissions in the transition to a low carbon future. *Public health* 2012;126 (9):770-777, 2012.

41. Duane B, Pilling J, Saget S, Ashley P, Pinhas AR, Lyne A. Hand hygiene with hand sanitizer versus handwashing: what are the planetary health consequences? *Environmental science and pollution research international* 2022;29 (32):48736-48747, 2022.
42. e.V. DDIfN. DIN En ISO 14044 Oktober, 2006.
43. e.V. DDIfN. Ökobilanz - DIN EN ISO 14040, 2009.
44. Eckelman MJ, Sherman J. Environmental Impacts of the U.S. Health Care System and Effects on Public Health. *PLoS one* 2016;11 (6):e0157014, 2016.
45. Eckelman MJ, Sherman JD, MacNeill AJ. Life cycle environmental emissions and health damages from the Canadian healthcare system: An economic-environmental-epidemiological analysis. *PLoS medicine* 2018;15 (7):e1002623, 2018.
46. ecoinvent; ecoinvent v3.10 [abgerufen am 09.09.2025. Link: <https://ecoinvent.org/ecoinvent-v3-10/>].
47. Elorri Igos EB, Rodolphe Meyer, Paul Baustert, Benoit Othoniel. How to treat uncertainties in life cycle assessment studies? *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2018; 24:794–807, 2018.
48. Ender A, Zimmermann M, Mehl A. Accuracy of complete- and partial-arch impressions of actual intraoral scanning systems in vitro. *Int J Comput Dent* 2019;22 (1):11-19, 2019
49. England PH. Carbon modelling within dentistry, Towards a sustainable future, 2018.
50. Fenske C, Sodat Khonsari MR, Jüde HD. Der Einfluss verschiedener Abformtechniken auf die Dimensionstreuung von Modellstümpfen. *Dtsch Zahnärztl Z* 2001;56:35-38, 2001.
51. Fenske C, Sodat Khonsari MR, Stroink M, Jüde HD. Einfluss des Präparationswinkels auf die Dimensionstreuung von Modellstümpfen unter Berücksichtigung der Abformtechnik. *ZWR* 2000;109:381-386, 2000.
52. Field J, Martin N, Duane B, Vital S, Mulligan S, Livny A, et al. Embedding environmental sustainability within oral health professional curricula-Recommendations for teaching and assessment of learning outcomes. *European journal of dental education : official journal of the Association for Dental Education in Europe* 2023;27 (3):650-661, 2023.
53. García-Gil I, Perez de la Calle C, Lopez-Suarez C, Pontevedra P, Suarez MJ. Comparative analysis of trueness between conventional and digital impression in dental-supported fixed dental prosthesis with vertical preparation. *Journal of clinical and experimental dentistry* 2020;12 (9):e896-e901, 2020.
54. Garg A, Guez G. Trends in implant dentistry: green dentistry. *Dental implantology update* 2010;21 (12):91-96, 2010.

55. Gelbard S, Aoskar Y, Zalkind M, Stern N. Effect of impression materials and techniques on the marginal fit of metal castings. *J Prosthet Dent* 1994;71 (1):1-6, 1994.
56. Google; Google Maps [abgerufen am 09.09.2025]. Link: <https://www.google.com/maps>.
57. Grose J, Burns L, Mukonoweshuro R, Richardson J, Mills I, Nasser M, et al. Developing sustainability in a dental practice through an action research approach. *British dental journal* 2018;225 (5):409-413, 2018.
58. Grünheid T, McCarthy SD, Larson BE. Clinical use of a direct chairside oral scanner: an assessment of accuracy, time, and patient acceptance. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics* 2014;146 (5):673-682, 2014
59. Güth JF, Edelhoff D, Schweiger J, Keul C. A new method for the evaluation of the accuracy of full-arch digital impressions in vitro. *Clin Oral Investig* 2016;20 (7):1487-1494, 2016.
60. Hondrum SO. Tear and energy properties of three impression materials. *The International journal of prosthodontics* 1994;7 (6):517-521, 1994.
61. Hübner NO, Goerdts AM, Mannerow A, Pohrt U, Heidecke CD, Kramer A, et al. The durability of examination gloves used on intensive care units. *BMC infectious diseases* 2013;13:226, 2013.
62. Hung SH, Purk JH, Tira DE, Eick JD. Accuracy of one-step versus two-step putty wash addition silicone impression technique. *J Prosthet Dent* 1992;67 (5):583-589, 1992.
63. Idris B, Houston F, Claffey N. Comparison of the dimensional accuracy of one- and two-step techniques with the use of putty/wash addition silicone impression materials. *J Prosthet Dent* 1995;74 (5):535-541, 1995.
64. Institut RK; Vollzugshilfe zur Entsorgung von Abfällen aus Einrichtungen des Gesundheitsdienstes [abgerufen am 09.09.2025]. Link: https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/Krankenhaushygiene/Kommission/Downloads/L_AGA-Rili.pdf?__blob=publicationFile.
65. Institution BS. Publicly Available Specification 2050, 2011.
66. International Organization for Standardization. ISO 6873 for Gypsum Products. Technical Committee TC 106/SC 2; 2013.
67. J. R. Strub MK, J.C. Türp, S. Witkowski, G. Heydecke, S. Wolfart. Curriculum Prothetik, Band II. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. *Quintessenz Verlags-GmbH*, 2011.
68. Jacobshagen A, Gemein S, Exner M, Gebel J. Test methods for surface disinfection: comparison of the Wiperator ASTM standard E2967-15 and the 4-field test EN 16615. *GMS hygiene and infection control* 2020;15:Doc04, 2020.

69. Jamal H, Lyne A, Ashley P, Duane B. Non-sterile examination gloves and sterile surgical gloves: which are more sustainable? *The Journal of hospital infection* 2021;118:87-95, 2021.
70. Westdeutscher Rundfunk Köln, Jannes Höke SR; CO2-Rechner [abgerufen am 09.09.2025]. Link: <https://www.quarks.de/umwelt/klimawandel/co2-rechner-fuer-auto-flugzeug-und-co/>.
71. Kaltschmitt M. Umweltbewertung für Ingenieure, Methoden und Verfahren, 2015.
72. Kappert HF, Eichner K. Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Stuttgart: Thieme, 2008.
73. Katrin Ostertag TB, Carsten Gandenberger, Bärbel Hüsing, Matthias Pfaff. Ressourcenschonung im Gesundheitssektor -Erschließung von Synergien zwischen den Politikfeldern Ressourcenschonung und Gesundheit. Umweltbundesamt; 2021.
74. Kerr LN, Chaput MP, Cash LD, O'Malley LG, Sarhrani EM, Teixeira JC, et al. Assessment of the durability of medical examination gloves. *Journal of occupational and environmental hygiene* 2004;1 (9):607-612, 2004.
75. Khinda V, Rao D, Sodhi SPS. Nitrous Oxide Inhalation Sedation Rapid Analgesia in Dentistry: An Overview of Technique, Objectives, Indications, Advantages, Monitoring, and Safety Profile. *International journal of clinical pediatric dentistry* 2023;16 (1):131-138, 2023.
76. Kim JH, Kim KB, Kim SH, Kim WC, Kim HY, Kim JH. Quantitative evaluation of common errors in digital impression obtained by using an LED blue light in-office CAD/CAM system. *Quintessence international (Berlin, Germany : 1985)* 2015;46 (5):401-407, 2015.
77. Klassert TE, Zubiria-Barrera C, Neubert R, Stock M, Schneegans A, López M, et al. Comparative analysis of surface sanitization protocols on the bacterial community structures in the hospital environment. *Clinical microbiology and infection : the official publication of the European Society of Clinical Microbiology and Infectious Diseases* 2022;28 (8):1105-1112, 2022.
78. Landis SRUAE. Comparative life cycle assessment of reused versus disposable dental burs, 2014.
79. Lauvahutanon S, Takahashi H, Shiozawa M, Iwasaki N, Asakawa Y, Oki M, et al. Mechanical properties of composite resin blocks for CAD/CAM. *Dental materials journal* 2014;33 (5):705-710, 2014.
80. Lee IK, DeLong R, Pintado MR, Malik R. Evaluation of factors affecting the accuracy of impressions using quantitative surface analysis. *Operative dentistry* 1995;20 (6):246-252, 1995.
81. Lehmann KM. Zahnärztliche Propädeutik - Einführung in die Zahnheilkunde. Deutscher Zahnärzte Verlag, Köln, 2011.

82. Lehmann KM. Zahnärztliche Propädeutik - Einführung in die Zahnheilkunde. *Deutscher Zahnärzte Verlag, Köln*, 2015.
83. Leticia S. de Bortoli LMS, Márcio Celso Fredel, Dachamir Hotza, Bruno Henriques. Ecological footprint of biomaterials for implant dentistry: is the metal-free practice an eco-friendly shift? *Journal of Cleaner Production* 2019;213, 2019.
84. Lewandowski S, Ullrich A. Improvements for calculating and labeling the product carbon footprint on the basis of the Nutri-Score, 2022.
85. Lim K, Yap AU, Agarwalla SV, Tan KB, Rosa V. Reliability, failure probability, and strength of resin-based materials for CAD/CAM restorations. *Journal of applied oral science : revista FOB* 2016;24 (5):447-452, 2012.
86. Luthardt R. Die Genauigkeit zahnärztlicher Abformungen für festsitzenden Zahnersatz. *Dtsch Zahnärztl Z* 2004;59:372-380, 2004.
87. Lyne A, Ashley P, Saget S, Porto Costa M, Underwood B, Duane B. Combining evidence-based healthcare with environmental sustainability: using the toothbrush as a model. *British dental journal* 2020;229 (5):303-309, 2020.
88. Maloney B, McKerlie T, Nasir M, Murphy C, Moi M, Mudalige P, et al. The environmental footprint of single-use versus reusable cloths for clinical surface decontamination: a life cycle approach. *The Journal of hospital infection* 2022;130:7-19, 2022.
89. Martin N, Sheppard M, Gorasia G, Arora P, Cooper M, Mulligan S. Drivers, opportunities and best practice for sustainability in dentistry: A scoping review. *Journal of dentistry* 2021;112:103737, 2021.
90. Marxkors R. Lehrbuch der zahnärztlichen Prothetik. *Deutscher Zahnärzte Verlag, Köln*, 2000.
91. Marxkors R, Meiners H. Taschenbuch der zahnärztliche Werkstoffkunde. *Deutscher Zahnärzte Verlag, Köln*, 2005.
92. Medizin Abfallmanager; [abgerufen am 09.09.2025]. Link: <https://www.abfallmanager-medizin.de/>
93. Moon TYK, John K. , Masterson, Robert E. . Comparison of CEREC Primescan Image Quality between Disposable and Reusable Mirror Sleeves, 2022.
94. Mousavi SS, Dehestani M. On the possibility of using waste disposable gloves as recycled fibers in sustainable 3D concrete printing using different additives. *Scientific Reports* 2023;13 (1):10812, 2023.
95. Muhamedagic B, Muhamedagic L, Masic I. Dental office waste - public health and ecological risk. *Materia socio-medica* 2009;21 (1):35-38, 2009.
96. Mulimani P. Green dentistry: the art and science of sustainable practice. *British dental journal* 2017;222 (12):954-961, 2017.

97. Mundt J, Kemper M. The Challenges of PCF Creation in the Automotive Value Chain, 2024.
98. Muthu SS. LCA Based Carbon Footprint Assessment. 1st ed, 2021.
99. Naumovski B, Kapushevska B. Dimensional Stability and Accuracy of Silicone - Based Impression Materials Using Different Impression Techniques - A Literature Review. *Prilozi (Makedonska akademija na naukite i umetnostite Oddelenie za medicinski nauki)* 2017;38 (2):131-138, 2017.
100. Nissan J, Laufer BZ, Brosh T, Assif D. Accuracy of three polyvinyl siloxane putty-wash impression techniques. *J Prosthet Dent* 2000;83 (2):161-165, 2000.
101. Noack T, Balkenhol M, Ferger P, Wöstmann B. Klinisch erreichbare Abformgenauigkeit von A-Silikon. *Dtsch Zahnärztl Z* 2004;59:590-592, 2004.
102. Noack T, Balkenhol M, Wöstmann B. Möglichkeiten und Grenzen der Doppelmischabformung bei prothetischer Versorgung. *ZWR* 2004;113:451-454, 2004.
103. online z. Validierung bei Wischdesinfektionen von semikritischen Medizinprodukten, Droht eine neue Bürokratiewelle? *zm online*, 22/2023.
104. Ostertag K, Bratan T, Gandenberger C, Hüsing B, Pfaff M. Ressourcenschonung im Gesundheitssektor-Erschließung von Synergien zwischen den Politikfeldern Ressourcenschonung und Gesundheit. Abschlussbericht, 2021.
105. Parlament, Europäisches. Recht auf Reparatur, 2024.
106. Piccinno F, Hischier R, Seeger S, Som C. Eco-Efficient Process Improvement at the Early Development Stage: Identifying Environmental and Economic Process Hotspots for Synergetic Improvement Potential. *Environmental science & technology* 2018;52 (10):5959-5967, 2018.
107. Praxislaboratorien DG; Deutsche Gesellschaft Praxislaboratorien [abgerufen am 09.09.2025]. Link: <https://www.dgpl.de/>.
108. Punj A, Bompolaki D, Garaicoa J. Dental Impression Materials and Techniques. *Dental clinics of North America* 2017;61 (4):779-796, 2017.
109. Quaas SR, H. Kommunikation ist alles - Schnittstellen der CAD/CAM Systeme. *digital_dental news* 2007;1:20-23, 2007.
110. Rehmann P, Schierz S, Gohlke HL, Winkler G, Wöstmann B. Präzisionsabformung. *DFZ* 2010;54:67-79, 2010.
111. Rehmann P, Sichwardt V, Wöstmann B. Maintenance of Intraoral scanning systems. *Int J Prosthodont*, 2016.
112. Resende CCD, Barbosa TAQ, Moura GF, Tavares LDN, Rizzante FAP, George FM, et al. Influence of operator experience, scanner type, and scan size on 3D scans. *The Journal of prosthetic dentistry* 2021;125 (2):294-299, 2021.

113. Richardson J, Grose J, Manzi S, Mills I, Moles DR, Mukonoweshuro R, et al. What's in a bin: A case study of dental clinical waste composition and potential greenhouse gas emission savings. *British dental journal* 2016;220 (2):61-66, 2016.
114. Rudolph H, Graf MR, Kuhn K, Rupf-Kohler S, Eirich A, Edelmann C, et al. Performance of dental impression materials: Benchmarking of materials and techniques by three-dimensional analysis. *Dental materials journal*, 2015.
115. Sadat-Khonsari MR, Fenske C, Taghavi M, Jüde HD. Der Einfluss der Abzugsrichtung des Abformlöffels auf die Abformung präparierter Stümpfe. *Dtsch Zahnärztl Z* 1999;54:658-661, 1999.
116. Samet N, Shohat M, Livny A, Weiss EI. A clinical evaluation of fixed partial denture impressions. *J Prosthet Dent* 2005;94 (2):112-117, 2005.
117. Schlenz MA, Schulz-Weidner N, Olbrich M, Buchmann D, Wöstmann B. Insights into the digitalization of dental practices: A cross-sectional pilot study in Hesse. *Int J Comput Dent* 2025;28 (1):9-19, 2025.
118. Schuster HRSWM. Der CO₂ -Fußabdruck der Anästhesie, Wie die Wahl volatiler Anästhetika die CO₂ -Emissionen einer anästhesiologischen Klinik beeinflusst, 2020.
119. Schweiger J. KA. CAD/CAM in der digitalen Zahnheilkunde Fuchstal: teamwork media GmbH, 2017.
120. Seelbach P, Brueckel C, Wostmann B. Accuracy of digital and conventional impression techniques and workflow. *Clin Oral Investig* 2013;17 (7):1759-1764, 2013.
121. Shen C. Impression Materials. In: Anusavice KJ (Hrsg.). Phillip's Science of Dental Materials. London: *Saunders*, 2003.
122. Shih-Chi Lo H-wM, Shang-Lien Lo. Quantifying and reducing uncertainty in life cycle assessment using the Bayesian Monte Carlo method. *Science of the Total Environment* 2004;340 (2005) 23 – 33, 2004.
123. SILADENT R; Dentalgips recycling [abgerufen am 09.09.2025. Link: <https://www.recycling-dental.de/gipsycle/>].
124. Siqueira R, Galli M, Chen Z, Mendonça G, Meirelles L, Wang HL, et al. Intraoral scanning reduces procedure time and improves patient comfort in fixed prosthodontics and implant dentistry: a systematic review. *Clin Oral Investig* 2021;25 (12):6517-6531, 2021.
125. Sirona D; Broschüre Aquasil Ultra+ [abgerufen am 09.09.2025. Link: file:///C:/Users/aproth/Downloads/RES-Brochure-Aquasil-Ultra-Plus-DE-web.pdf].
126. Sirona D; CEREC Primescan AC Recyclingpass [abgerufen am 09.09.2025. Link: <https://www.dentsplysirona.com/content/dam/master/product-procedure-brand-categories/cerec/product-categories/recycling-pass/CER-RECY-CEREC-Primescan-AC-Omniscam-AC-DE-EN-6725787-2020-01-10.pdf>].

127. Sirona D; Instructions for Use English Aquasil Bite Vinyl Polysiloxane Bite Registration Material [abgerufen am 09.09.2025. Link: file:///C:/Users/aproth/Downloads/Aquasil%20Bite%20MV01%20DS_mit%20Links_F.pdf.
128. Sivaramakrishnan G, Alsobaiei M, Sridharan K. Patient preference and operating time for digital versus conventional impressions: a network meta-analysis. *Australian dental journal* 2020;65 (1):58-69, 2020.
129. Smith L, Ali M, Agrissais M, Mulligan S, Koh L, Martin N. A comparative life cycle assessment of dental restorative materials. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials* 2023;39 (1):13-24, 2023.
130. Steinbach I, Stancliffe R, Berners-Lee M, Duane B. Carbon modelling within dentistry. Towards a sustainable future. *Public Health England*, 2018.
131. Strub JR, Türp JC, Witkowski S, Hürzeler MB, Kern M. Curriculum Prothetik 5., überarbeitete und erweiterte Auflage, 2022.
132. Sun S, Ertz M. Life cycle assessment and Monte Carlo simulation to evaluate the environmental impact of promoting LNG vehicles. *MethodsX* 2020;7:101046, 2020.
133. Tapie L, Lebon N, Mawussi B, Fron Chabouis H, Duret F, Attal JP. Understanding dental CAD/CAM for restorations--the digital workflow from a mechanical engineering viewpoint. *Int J Comput Dent* 2015;18 (1):21-44, 2015.
134. Umweltbundesamt; CO₂-Rechner [abgerufen am 09.09.2025. Link: https://uba.co2-rechner.de/de_DE/.
135. UNEP. GEO5 – Global Environment Outlook. United Nations Environment Programme. 2012.
136. V DDIfNe. DIN EN ISO 14067, 2019.
137. V. DIfNe. DIN EN ISO 14064-1, 2018.
138. Walker WE, Rotmans J, van der Sluijs JP, van Asselt MBA., Janssen P KvKM. Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support, 2003.
139. WORLD D; Sea Rates® [abgerufen am 09.09.2025. Link: <https://www.searates.com/de/>.
140. World Resources Institute WBCfSD. Greenhouse Gas Protocol, 1998.
141. Wöstmann B. Abformung und Modellherstellung. In: Koeck B (Hrsg.). Kronen- und Brückenprothetik. Praxis der Zahnheilkunde. *Urban & Fischer* 1999; Kapitel 5:133-163, 1999.
142. Wöstmann B. Die Abformung als Grundlage für eine langfristige prothetische Versorgung. *Zahnarztl Mitt* 2005;95 (21):2856- 2863, 2005.

143. Wöstmann B. Klinische Bestimmungsvariablen bei der Abformung präparierter Zähne. *Stomatologie* 1996;93:51-57, 1996.
144. Wöstmann B. Wie genau lassen sich präparierte Zähne am Patienten abformen? *ZWR* 1996;105:247-250, 1996.
145. Wöstmann B, Dohle A, Rettberg S. Zur Frage der in vivo erreichbaren Abformgenauigkeit. *Dtsch Zahnärztl Z* 1994;49:679-682, 1994.
146. Wöstmann B, Höing M, Ferger P. Vergleich von hand- und maschinengemischten Abformmassen (Pentamix-System). *Dtsch Zahnärztl Z* 1998;53:753-756, 1998.
147. Yatmaz BB, Raith S, Reich S. Accuracy of four recent intraoral scanners with respect to two different ceramic surfaces. *Journal of dentistry* 2023;130:104414, 2023.
148. Yilmaz H, Aydin MN. Digital versus conventional impression method in children: Comfort, preference and time. *International journal of paediatric dentistry* 2019;29 (6):728-735, 2019.
149. Yilmaz H, Eglenen MN, Cakmak G, Yilmaz B. Effect of Impression Technique and Operator Experience on Impression Time and Operator-Reported Outcomes. *Journal of prosthodontics : official journal of the American College of Prosthodontists* 2021;30 (8):676-683, 2021.
150. Yu H, Al-Hussein M, Nasser R, Cheng RJ. Sustainable precast concrete foundation system for residential construction. *Canadian Journal of Civil Engineering* 2008;35 (2):190-199, 2008.
151. Zimmermann M, Mehl A, Mörmann WH, Reich S. Intraoralscanner: eine aktuelle Übersicht. *Int J Comput Dent* 2015;18:101-129, 2015.

11.1 Publikationsverzeichnis

Aus der vorliegenden Arbeit sind bisher folgende Publikationen hervorgegangen:

- Daum A, Schlenz-Helmke MA, Drath K, Völker F, Weigand H, Rohn H. Buchbeitrag in “Innovative Ansätze für die Nachhaltigkeitslehre und Forschung in der Hochschulbildung”, Walter Leal Filho, Transdisziplinäre Nachhaltigkeitsforschung in der zahnmedizinischen Versorgung: Pilotstudie zum CO₂-Fußabdruck der analogen und digitalen Abformung, 2025.
- Schlenz-Helmke MA, Drath K, Daum A, Völker F, Weigand H, Rohn H. Nachhaltigkeit in der Zahnmedizin: Kann die digitale Abformung zur Reduktion des ökologischen Fußabdrucks beitragen? Quintessenz Zahnmedizin, 05/2025.
- Daum A, Drath K, Weigand H, Schlenz-Helmke MA, Völker F, Rohn H, Sustainability in Dentistry – Insights into Waste Impacts from a Carbon Footprint Comparison Between Conventional and Digital Impression Techniques, Waste 4,5/2026.

12 Anhang

Tab. 12.1: Materialien

Materialtyp	Name	Hersteller	LOT Nummer	Haltbarkeit
Handschuhe	Vasco Nitril soft white	B. Braun	2101093211	12/2025
Haftlack (A-Silikon)	<i>Universaladhäsiv</i>	Dentsply Sirona	10072568	04/2025
A-Silikon (hochviskös)	<i>Aquasil Ultra + Soft Putty Regular Set DECA</i>	Zhermack SpA	1712281824	12/2025
Einweg-Mischspitze	Einweg-Mischspitze	Zhermack SpA	1712281824	12/2025
A-Silikon (niedrigviskös)	<i>Aquasil Ultra + XLV</i>	Zhermack SpA	160317	03/2026
Einweg-Mischspitze	<i>Einweg-Mischspitze</i>	Zhermack SpA	160317	03/2026
Haftlack (Alginat)	<i>Fix Tray Adhesive for Alginate</i>	Dentsply Sirona	2304000554	03/2026
Alginat	<i>Blueprint® Xcreme</i>	Zhermack SpA	2306423911	06/2028
A-Silikon (Bissregistrator)	<i>Aquasil Bite</i>	Zhermack SpA	2305422716	05/2026
Einweg-Mischspitze	Einweg-Mischspitze	Zhermack SpA	2305422716	05/2026
Desinfektionsbad Abformung/Bissregistrator	<i>Zeta 7 Solution</i>	Zhermack SpA	2501410	12/2027
Gips	<i>Elite Stone</i>	Zhermack SpA	2212328	11/2024
Destilliertes Wasser	<i>Aqua B. Braun, Ecotainer®</i>	B. Braun	250478001	12/2027
Desinfektionsmittel	<i>Sterillum</i>	PAUL HARTMANN AG	531667	12/2029
Zusatzmittel Thermodesinfektor, Neutralisationsmittel	<i>ProCare Dent 30 C, 5l</i>	Miele	-	-
Zusatzmittel Thermodesinfektor, Nachspüler	<i>ProCare Dent 40 [Typ 1]</i>	Miele	-	-

Anhang

Zusatzmittel Thermodesinfektor, Flüssigreiniger	<i>ProCare Dent 10 A, 5l</i>	Miele	-	-
Scheuermilch	Scheuermilch	<i>Clean and Clever</i>	2110786	-
Desinfektionstuch	<i>mikrozid universal wipes premium</i>	Schülke & Mayr GmbH	9781180	11/2026
Wangenretraktor	<i>OptraGate</i>	Ivoclar Vivadent	ZL13XH	07/2027
Kissen zur Feuchtigkeitskontrolle	<i>DryTips</i>	Microbrush International, Heidelberg	243504-1	12/2026
Holzspatel	-	-	-	-
Einweg-Scanspitze	<i>Einweg-Scanspitze Primescan</i>	Dentsply Sirona	6686880	-
Fenster Scanspitze	<i>Saphirglasfenster</i>	Dentsply Sirona	973400	-

Tab. 12.2: Messmittel.

Messgeräte		
Allgemein	Modell	Hersteller
Strommessgerät	<i>SEM5000 ENERGY- LOGGER</i>	<i>Voltcraft</i>
Waage	<i>KS 19 Black</i>	<i>Beurer</i>
Feinwaage	<i>XS205 DualRange</i>	<i>METTLER TOLEDO</i>

Tab. 12.3: Maschinenliste.

Maschine/ Computerprogramm	Name	Hersteller	Softwareversion/Abrufdatum
Mischgerät (Silikon)	<i>Pentamix 3</i>	<i>3M ESPE</i>	-
Mischgerät (Alginat)	<i>Cavex Alginat Mixer II</i>	<i>Cavex Holland</i>	-
Vakuumanrührgerät (Gips)	<i>Multivac compact</i>	<i>Degussa dental</i>	-
Vakuumanrührbecher	<i>Vakuumanrührbecher für Multivac</i>	<i>Degudent</i>	-
Gipstrimmer	<i>HSS-88</i>	<i>Wassermann</i>	-
Gipswaage	-	<i>Beurer</i>	-
Rüttler	-	<i>BEGO</i>	-
Thermodesinfektor	<i>PG 8591 [WW AD]</i>	<i>Miele</i>	-
Autoklav	<i>Vacuclave 318</i>	<i>Melag</i>	-
Behandlungseinheit	<i>Intego Pro</i>	<i>Dentsply Sirona</i>	-
Intraoralscanner	<i>Primescan AC</i>	<i>Dentsply Sirona</i>	5.2
LCA Software	<i>Umberto</i>	<i>iPoint-systems GmbH</i>	11
Monte-Carlo-Simulator	<i>Crystal Ball</i>	<i>ORACLE Deutschland B.V. & Co. KG</i>	11.3.0.0
Datenbank	<i>Ecoinvent</i>	<i>Ecoinvent</i>	3.10
Statistik Programm	<i>SPSS</i>	<i>IBM SPSS Statistics</i>	28
Seeroutenplaner	<i>Sea Rates®</i>	<i>DP WORLD</i>	08/2024
Routenplaner	<i>Google Maps</i>	<i>Google</i>	08/2024

Tab. 12.4: Stromverbrauch Behandlungseinheit.

	Spannung (V)	Strom (A)	Watt
Max. Verbrauch	240	3,3	792
Min. Verbrauch	100	1,5	150

Tab. 12.5: Archimedisierung Ergebnisse.

Instrument	Volumen Start	Volumen nach Zugabe des Instruments	Volumen des Instruments
Abformlöffel perforiert, OK 2	800 ml	815 ml	15 ml
Abformlöffel perforiert, UK 2	800 ml	810 ml	10 ml
Abformlöffel glatt, OK 2	800 ml	815 ml	15 ml
Abformlöffel glatt, UK 2	800 ml	810 ml	10 ml
Spiegel	800 ml	810 ml	10 ml
Sonde	800 ml	810 ml	10 ml
Pinzette	800 ml	810 ml	10 ml
Scanspitze, AU	800 ml	830 ml	30 ml

Tab. 12.6: Datenblatt, Auflistung aller Dateninputs

Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	IPCC 2021 GWP100	Einheit	Link
acrylonitrile (GLO, market for acrylonitrile)	4,666600	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/3723/impact_assessment
acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (GLO, market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer)	4,654500	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/10034/impact_assessment
Alginate (Studiendurchschnittswerte)	5,315000	kgCO ₂ eq	[7,9kg-CO ₂ eq] Piccinno, F., Hischier, R., Seeger, S., & Som, C. (2015). Life Cycle Assessment of a New Technology to Extract, Functionalize and Orient Cellulose Nanofibers from Food Waste. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 3(6), 1047–1055. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b00209 [2,73kg-CO ₂ eq] Nilsson, A. E., Bergman, K., Gomez Barrio, L. P., Cabral, E. M., & Tiwari, B. K. (2022). Life cycle assessment of a seaweed-based biorefinery concept for production of food, materials, and energy. Algal Research, 65, 102725. https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102725
aluminium, cast alloy (GLO, market for aluminium, cast alloy)	5,732000	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/7573/impact_assessment
battery cell, Li-ion, NCA (GLO, market for battery cell, Li-ion, NCA)	16,903000	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/24792/impact_assessment
battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic (GLO, market for battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic)	11,768000	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/26952/impact_assessment
cable, unspecified (GLO, market for cable, unspecified)	6,356490	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/3606/impact_assessment
carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	0,060626	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/7085/documentation
casting, aluminium, lost-wax (GLO, market for casting, aluminium, lost-wax)	102,980000	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/11689/impact_assessment
casting, brass (GLO, market for casting, brass)	0,064735	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/9230/impact_assessment
cleaning consumables, without water, in 13.6% solution state (GLO, cleaning consumables, without water, in 13.6% solution state)	3,574400	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/22092/impact_assessment
compressed air, 800 kPa gauge (RER, compressed air production, 800 kPa gauge, <30kW, average generation)	0,239540	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/5327/impact_assessment

Anhang

Computereinheit (Studiendurchschnittswert)	56,188021	kgCO ₂ eq	PCF HP 215 Pro G5 MT [290kgCO ₂ -eq] (https://h20195.www2.hp.com/v2/GetDocument.aspx?docname=c07524644) PCF Dell OptiPlex 5090 Tower [260kgCO ₂ -eq] (https://www.delltechnologies.com/asset/de-de/products/desktops-and-all-in-ones/technical-support/optiplex-5090-tower-pcf-datasheet.pdf) PCF Lenovo ThinkCentre M90/M930 Tower [528,81kgCO ₂ -eq] (https://static.lenovo.com/ww/docs/regulatory/eco-declaration/pcf-thinkcentre-m90-tower-update.pdf)
Computermonitor 21Zoll (Studiendurchschnittswert*0,9)	58,422414	kgCO ₂ eq	PCF Apple 24" [421,4kgCO ₂ -eq] (https://images.apple.com/environment/reports/docs/LED-Cinema-Display-Environmental-Report-20091120.pdf) PCF DELL 22" [359kgCO ₂ -eq] (https://i.dell.com/sites/csdocuments/CorpComm_Docs/en/carbon-footprint-P2217H-monitor.pdf) PCF Dell 21,5" [349,1kgCO ₂ -eq] (https://www.delltechnologies.com/asset/en-us/products/electronics-and-accessories/technical-support/p2222h-wost-monitor-pcf-datasheet.pdf)
DTPA, diethylenetriaminepentaacetic acid (RoW, market for DTPA, diethylenetriaminepentaacetic acid)	6,703300	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/17442/impact_assessment
electricity, medium voltage (DE, market for electricity, medium voltage)	0,420800	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/9369/impact_assessment
extrusion, plastic film (GLO, market for extrusion, plastic film)	0,556980	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/3550/impact_assessment
fan, for power supply unit, desktop computer (GLO, market for fan, for power supply unit, desktop computer)	15,614000	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/2408/impact_assessment
fibre, polyester (GLO, market for fibre, polyester)	5,006900	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/20467/impact_assessment
flat glass, coated (RoW, market for flat glass, coated)	1,251700	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/20113/impact_assessment
gypsum, mineral (RER, market for gypsum, mineral)	0,011170	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/21513/impact_assessment
injection moulding (GLO, market for injection moulding)	1,305000	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/246/impact_assessment
isopropanol (RER, market for isopropanol)	2,333600	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/18184/impact_assessment
municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)	0,530130	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/19084/impact_assessment
packaging film, low density polyethylene (GLO, market for packaging film, low density polyethylene)	3,912600	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/773/impact_assessment
packaging glas, brown (RoW, market for packaging glas, brown)	1,095300	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/9432/impact_assessment
petroleum slack wax (GLO, market for petroleum slack wax)	1,489400	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/20860/impact_assessment
polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade (GLO, market for polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade)	3,702700	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/6889/impact_assessment
polyethylene, high density, granulate (GLO, market for polyethylene, high density, granulate, high density, granulate)	3,104500	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/5563/impact_assessment

Anhang

polyethylene, low density, granulate (GLO, market for polyethylene, low density, granulate)	3,257700	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/2858/impact_assessment
sawnwood, hardwood, raw, dried (u=20%) (RoW, market for sawnwood)	85,517000	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/320/impact_assessment
scrap aluminium (Europe without Switzerland, market for scrap aluminium)	0,037795	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/15501/impact_assessment
scrap steel (Europe without Switzerland, market for scrap steel)	0,018122	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/15758/impact_assessment
sheet rolling, steel (GLO, market for sheet rolling, steel)	0,389240	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/9778/impact_assessment
silicone product (RER, market for silicone product)	3,145700	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/18832/impact_assessment
steel, chromium steel 18/8 (GLO, market for steel, chromium steel 18/8)	5,110700	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/3468/impact_assessment
steel, low-alloyed (GLO, market for steel, low-alloyed)	2,119400	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/7099/impact_assessment
styrene (GLO, market for styrene)	3,805200	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/2596/impact_assessment
tap water (Europe without Switzerland, market for tap water)	0,000302	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/10939/impact_assessment
textile, woven cotton (GLO, market for textile, woven cotton)	11,072000	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/6756/impact_assessment
tissue paper (GLO, market for tissue paper)	3,022200	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/1546/impact_assessment
used Li-ion battery (GLO, market for used Li-ion battery)	1,245700	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/2817/impact_assessment
waste glass (DE, market for waste glass)	0,037600	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/18587/impact_assessment
waste paperboard (Europe without Switzerland, market group for waste paperboard)	0,926100	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/18962/impact_assessment
waste plastic, mixture (DE, market for waste plastic, mixture)	2,376300	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/17693/impact_assessment
waste, electrical and electronic cables (GLO, market for waste, electrical and electronic cables)	0,928960	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.9.1/cutoff/dataset/21942/impact_assessment
wastewater, average (Europe without Switzerland, market for wastewater, average)	0,292110	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/14821/documentation
xylene (RER, market for xylene)	1,583400	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/19025/impact_assessment
zinc (GLO, market for zinc)	2,594700	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/4402/impact_assessment
polymethyl methacrylate, sheet (GLO, market for polymethyl methacrylate, sheet)	8,759400	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/5340/impact_assessment
kraft paper (RoW, market for kraft paper)	1,036800	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/23182/impact_assessment
blow moulding (GLO, market for blow moulding)	1,304700	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/7509/impact_assessment
market for waste plastic, mixture (Italy)	1,128900	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/18268/impact_assessment
market for transport, freight, lorry, unspecified (RER)	0,153100	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/18337/impact_assessment
electricity, medium voltage (IT, market for electricity, medium voltage)	0,374770	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/2666/impact_assessment
market for nitrogen, liquid (RER)	0,188050	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/10975/impact_assessment
treatment of spent activated carbon, granular from hard coal, reactivation (RER)	0,815000	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/14815/impact_assessment
market for lubricating oil (RER)	1,662800	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/18883/impact_assessment
market for 1,4-butanediol (GLO)	6,239000	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/7279/impact_assessment

Anhang

market for acetic acid, without water, in 98% solution state (GLO)	3,298300	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/8045/impact_assessment
market for chemical, organic (GLO)	2,884900	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/7063/impact_assessment
market for electricity, low voltage (DE)	0,392700	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/5460/impact_assessment
printed paper (GLO, market for)	2,651300	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/9162/impact_assessment
Aquasil Ultra + Soft Putty Regular Set DECA without packaging according to Zhermack data (cradle to gate)	5,344700	kgCO ₂ eq	According to calculations based on supplier data
Aquasil Ultra + XLV without packaging according to Zhermack data (cradle to gate)	11,356900	kgCO ₂ eq	According to calculations based on supplier data
Blueprint® Xcreme without packaging according to Zhermack data (cradle to gate)	2,196100	kgCO ₂ eq	According to calculations based on supplier data
sheet rolling, aluminium (RER)	0,389240	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/9778/impact_assessment
Aquasil Bite without packaging according to Zhermack data (cradle to gate)	14,455200	kgCO ₂ eq	According to calculations based on supplier data
market for polypropylene, granulate (GLO)	3,517700	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/720/impact_assessment
Elite Stone without packaging according to Zhermack data (cradle to gate)	0,403000	kgCO ₂ eq	According to calculations based on supplier data
thermoforming of plastic sheets (GLO, market for)	0,597530	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/14180/impact_assessment
hazardous waste, for incineration (Europe without Switzerland, market for)	2,442600	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/15759/impact_assessment
metal working, average for aluminium product manufacturing (GLO, market for metal working, average for aluminium product manufacturing)	4,111200	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/7893/impact_assessment
metal working, average for chromium steel product manufacturing (GLO, market for metal working, average for chromium steel product manufacturing)	2,766500	kgCO ₂ eq	https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/5129/impact_assessment

Tab. 12.7: Monte-Carlo-Simulation, Parameter, analoge Abformung.

Prozess	Komponente	Schwankungen (p= Wahrscheinlichkeit)
Abformung durchführen	Handschuhe	$p(x=1\text{Paar}) = 20\%$, $p(x=1,5\text{Paar}) = 5\%$, $p(x=2\text{Paar}) = 50\%$, $p(x=2,5\text{Paar}) = 5\%$, $p(x=3\text{Paar}) = 20\%$
	A-Silikon /Alginat Menge	Silikon-, Alginat-, Bisschlüssel-, und Gipsmenge hängen von Abformlöffelgröße ab und schwanken mit gleichem Prozentwert, abhängig von A-Silikonmenge (heavy body)
	Stromverbrauch Behandlungseinheit	Schwankt nach Min und Max. Werten der Versuche
	Stromverbrauch Silikonanmischgerät	Schwankt nach Min und Max. Werten der Versuche
Abformung desinfizieren	Desinfektionsbad Abformung	1-25 Abformungen pro Woche, Dreiecksverteilung, 2,5 Abformungen pro Woche wahrscheinlichster Wert
Herstellung Gipsmodell	Stromverbrauch Rüttler	Schwankt nach Min und Max. Werten der Versuche
	Gipsmenge	Silikon-, Alginat-, Bisschlüssel-, und Gipsmenge hängen von Abformlöffelgröße ab und schwanken mit gleichem Prozentwert, abhängig von A-Silikonmenge (heavy body)
Arbeitsplatz reinigen	Papiertücher	Verschmutzungsgrad des Löffels: Faktor 0,5 - 1,5, Sterillium, Tücher und Wassermenge steigen im gleichen Verhältnis, Tücher +/- 2,5, Sterillium +/- 50%
	Scheuermilch	Da die Inputs zusammenhängen, Schwankung über einen Verschmutzungsgrad. Tücher +/- 5, Wasser immer 1/5 der Tücher-Menge, Scheuermilch immer 0,1% der Wassermenge. Desinfektionstuch +/- 1 von 1-3 Tücher
	Getränktes Tuch	Da die Inputs zusammenhängen, Schwankung über einen Verschmutzungsgrad. Tücher +/- 5, Wasser immer 1/5 der Tücher-Menge, Scheuermilch immer 0,1% der Wassermenge. Desinfektionstuch +/- 1 von 1-3 Tücher
	Papiertücher	Da die Inputs zusammenhängen, Schwankung über einen Verschmutzungsgrad. Tücher +/- 5, Wasser immer 1/5 der Tücher-Menge, Scheuermilch immer 0,1% der Wassermenge. Desinfektionstuch +/- 1 von 1-3 Tücher

Anhang

	Handschuhe	$p(x=1\text{Paar}) = 70\%$, $p(x=1,5\text{Paar}) = 5\%$, $p(x=2\text{Paar}) = 25\%$
Abformlöffel reinigen	Sterillium	Verschmutzungsgrad des Löffels: Faktor 0,5 - 1,5, Sterillium, Tücher und Wassermenge steigen im gleichen Verhältnis, Tücher +/- 2,5, Sterillium +/- 50%
Komponenten desinfizieren	Handschuhe	$p(x=1\text{Paar}) = 70\%$, $p(x=1,5\text{Paar}) = 5\%$, $p(x=2\text{Paar}) = 25\%$
	Befüllungsanteil Thermodesinfektor	schwankt von 5,5-100%

Tab. 12.8: Monte-Carlo-Simulation, Parameter, digitale Abformung.

Prozess	Komponente	Schwankungen (p= Wahrscheinlichkeit)
Abformung durchführen	Handschuhe	$p(x=1\text{Paar}) = 20\%$, $p(x=1,5\text{Paar}) = 5\%$, $p(x=2\text{Paar}) = 50\%$, $p(x=2,5\text{Paar}) = 5\%$, $p(x=3\text{Paar}) = 20\%$
	Fenster Scanspitze	$p(x=1) = 90\%$, $p(x=2) = 10\%$
	<i>OptraGate</i>	$p(x=1\text{Stück}) = 75\%$, $p(x=2\text{Stück}) = 25\%$
	<i>DryTips</i>	$p(x=2\text{Stück}) = 80\%$, $p(x=4\text{Stück}) = 20\%$
	Holzspatel	$p(x=1\text{ Stück}) = 80\%$, $p(x=2\text{ Stück}) = 20\%$
	Zeit und Strombedarf Primescan AC + Behandlungseinheit	Schwankt nach Min und Max. Werten der Versuche
Arbeitsplatz reinigen	Handschuhe	$p(x=1\text{Paar}) = 70\%$, $p(x=1,5\text{Paar}) = 5\%$, $p(x=2\text{Paar}) = 25\%$
	Getränkte Tücher	Einweg + Auto.: $p(x=1\text{Stück}) = 15\%$, $p(x=2\text{Stück}) = 70\%$, $p(x=3\text{Stück}) = 15\%$ Wisch.: $p(x=2\text{Stück}) = 15\%$, $p(x=3\text{Stück}) = 70\%$, $p(x=4\text{Stück}) = 15\%$
Scanspitze autoklavieren	Handschuhe	$p(x=1\text{Paar}) = 70\%$, $p(x=1,5\text{Paar}) = 5\%$, $p(x=2\text{Paar}) = 25\%$
	Sterile Verpackung	$P(x=1\text{Stück}) = 100\%$
	Befüllungsanteil Autoklav	schwankt von 2-100%

Tab. 12.9: Analoge Abformung Zeitmessung.

Patient	T(Sek.) A-Silikon	T(Sek.) Alginat	T(Sek.) Bissregistrat	T(Sek.) Zwischenzeit	T (Sek.) Gesamt
1	321	265	120	247	953
2	574	315	271	100	1260
3	328	339	193	41	901
4	284	259	90	56	689
5	248	295	133	86	762
6	319	247	141	27	734
7	315	249	131	41	736
8	245	242	129	56	672
9	346	211	162	56	775
10	304	264	135	61	764
11	374	291	219	107	991
12	355	262	175	46	838
13	247	252	162	86	747
14	349	329	186	58	922
15	300	298	210	117	925
Mittelwert	327,3	274,5	163,8	79	844,6

Tab. 12.10 Analoge Abformung Materialgewicht.

Patient	Löffelgröße	Alginat (g)	A-Silikon (g)	Bissregistrat (g)
1	OK 2/ UK 2	67	40,6	6,7
2	OK 2/ UK 2	57,3	25,9	3,2
3	OK 1/ UK 1	42,6	29,6	3,9
4	OK 2/ UK 2	46,6	28	4,5
5	OK 2/ UK 2	62	36,2	2
6	OK 3/ UK 2	68,2	50	6,5
7	OK 3/ UK 3	81,2	36	4,6
8	OK 2/ UK 1	60	32,8	3,2
9	OK 2/ UK 2	65	27,2	1,6
10	OK 2/ UK 2	49,3	25,9	3,7
11	OK 2/ UK 1	52,3	31	5,5
12	OK 2/ UK 1	53,5	24,4	6,8
13	OK 2/ UK 2	55,2	33,6	5,1
14	OK 2/ UK 2	56,5	29,4	4,7
15	OK 2/ UK 2	35,1	30,4	4,7
Mittelwert		56,79	32,07	4,45

Tab. 12.11: Stromverbrauch Maschinen (analog).

Maschine	Laufzeit (Sekunden)	Stromverbrauch kWh
Mischgerät Silikon (Mittelwert)	33,13	0,0015
Mischgerät Alginat	10	0,001
Rüttler	129,93	0,001
Vakuummischgerät	180	0,006
Trimmer	82	0,009

Tab. 12.12: Stromverbrauch Thermodesinfektor.

Maschine	Laufzeit	Stromverbrauch kWh
Thermodesinfektor	40 min reinigen 34 min trocknen	5,5 %: 0,108 kWh

Tab. 12.13: Primescan AC Strom/Zeitmessung 2.

Patient	T Scan sek	kWh Scan	T Rechnen sek	kWh Rechnen	T Ruhe sek	kWh Ruhe	T Gesamt sek	kWh Gesamt
P1	253	0,015	216	0,018	348	0,001	817	0,034
P2	226	0,024	178	0,02	194	0,003	598	0,047
P3	194	0,014	104	0,011	124	0,001	422	0,026
P4	240	0,016	110	0,017	170	0,001	520	0,034
P5	215	0,009	205	0,011	122	0,001	542	0,021
P6	254	0,009	235	0,008	77	0,004	566	0,021
P7	256	0,013	180	0,008	195	0,003	631	0,024
P8	299	0,018	205	0,029	420	0,005	924	0,052
P9	252	0,026	116	0,01	246	0,008	614	0,044
P10	312	0,026	179	0,015	154	0,013	645	0,054
P11	244	0,032	83	0,006	42	0,001	369	0,039
P12	323	0,029	116	0,008	62	0,007	501	0,044
P13	286	0,019	102	0,007	52	0,002	440	0,028
P14	533	0,034	120	0,002	82	0,001	735	0,037
P15	313	0,02	96	0,005	120	0,003	529	0,028
Mittelwert	280	0,020	149,67	0,012	160,53	0,004	590,2	0,036
T Gesamt (sek)	590,20							
kWh Gesamt	0,0355							

Tab. 12.14: Stromverbrauch Autoklav.

Maschine	Laufzeit Min.	Stromverbrauch kWh
Autoklav	5:30 min	0,026 kWh

Tab. 12.15: Sachbilanz analog, Abformung (Präzision).

Abformung (Präzision)					
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit
Strom	Behandlungseinheit	market for electricity, low voltage (DE)		0,021011	kWh
Strom	Anmischgerät (Silikon)	market for electricity, low voltage (DE)		0,001467	kWh
Paar Handschuhe (ZA + Asst.)	2x Vasco Nitril soft white, 200 pcs, Durchschnittsgröße aus XS/S/M/L/XL	acrylonitrile (GLO, market for acrylonitrile)	Restmüll (Verbrennung)	0,017200	kg
	2x Vasco Nitril soft white, 200 pcs, Durchschnittsgröße aus XS/S/M/L/XL	blow moulding (GLO, market for blow moulding)		0,017200	kg
	Kartonverpackung	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,001244	kg
Haftlack	<i>Dentsply Sirona</i> (30ml) basierend auf 70 Portionen [40%]	DTPA, diethylenetriaminepentaacetic acid (RoW, market for DTPA, diethylenetriaminepentaacetic acid)	Restmüll (Verbrennung)	0,000148	kg
		isopropanol (RER, market for isopropanol)	Restmüll (Verbrennung)	0,000148	kg
	<i>Dentsply Sirona</i> (30ml) basierend auf 70 Portionen [20%]	xylene (RER, market for xylene)	Restmüll (Verbrennung)	0,000074	kg
	<i>Dentsply Sirona</i> (30ml) basierend auf 70 Portionen	packaging glas, brown (RoW, market for packaging glas, brown)	Altglas	0,000390	kg
polyethylene, high density, granulate (GLO, market for polyethylene, high density,		Restmüll (Verbrennung)	0,000040	kg	

Anhang

		granulate, high density, granulate)			
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,000050	kg
		fibre, polyester (GLO, market for fibre, polyester)	Restmüll (Verbrennung)	0,000010	kg
		carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,000259	kg
A-Silikon (hochviskös)	<i>Aquasil Ultra + Soft Putty Regular Set DECA</i> detailliert berechnet nach den Angaben des Lieferanten	<i>Aquasil Ultra + Soft Putty Regular Set DECA</i> without packaging according to Zhermack data (cradle to gate)	Restmüll (Verbrennung)	0,028567	kg
	Einweg-Mischspitze	polyethylene, high density, granulate (GLO, market for polyethylene, high density, granulate, high density, granulate)	Restmüll (Verbrennung)	0,009440	kg
	Einweg-Mischspitze	injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,009440	kg
	Kartusche, basierend auf 8 Portionen	market for polypropylene, granulate (GLO)	Restmüll (Verbrennung)	0,014625	kg
	Kartusche, basierend auf 8 Portionen	injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,014625	kg
A-Silikon (niedrigviskös)	<i>Aquasil Ultra + XLV</i> ; detailliert berechnet nach den Angaben Zhermack SpA	<i>Aquasil Ultra + XLV</i> without packaging according to Zhermack data (cradle to gate)	Restmüll (Verbrennung)	0,003500	kg
	Einweg-Mischspitze	polyethylene, high density, granulate (GLO, market for polyethylene, high density, granulate, high density, granulate)	Restmüll (Verbrennung)	0,004560	kg
	Einweg-Mischspitze	injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,004560	kg
	Kartusche, basierend auf 25 Portionen	market for polypropylene, granulate (GLO)	Restmüll (Verbrennung)	0,000884	kg
	Kartusche, basierend auf 25 Portionen	injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,000884	kg
Altglas	nach Abfalltyp	waste glass (DE, market for waste glass)		0,000390	kg
Altpapier	nach Abfalltyp	waste paperboard (Europe without Switzerland, market group for waste paperboard)		0,001503	kg
Restmüll (Verbrennung)	nach Abfalltyp	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,079196	kg

Tab. 12.16: Sachbilanz analog, Abformung (Gegenkiefer).

Abformung (Gegenkiefer)						
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit	
Strom	Behandlungseinheit	market for electricity, low voltage (DE)		0,017874	kWh	
Strom	Anmischgerät (Alginat)	market for electricity, low voltage (DE)		0,001000	kWh	
Haftlack	<i>Dentsply Sirona</i> (30ml) basierend auf 70 Portionen [40%]	DTPA, diethylenetriaminepentaacetic acid (RoW, market for DTPA, diethylenetriaminepentaacetic acid)		0,000148	kg	
		isopropanol (RER, market for isopropanol)		0,000148	kg	
	<i>Dentsply Sirona</i> (30ml) basierend auf 70 Portionen [20%]	xylene (RER, market for xylene)		0,000074	kg	
	<i>Dentsply Sirona</i> (30ml) basierend auf 70 Portionen	packaging glas, brown (RoW, market for packaging glas, brown)	Altglas	0,000390	kg	
		polyethylene, high density, granulate (GLO, market for polyethylene, high density, granulate, high density, granulate)	Restmüll (Verbrennung)	0,000040	kg	
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,000050	kg	
		fibre, polyester (GLO, market for fibre, polyester)	Restmüll (Verbrennung)	0,000010	kg	
		carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,000259	kg	
	Alginat	<i>Blueprint® Xcreme</i> Verhältnis 7/15Wasser g	<i>Blueprint® Xcreme</i> without packaging according to Zhermack data (cradle to gate)	Restmüll (Verbrennung)	0,018670	kg
			carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,000011	kg
aluminium, cast alloy (GLO, market for aluminium, cast alloy)			Restmüll (Verbrennung)	0,000001	kg	
sheet rolling, aluminium (RER)				0,000001	kg	

Anhang

Wasser	Alginat anmischen	tap water (Europe without Switzerland, market for tap water)	Restmüll (Verbrennung)	0,000040	kg
Altglas	nach Abfalltyp	waste glass (DE, market for waste glass)		0,000074	kg
Altpapier	nach Abfalltyp	waste paperboard (Europe without Switzerland, market group for waste paperboard)		0,000270	kg
Restmüll (Verbrennung)	nach Abfalltyp	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,018761	kg

Tab. 12.17: Sachbilanz analog, Abformung (Bissregistrat).

Abformung (Bissregistrat)					
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit
Strom	Behandlungseinheit	market for electricity, low voltage (DE)		0,011365	kWh
A-Silikon (Bissregistrat.)	<i>Aquasil Bite</i>	<i>Aquasil Bite</i> without packaging according to Zhermack data (cradle to gate)	Restmüll (Verbrennung)	0,004447	kg
	Einweg-Mischspitze	polyethylene, high density, granulate (GLO, market for polyethylene, high density, granulate, high density, granulate)	Restmüll (Verbrennung)	0,004950	kg
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,004950	kg
	Kartusche, basierend auf 10 Portionen	market for polypropylene, granulate (GLO)	Restmüll (Verbrennung)	0,024480	kg
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,024480	kg
Restmüll (Verbrennung)	nach Abfalltyp	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,033877	kg

Tab. 12.18: Sachbilanz analog, Herstellung Gipsmodell.

Herstellung Gipsmodell					
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit
Strom	1 Wh Rüttler 6 Wh Vakuummischgerät	market for electricity, low voltage (DE)		0,007000	kWh
Druckluft	Säuberung	compressed air, 800 kPa gauge (RER, compressed air production, 800 kPa gauge, <30kW, average generation)		0,000500	m ³
Batterie	AAA Batterien in Waage	battery cell, Li-ion, NCA (GLO, market for battery cell, Li-ion, NCA)	Verbrauchte Batterie	0,000026	kg
Gips	Elite Stone, 25kg, Klasse 4, Mischverhältnis 1/4	Elite Stone without packaging according to Zhermack data (cradle to gate)	Restmüll (Verbrennung)	0,350000	kg
		packaging film, low density polyethylene (GLO, market for packaging film, low density polyethylene)	Restmüll (Verbrennung)	0,001886	kg
		thermoforming of plastic sheets (GLO, market for)		0,001886	kg
		carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,009296	kg
Destilliertes Wasser	Aqua B. Braun, Ecotainer®, 1.000 ml	tap water (Europe without Switzerland, market for tap water)	Restmüll (Verbrennung)	0,087500	kg
	Kunststoffflasche	polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade (GLO, market for polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade)	Restmüll (Verbrennung)	0,000326	kg
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,000326	kg
Verbrauchte Batterie	nach Abfalltyp	used Li-ion battery (GLO, market for used Li-ion battery)		0,000026	kg
Altpapier	nach Abfalltyp	waste paperboard (Europe without Switzerland, market group for waste paperboard)		0,009296	kg
Restmüll (Verbrennung)	nach Abfalltyp	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,439711	kg

Tab. 12.19: Sachbilanz analog, Abformung desinfizieren.

Abformung desinfizieren					
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit
Abformung Desinfektionsmittel	Zeta 7 Solution, 1l, Konzentrat; 1% Verdünnen; wöchentliche Nutzung, [30%]	market for 1,4-butanediol (GLO)	Gefährliche Chemikalien	0,002358	kg
	Zeta 7 Solution, 1l, 1% Verdünnen, wöchentliche Nutzung [10%] / Zeta 7 Solution, 1l, 1% Verdünnen, wöchentliche Nutzung [10%]	market for acetic acid, without water, in 98% solution state (GLO)	Gefährliche Chemikalien	0,000786	kg
	Zeta 7 Solution, 1l, 1% Verdünnen, wöchentliche Nutzung [25%] / Zeta 7 Solution, 1l, 1% Verdünnen, wöchentliche Nutzung [25%]	tap water (Europe without Switzerland, market for tap water)	Gefährliche Chemikalien	0,001965	kg
	Zeta 7 Solution, 1l, 1% Verdünnen, wöchentliche Nutzung [35%] / Zeta 7 Solution, 1l, 1% Verdünnen, wöchentliche Nutzung [35%]	market for chemical, organic (GLO)	Gefährliche Chemikalien	0,002751	kg
	Kunststoffflasche	polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade (GLO, market for polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade)	Restmüll (Verbrennung)	0,000333	kg
	Kunststoffflasche	injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,000333	kg
Wasser	Zum Verdünnen des Desinfektionskonzentrats, Verhältnis 9/1	tap water (Europe without Switzerland, market for tap water)	Gefährliche Chemikalien	0,990000	kg
Restmüll (Verbrennung)	nach Abfalltyp	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,000333	kg
Gefährliche Chemikalien	AS 180106: nach Abfalltyp	hazardous waste, for incineration (Europe without Switzerland, market for)		0,000998	kg

Tab. 12.20: Sachbilanz analog, Abformlöffel reinigen.

Abformlöffel reinigen					
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit
Wasser	Zum Abspülen	tap water (Europe without Switzerland, market for tap water)	Abwasser	0,500000	kg
Papiertuch	Einlagiges, recyceltes Papiertuch ohne Verpackung	tissue paper (GLO, market for tissue paper)	Abwasser	0,011550	kg
Desinfektionsmittel	<i>Sterillium</i>	isopropanol (RER, market for isopropanol)	Abwasser	0,011790	kg
	Kunststoffflasche	polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade (GLO, market for polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade)	Restmüll (Verbrennung)	0,000825	kg
	Kunststoffflasche	injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,000825	kg
Restmüll (Verbrennung)	nach Abfalltyp	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,000825	kg
Abwasser	nach Abfalltyp	wastewater, average (Europe without Switzerland, market for wastewater, average)		0,000524	m ³

Tab. 12.21: Sachbilanz analog, Komponenten desinfizieren.

Komponenten desinfizieren					
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit
Strom	40 min reinigen (2,2kWh) 34 min trocknen (0,9kWh)	market for electricity, low voltage (DE)		0,108717	kWh
Wasser	Warmes + kaltes Wasser, Programm: Vario Dental	tap water (Europe without Switzerland, market for tap water)	Abwasser	0,002536	kg
Zusatzmittel Thermodesinfektor	Neutralisationsmittel (ProCare Dent 30 C, 5l)	cleaning consumables, without water, in 13.6% solution state (GLO, cleaning consumables, without water, in 13.6% solution state)	Abwasser	0,002536	ml

Anhang

	Kunststoffflasche	polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade (GLO, market for polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade)	Restmüll (Verbrennung)	0,000001	kg
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,000001	kg
	Nachspüler (ProCare Dent 40 [Typ 1], 1l)	cleaning consumables, without water, in 13.6% solution state (GLO, cleaning consumables, without water, in 13.6% solution state)	Abwasser	0,000761	ml
	Kunststoffflasche	polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade (GLO, market for polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade)	Restmüll (Verbrennung)	0,000000	kg
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,000000	kg
	Flüssigreiniger (ProCare Dent 10 A, 5l)	cleaning consumables, without water, in 13.6% solution state (GLO, cleaning consumables, without water, in 13.6% solution state)	Abwasser	0,007607	ml
	Kunststoffflasche	polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade (GLO, market for polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade)	Restmüll (Verbrennung)	0,000003	kg
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,000003	kg
Paar Handschuhe (Asst.)	2x Vasco Nitril soft white, 200 pcs, Durchschnittsgröße aus XS/S/M/L/XL	acrylonitrile (GLO, market for acrylonitrile)	Restmüll (Verbrennung)	0,000473	kg
		blow moulding (GLO, market for blow moulding)		0,000473	kg
	Kartonverpackung	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,000034	kg
Abwasser	nach Abfalltyp	wastewater, average (Europe without Switzerland, market for wastewater, average)		0,000013	m3
Restmüll (Verbrennung)	nach Abfalltyp	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,010903	kg

Tab. 12.22: Sachbilanz analog, Arbeitsplatz reinigen.

Arbeitsplatz reinigen (Gips & Einheit)						
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit	
Papiertuch	Einlagiges, recyceltes Papiertuch ohne Verpackung	tissue paper (GLO, market for tissue paper)	Restmüll (Verbrennung)	0,023100	kg	
Wasser	Zum Abspülen	tap water (Europe without Switzerland, market for tap water)	Abwasser	5,000000	kg	
Scheuermilch	allgemeiner Typ, 11 für die Reinigung	cleaning consumables, without water, in 13.6% solution state (GLO, cleaning consumables, without water, in 13.6% solution state)	Abwasser	0,005000	kg	
	Kunststoffflasche	polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade (GLO, market for polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade)	Restmüll (Verbrennung)	0,000750	kg	
Getränktes Tuch	<i>mikrozid universal wipes premium, 80pcs</i>	isopropanol (RER, market for isopropanol)	Gefährliche Chemikalien	0,005895	kg	
		tap water (Europe without Switzerland, market for tap water)	Gefährliche Chemikalien	0,017500	kg	
		tissue paper (GLO, market for tissue paper)	Gefährliche Chemikalien	0,004000	kg	
	Kunststoffbeutel	packaging film, low density polyethylene (GLO, market for packaging film, low density polyethylene)			0,000375	kg
		thermoforming of plastic sheets (GLO, market for)			0,000375	kg
	Hartkunststoffkappe	polyethylene, high density, granulate (GLO, market for polyethylene, high density, granulate, high density, granulate)	Restmüll (Verbrennung)		0,000300	kg
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)			0,000300	kg
	Paar Handschuhe (Asst.)	2x <i>Vasco Nitril soft white, 200 pcs,</i> Durchschnittsgröße aus XS/S/M/L/XL	acrylonitrile (GLO, market for acrylonitrile)	Restmüll (Verbrennung)	0,008600	kg
			blow moulding (GLO, market for blow moulding)			0,008600
		Kartonverpackung	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box	Altpapier		0,000622

Anhang

		production, with offset printing)			
	nach Abfalltyp	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,032750	kg
Abwasser	nach Abfalltyp	wastewater, average (Europe without Switzerland, market for wastewater, average)		0,005005	m3
Gefährliche Chemikalien	AS 180106: nach Abfalltyp	hazardous waste, for incineration (Europe without Switzerland, market for)		0,027395	kg
Altpapier	nach Abfalltyp	waste paperboard (Europe without Switzerland, market group for waste paperboard)		0,000622	kg

Tab. 12.23: Sachbilanz digital, Abformung durchführen.

Abformung durchführen					
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit
Strom	Behandlungseinheit	market for electricity, low voltage (DE)		0,035117	kWh
Strom	<i>Primescan AC</i>	market for electricity, low voltage (DE)		0,035533	kWh
Paar Handschuhe (ZA/ZÄ + Asst.)	2x <i>Vasco Nitril soft white</i> , 200 pcs, Durchschnittsgröße aus XS/S/M/L/XL	acrylonitrile (GLO, market for acrylonitrile)	Restmüll (Verbrennung)	0,017200	kg
		blow moulding (GLO, market for blow moulding)		0,017200	kg
	Kartonverpackung	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,001244	kg
<i>OptraGate</i>	Lippenstütze, Größe: Regulär, 80 Stk. Durchschnittsgröße aus R und S	styrene (GLO, market for styrene)	Restmüll (Verbrennung)	0,003156	kg
		blow moulding (GLO, market for blow moulding)		0,003156	kg
	Pappkarton	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,002229	kg
	Kunststoffbeutel	packaging film, low density polyethylene (GLO, market for packaging film, low density polyethylene)	Restmüll (Verbrennung)	0,001319	kg
		thermoforming of plastic sheets (GLO, market for)	Restmüll (Verbrennung)	0,001319	kg

Anhang

<i>DryTips</i>	Zur Feuchtigkeitskontrolle, Größe: Klein, 50 Stück Durchschnittsgröße aus L und S	textile, woven cotton (GLO, market for textile, woven cotton)	Restmüll (Verbrennung)	0,000670	kg
		polyethylene, low density, granulate (GLO, market for polyethylene, low density, granulate)	Restmüll (Verbrennung)	0,000670	kg
		extrusion, plastic film (GLO, market for extrusion, plastic film)		0,000670	kg
	Pappkarton	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,000248	kg
	Hartplastikschale	polyethylene, high density, granulate (GLO, market for polyethylene, high density, granulate, high density, granulate)	Restmüll (Verbrennung)	0,000385	kg
injection moulding (GLO, market for injection moulding)			0,000385	kg	
Holzspatel	Buchenholz, Größe: 2520mm ² x 3mm, keine Verpackung	sawnwood, hardwood, raw, dried (u=20%) (RoW, market for sawnwood)	Restmüll (Verbrennung)	0,000017	m ³
Restmüll (Verbrennung)	nach Abfalltyp	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,024735	kg
Altpapier	nach Abfalltyp	waste paperboard (Europe without Switzerland, market group for waste paperboard)		0,003721	kg

Tab. 12.24: Sachbilanz digital EI, Arbeitsplatz reinigen.

Arbeitsplatz reinigen (Scanner & Einheit)					
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit
Getränktes Tuch	<i>mikrozyd universal wipes premium, 80pcs</i>	isopropanol (RER, market for isopropanol)	Gefährliche Chemikalien	0,005895	kg
		tap water (Europe without Switzerland, market for tap water)	Gefährliche Chemikalien	0,017500	l
		tissue paper (GLO, market for tissue paper)	Gefährliche Chemikalien	0,004000	kg
	Kunststoffbeutel	packaging film, low density polyethylene (GLO, market for packaging film, low density polyethylene)	Restmüll (Verbrennung)	0,000375	kg
		thermoforming of plastic sheets (GLO, market for)		0,000375	kg
	Hartkunststoffkappe	polyethylene, high density, granulate (GLO, market for polyethylene, high density, granulate, high density, granulate)	Restmüll (Verbrennung)	0,000300	kg
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,000300	kg
Paar Handschuhe (Asst.)	<i>2x Vasco Nitril soft white, 200 pcs, Durchschnittsgröße aus XS/S/M/L/XL</i>	acrylonitrile (GLO, market for acrylonitrile)	Restmüll (Verbrennung)	0,008600	kg
		blow moulding (GLO, market for blow moulding)		0,008600	kg
	Kartonverpackung	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,000622	kg
Einweg-Scanspitze	Einweg-Scanspitze	polyethylene, high density, granulate (GLO, market for polyethylene, high density, granulate, high density, granulate)	Restmüll (Verbrennung)	0,013870	kg
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,013870	kg
	Einzelverpackung	packaging film, low density polyethylene (GLO, market for packaging film, low density polyethylene)	Restmüll (Verbrennung)	0,001250	kg
		thermoforming of plastic sheets (GLO, market for)	Restmüll (Verbrennung)	0,001250	kg
	Pappkarton, Größe 50 Stück	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box	Altpapier	0,003916	kg

Anhang

		production, with offset printing)			
Restmüll (Verbrennung)	nach Abfalltyp	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,025645	kg
Gefährliche Chemikalien	AS 180106: nach Abfalltyp	hazardous waste, for incineration (Europe without Switzerland, market for)		0,027395	kg
Altpapier	nach Abfalltyp	waste paperboard (Europe without Switzerland, market group for waste paperboard)		0,004538	kg

Tab. 12.25: Sachbilanz digital EI, Anteilige Herstellung Primescan AC.

Anteilige Herstellung Primescan AC					
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit
Batterien + Akkumulatoren	Recycling pass (A04)	battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic (GLO, market for battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic)	Elektroschrott	0,000303	kg
Leiterplatten (Computereinheit)	Recycling pass 10,52kg (A06) +0,135kg (A02) +0,45kg (C139)	Computereinheit (Studiendurchschnittswert)	Elektroschrott	0,001529	kg
LCD-Display + Folientastatur	Recycling pass (A07) 21" Monitor	Computermonitor 21Zoll (Studiendurchschnittswert*0,9)	Elektroschrott	0,000716	kg
Glas	Recycling pass (B01)	flat glass, coated (RoW, market for flat glass, coated)	Nicht-recyclebarer Abfall	0,000041	kg
Aluminium-Halbzeuge	Recycling pass (C02)	aluminium, cast alloy (GLO, market for aluminium, cast alloy)	Aluminiumschrott	0,000003	kg
		metal working, average for aluminium product manufacturing (GLO, market for metal working, average for aluminium product manufacturing)		0,000003	kg
Alu-Guss-Legierungen	Recycling pass (C03)	aluminium, cast alloy (GLO, market for aluminium, cast alloy)	Aluminiumschrott / Aluminium scrap	0,000023	kg
		casting, aluminium, lost-wax (GLO, market for casting, aluminium, lost-wax)		0,000023	kg

Anhang

Edelstähle	Recycling pass 0,25kg (C04) +1,04kg (C11) +0,09kg (A02)	steel, chromium steel 18/8 (GLO, market for steel, chromium steel 18/8)	Stahlschrott	0,000190	kg
		metal working, average for chromium steel product manufacturing (GLO, market for metal working, average for chromium steel product manufacturing)		0,000190	kg
Eisenmetalle (Stahl, Blech)	Recycling pass 12,09kg (C05) +0,27kg (A02)	steel, low-alloyed (GLO, market for steel, low-alloyed)	Stahlschrott	0,001702	kg
		sheet rolling, steel (GLO, market for sheet rolling, steel)		0,001702	kg
Zink-Guss- Legierungen	Recycling pass (C07)	zinc (GLO, market for zinc)	Stahlschrott	0,000424	kg
		casting, brass (GLO, market for casting, brass)		0,000424	kg
Leitungen + Kabelabfälle	Recycling pass 0,66kg (C14) +0,045kg (A02)	cable, unspecified (GLO, market for cable, unspecified)	Elektroschrott	0,000097	kg
Silikon, Gummi, Elastomere	Recycling pass (C16)	silicone product (RER, market for silicone product)	Nicht- recyclebarer Abfall	0,000011	kg
Kunststoffe (ABS)	Recycling pass 5,47kg (C17-C26) +0,36kg (A02)	acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (GLO, market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer)	Kunststoffabfall	0,000803	kg
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,000803	kg
Aluminiumschrott	Für Alu-Halbzeuge + Alu-Guss	scrap aluminium (Europe without Switzerland, market for scrap aluminium)		0,000026	kg
Stahlschrott	Für Stahl, Edelstahl, Zink-Guss-Legierung	scrap steel (Europe without Switzerland, market for scrap steel)		0,002316	kg
Elektroschrott	Für Elektroschrott + Kabelabfälle	waste, electrical and electronic cables (GLO, market for waste, electrical and electronic cables)		0,002645	kg

Anhang

Kunststoffabfall	Für alle Kunststoffe	waste plastic, mixture (DE, market for waste plastic, mixture)		0,000803	kg
Nicht-recyclebarer Abfall	Für den unbetrachteten Rest	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,000052	kg

Tab. 12.26: Sachbilanz digital AU, Abformung durchführen.

Abformung durchführen					
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit
Strom	Behandlungseinheit	market for electricity, low voltage (DE)		0,035117	kWh
Strom	<i>Primescan AC</i>	market for electricity, low voltage (DE)		0,035533	kWh
Paar Handschuhe (ZA/ZÄ + Asst.)	2x <i>Vasco Nitril soft white</i> , 200 pcs, Durchschnittsgröße aus XS/S/M/L/XL	acrylonitrile (GLO, market for acrylonitrile)	Restmüll (Verbrennung)	0,017200	kg
		blow moulding (GLO, market for blow moulding)		0,017200	kg
	Kartonverpackung	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,001244	kg
<i>OptraGate</i>	Lippenstütze, Größe: Regulär, 80 Stk. Durchschnittsgröße aus R und S	styrene (GLO, market for styrene)	Restmüll (Verbrennung)	0,003156	kg
		blow moulding (GLO, market for blow moulding)		0,003156	kg
	Pappkarton	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,002229	kg
	Kunststoffbeutel	packaging film, low density polyethylene (GLO, market for packaging film, low density polyethylene)	Restmüll (Verbrennung)	0,001319	kg
		thermoforming of plastic sheets (GLO, market for)	Restmüll (Verbrennung)	0,001319	kg
<i>DryTips</i>	Zur Feuchtigkeitskontrolle, Größe: Klein, 50 Stück Durchschnittsgröße aus L und S	textile, woven cotton (GLO, market for textile, woven cotton)	Restmüll (Verbrennung)	0,000670	kg
		polyethylene, low density, granulate (GLO, market for polyethylene, low density, granulate)	Restmüll (Verbrennung)	0,000670	kg
		extrusion, plastic film (GLO, market for extrusion, plastic film)		0,000670	kg

Anhang

	Pappkarton	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,000248	kg
	Hartplastikschale	polyethylene, high density, granulate (GLO, market for polyethylene, high density, granulate, high density, granulate)	Restmüll (Verbrennung)	0,000385	kg
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,000385	kg
Holzspatel	Buchenholz, Größe: 2520mm ² x 3mm, keine Verpackung	sawnwood, hardwood, raw, dried (u=20%) (RoW, market for sawnwood)	Restmüll (Verbrennung)	0,000017	m ³
Restmüll (Verbrennung)	nach Abfalltyp	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,024735	kg
Altpapier	nach Abfalltyp	waste paperboard (Europe without Switzerland, market group for waste paperboard)		0,003721	kg

Tab. 12.27: Sachbilanz digital AU, Arbeitsplatz reinigen.

Arbeitsplatz reinigen (Scanner & Einheit)					
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit
Getränktes Tuch	<i>mikrozid universal wipes premium</i> , 80pcs	isopropanol (RER, market for isopropanol)	Gefährliche Chemikalien	0,005895	kg
		tap water (Europe without Switzerland, market for tap water)	Gefährliche Chemikalien	0,017500	l
		tissue paper (GLO, market for tissue paper)	Gefährliche Chemikalien	0,004000	kg
	Kunststoffbeutel	packaging film, low density polyethylene (GLO, market for packaging film, low density polyethylene)	Restmüll (Verbrennung)	0,000375	kg
		thermoforming of plastic sheets (GLO, market for)		0,000375	kg
	Hartkunststoffkappe	polyethylene, high density, granulate (GLO, market for polyethylene, high density, granulate, high density, granulate)	Restmüll (Verbrennung)	0,000300	kg
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,000300	kg
Paar Handschuhe (Asst.)	2x <i>Vasco Nitril soft white</i> , 200 pcs,	acrylonitrile (GLO, market for acrylonitrile)	Restmüll (Verbrennung)	0,008600	kg

Anhang

	Durchschnittsgröße aus XS/S//M/L/XL	blow moulding (GLO, market for blow moulding)		0,008600	kg
	Kartonverpackung	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,000622	kg
Fenster Scanspitze	Einwegkomponente	polymethyl methacrylate, sheet (GLO, market for polymethyl methacrylate, sheet)	Restmüll (Verbrennung)	0,000737	kg
	Pappkarton, Größe 50 Stück	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,000525	kg
	Einzelverpackung	packaging film, low density polyethylene (GLO, market for packaging film, low density polyethylene)	Restmüll (Verbrennung)	0,000242	kg
Gefährliche Chemikalien	AS 180106: nach Abfalltyp	hazardous waste, for incineration (Europe without Switzerland, market for)		0,027395	kg
Restmüll (Verbrennung)	nach Abfalltyp	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,010254	kg
Altpapier	nach Abfalltyp	waste paperboard (Europe without Switzerland, market group for waste paperboard)		0,001147	kg

Tab. 12.28: Sachbilanz digital AU, Komponenten desinfizieren.

Scanspitze autoklavieren					
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit
Strom	Universal-B Programm / Universal-B program	market for electricity, low voltage (DE)		0,025900	kWh
Paar Handschuhe (Asst.)	2x <i>Vasco Nitril soft white</i> , 200 pcs, Durchschnittsgröße aus XS/S/M/L/XL	acrylonitrile (GLO, market for acrylonitrile)	Restmüll (Verbrennung)	0,000172	kg
		blow moulding (GLO, market for blow moulding)		0,000172	kg
	Kartonverpackung	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,000012	kg
Sterile Verpackung	Autoklavierbare Mehrweg-Scanspitze	packaging film, low density polyethylene (GLO, market for packaging film, low density polyethylene)	Restmüll (Verbrennung)	0,001000	kg
		printed paper (GLO, market for)	Altpapier	0,002000	kg
Wasser	Universal-B Programm	tap water (Europe without Switzerland, market for tap water)	Abwasser	0,000015	kg
Altpapier	nach Abfalltyp	waste paperboard (Europe without Switzerland, market group for waste paperboard)		0,002012	kg
Abwasser	nach Abfalltyp	wastewater, average (Europe without Switzerland, market for wastewater, average)		0,000000	m3
Restmüll (Verbrennung)	nach Abfalltyp	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,001172	kg

Tab. 12.29: Sachbilanz digital AU, Anteilige Herstellung Primescan AC.

Anteilige Herstellung Primescan AC					
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit
Batterien + Akkumulatoren	Recycling pass (A04)	battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic (GLO, market for battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic)	Elektroschrott	0,000303	kg
Leiterplatten (Computereinheit)	Recycling pass 10,52kg (A06) +0,135kg (A02) +0,45kg (C139)	Computereinheit (Studiendurchschnittswert)	Elektroschrott	0,001529	kg
LCD-Display + Folientastatur	Recycling pass (A07) 21" Monitor	Computermonitor 21Zoll (Studiendurchschnittswert*0,9)	Elektroschrott	0,000716	kg
Glas	Recycling pass (B01)	flat glass, coated (RoW, market for flat glass, coated)	Nicht-recyclebarer Abfall	0,000041	kg
Aluminium-Halbzeuge	Recycling pass (C02)	aluminium, cast alloy (GLO, market for aluminium, cast alloy)	Aluminiumschrott	0,000003	kg
		metal working, average for aluminium product manufacturing (GLO, market for metal working, average for aluminium product manufacturing)		0,000003	kg
Alu-Guss-Legierungen Alu-Guss-Legierungen	Recycling pass (C03)	aluminium, cast alloy (GLO, market for aluminium, cast alloy)	Aluminiumschrott	0,000023	kg
		casting, aluminium, lost-wax (GLO, market for casting, aluminium, lost-wax)		0,000023	kg
Edelstähle	Recycling pass 0,25kg (C04) +1,04kg (C11) +0,09kg (A02)	steel, chromium steel 18/8 (GLO, market for steel, chromium steel 18/8)	Stahlschrott	0,000190	kg
		metal working, average for chromium steel product manufacturing (GLO, market for metal working, average for chromium steel product manufacturing)		0,000190	kg

Anhang

Eisenmetalle (Stahl, Blech)	Recycling pass 12,09kg (C05) +0,27kg (A02)	steel, low-alloyed (GLO, market for steel, low-alloyed)	Stahlschrott	0,001702	kg
		sheet rolling, steel (GLO, market for sheet rolling, steel)		0,001702	kg
Zink-Guss- Legierungen	Recycling pass (C07)	zinc (GLO, market for zinc)	Stahlschrott	0,000424	kg
		casting, brass (GLO, market for casting, brass)		0,000424	kg
Leitungen + Kabelabfälle	Recycling pass 0,66kg (C14) +0,045kg (A02)	cable, unspecified (GLO, market for cable, unspecified)	Elektroschrott	0,000097	kg
Silikon, Gummi, Elastomere	Recycling pass (C16)	silicone product (RER, market for silicone product)	Nicht- recyclebarer Abfall	0,000011	kg
Kunststoffe (ABS)	Recycling pass 5,47kg (C17-C26) +0,36kg (A02)	acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (GLO, market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer)	Kunststoffabfall	0,000803	kg
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,000803	kg
Autoklavierbare Mehrweg- Scanspitze	Mehrweg	steel, chromium steel 18/8 (GLO, market for steel, chromium steel 18/8)	Stahlschrott /	0,000011	kg
		metal working, average for chromium steel product manufacturing (GLO, market for metal working, average for chromium steel product manufacturing)		0,000011	kg
Aluminiumschrott	Für Alu-Halbzeuge + Alu-Guss	scrap aluminium (Europe without Switzerland, market for scrap aluminium)		0,000026	kg
Stahlschrott	Für Stahl, Edelstahl, Zink-Guss-Legierung	scrap steel (Europe without Switzerland, market for scrap steel)		0,002327	kg
Elektroschrott	Für Elektroschrott + Kabelabfälle	waste, electrical and electronic cables (GLO, market for waste, electrical and electronic cables)		0,002645	kg
Kunststoffabfall	Für alle Kunststoffe	waste plastic, mixture (DE, market for waste plastic, mixture)		0,000803	kg
Nicht- recyclebarer Abfall	Für den unbetrachteten Rest	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,000052	kg

Anhang

Tab. 12.30: Sachbilanz digital WI, Abformung durchführen.

Abformung durchführen					
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit
Strom	Behandlungseinheit	market for electricity, low voltage (DE)		0,035117	kWh
Strom	<i>Primescan AC</i>	market for electricity, low voltage (DE)		0,035533	kWh
Paar Handschuhe (ZA/ZÄ + Asst.)	2x <i>Vasco Nitril soft white</i> , 200 pcs, Durchschnittsgröße aus XS/S/M/L/XL	acrylonitrile (GLO, market for acrylonitrile)	Restmüll (Verbrennung)	0,017200	kg
		blow moulding (GLO, market for blow moulding)		0,017200	kg
	Kartonverpackung	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,001244	kg
<i>OptraGate</i>	Lippenstütze, Größe: Regulär, 80 Stk. Durchschnittsgröße aus R und S	styrene (GLO, market for styrene)	Restmüll (Verbrennung)	0,003156	kg
		blow moulding (GLO, market for blow moulding)		0,003156	kg
	Pappkarton	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,002229	kg
	Kunststoffbeutel	packaging film, low density polyethylene (GLO, market for packaging film, low density polyethylene)	Restmüll (Verbrennung)	0,001319	kg
		thermoforming of plastic sheets (GLO, market for)	Restmüll (Verbrennung)	0,001319	kg
<i>DryTips</i>	Zur Feuchtigkeitskontrolle, Größe: Klein, 50 Stück Durchschnittsgröße aus L und S	textile, woven cotton (GLO, market for textile, woven cotton)	Restmüll (Verbrennung) (inceneration)	0,000670	kg
		polyethylene, low density, granulate (GLO, market for polyethylene, low density, granulate)	Restmüll (Verbrennung)	0,000670	kg
		extrusion, plastic film (GLO, market for extrusion, plastic film)		0,000670	kg
	Pappkarton	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,000248	kg
	Hartplastikschale	polyethylene, high density, granulate (GLO, market for polyethylene, high density,	Restmüll (Verbrennung)	0,000385	kg

Anhang

		granulate, high density, granulate)			
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,000385	kg
Holzspatel	Buchenholz, Größe: 2520mm ² x 3mm, keine Verpackung	sawnwood, hardwood, raw, dried (u=20%) (RoW, market for sawnwood)	Restmüll (Verbrennung)	0,000017	m ³
Restmüll (Verbrennung)	nach Abfalltyp	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,024735	kg
Altpapier	nach Abfalltyp	waste paperboard (Europe without Switzerland, market group for waste paperboard)		0,003721	kg

Tab. 12.31: Sachbilanz digital WI, Arbeitsplatz reinigen.

Arbeitsplatz reinigen (Scanner & Einheit)					
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit
Getränktes Tuch	<i>mikrozid universal wipes premium</i> , 80pcs	isopropanol (RER, market for isopropanol)	Gefährliche Chemikalien	0,008843	kg
		tap water (Europe without Switzerland, market for tap water)	Gefährliche Chemikalien	0,026250	l
		tissue paper (GLO, market for tissue paper)	Gefährliche Chemikalien	0,006000	kg
	Kunststoffbeutel	packaging film, low density polyethylene (GLO, market for packaging film, low density polyethylene)	Restmüll (Verbrennung)	0,000563	kg
		thermoforming of plastic sheets (GLO, market for)		0,000563	kg
	Hartkunststoffkappe	polyethylene, high density, granulate (GLO, market for polyethylene, high density, granulate, high density, granulate)	Restmüll (Verbrennung)	0,000450	kg
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,000450	kg
Paar Handschuhe (Asst.)	2x <i>Vasco Nitril soft white</i> , 200 pcs, Durchschnittsgröße aus XS/S/M/L/XL	acrylonitrile (GLO, market for acrylonitrile)	Restmüll (Verbrennung)	0,008600	kg
		blow moulding (GLO, market for blow moulding)		0,008600	kg
	Kartonverpackung	carton board box production, with offset printing (GLO, market for carton board box production, with offset printing)	Altpapier	0,000622	kg

Anhang

Gefährliche Chemikalien	AS 180106: nach Abfalltyp	hazardous waste, for incineration (Europe without Switzerland, market for)		0,041093	kg
Restmüll (Verbrennung)	nach Abfalltyp	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,009613	kg
Altpapier	nach Abfalltyp	waste paperboard (Europe without Switzerland, market group for waste paperboard)		0,000622	kg

Tab. 12.32: Sachbilanz digital WI, Anteilige Herstellung Primescan AC.

Anteilige Herstellung Primescan AC					
Input /Output	Beschreibung	Datensatz (Alle Datensätze sind unter der jeweiligen Bezeichnung in Ecoinvent zu finden)	Abfalltyp	charged qty	unit
Batterien + Akkumulatoren	Recycling pass (A04)	battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic (GLO, market for battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic)	Elektroschrott	0,000303	kg
Leiterplatten (Computereinheit)	Recycling pass 10,52kg (A06) +0,135kg (A02) +0,45kg (C139)	Computereinheit (Studiendurchschnittswert)	Elektroschrott	0,001529	kg
LCD-Display + Folientastatur	Recycling pass (A07) 21" Monitor	Computermonitor 21Zoll (Studiendurchschnittswert*0,9)	Elektroschrott	0,000716	kg
Glas	Recycling pass (B01)	flat glass, coated (RoW, market for flat glass, coated)	Nicht-recyclebarer Abfall	0,000041	kg
Aluminium-Halbzeuge	Recycling pass (C02)	aluminium, cast alloy (GLO, market for aluminium, cast alloy)	Aluminiumschrott	0,000003	kg
		metal working, average for aluminium product manufacturing (GLO, market for metal working, average for aluminium product manufacturing)		0,000003	kg
Alu-Guss-Legierungen	Recycling pass (C03)	aluminium, cast alloy (GLO, market for aluminium, cast alloy)	Aluminiumschrott	0,000023	kg
		casting, aluminium, lost-wax (GLO, market for casting, aluminium, lost-wax)		0,000023	kg
Edelstähle	Recycling pass 0,25kg (C04)	steel, chromium steel 18/8 (GLO, market for steel, chromium steel 18/8)	Stahlschrott / Steel scrap	0,000190	kg

Anhang

	+1,04kg (C11) +0,09kg (A02)	metal working, average for chromium steel product manufacturing (GLO, market for metal working, average for chromium steel product manufacturing)		0,000190	kg
Eisenmetalle (Stahl, Blech)	Recycling pass 12,09kg (C05) +0,27kg (A02)	steel, low-alloyed (GLO, market for steel, low-alloyed)	Stahlschrott	0,001702	kg
		sheet rolling, steel (GLO, market for sheet rolling, steel)		0,001702	kg
Zink-Guss-Legierungen	Recycling pass (C07)	zinc (GLO, market for zinc)	Stahlschrott	0,000424	kg
		casting, brass (GLO, market for casting, brass)		0,000424	kg
Leitungen + Kabelabfälle	Recycling pass 0,66kg (C14) +0,045kg (A02)	cable, unspecified (GLO, market for cable, unspecified)	Elektroschrott	0,000097	kg
Silikon, Gummi, Elastomere	Recycling pass (C16)	silicone product (RER, market for silicone product)	Nicht-recyclebarer Abfall	0,000011	kg
Kunststoffe (ABS)	Recycling pass 5,47kg (C17-C26) +0,36kg (A02)	acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (GLO, market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer)	Kunststoffabfall	0,000803	kg
		injection moulding (GLO, market for injection moulding)		0,000803	kg
wischdesinfizierbare Mehrweg-Scanspitze	Mehrweg	steel, chromium steel 18/8 (GLO, market for steel, chromium steel 18/8)	Stahlschrott	0,000011	kg
		metal working, average for chromium steel product manufacturing (GLO, market for metal working, average for chromium steel product manufacturing)		0,000011	kg
Aluminiumschrott	Für Alu-Halbzeuge + Alu-Guss	scrap aluminium (Europe without Switzerland, market for scrap aluminium)		0,000026	kg
Stahlschrott	Für Stahl, Edelstahl, Zink-Guss-Legierung	scrap steel (Europe without Switzerland, market for scrap steel)		0,002327	kg
Elektroschrott	Für Elektroschrott + Kabelabfälle	waste, electrical and electronic cables (GLO, market for waste, electrical and electronic cables)		0,002645	kg
Kunststoffabfall	Für alle Kunststoffe	waste plastic, mixture (DE, market for waste plastic, mixture)		0,000803	kg
Nicht-recyclebarer Abfall	Für den unbetrachteten Rest	municipal solid waste (DE, market for municipal solid waste, incineration)		0,000052	kg

Tab. 12.33: Werte Monte-Carlo-Simulation.

		Analog (kgCO ₂ eq)	Digital EI Gesamt (kgCO ₂ eq)	Digital AU Gesamt (kgCO ₂ eq)	Digital WI Gesamt (kgCO ₂ eq)
N	Gültig	20000	20000	20000	20000
	Fehlend	0	0	0	0
Minimum		1,15	0,26	0,21	0,19
Maximum		5,28	4,57	5,15	3,67
Perzentile	25	1,8892	0,4789	0,4149	0,3372
	50	2,1504	0,5577	0,5104	0,4064
	75	2,4559	0,6765	0,6451	0,5244

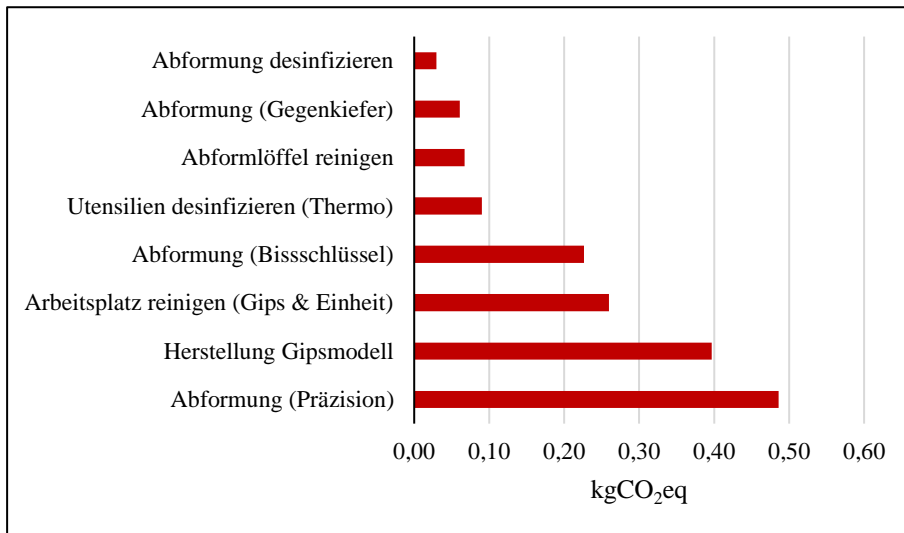


Abb. 12.1: Prozessschritte Analog.

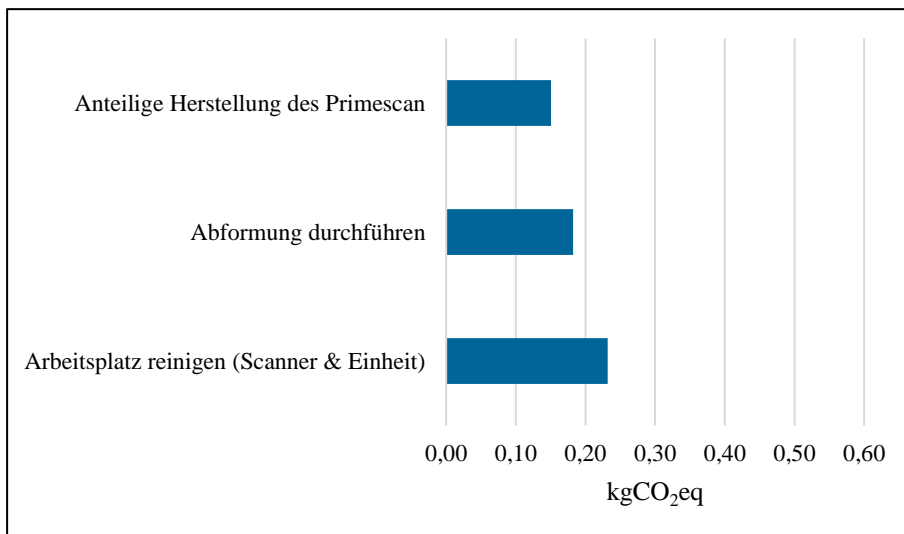


Abb. 12.2: Prozessschritte digital, EI.

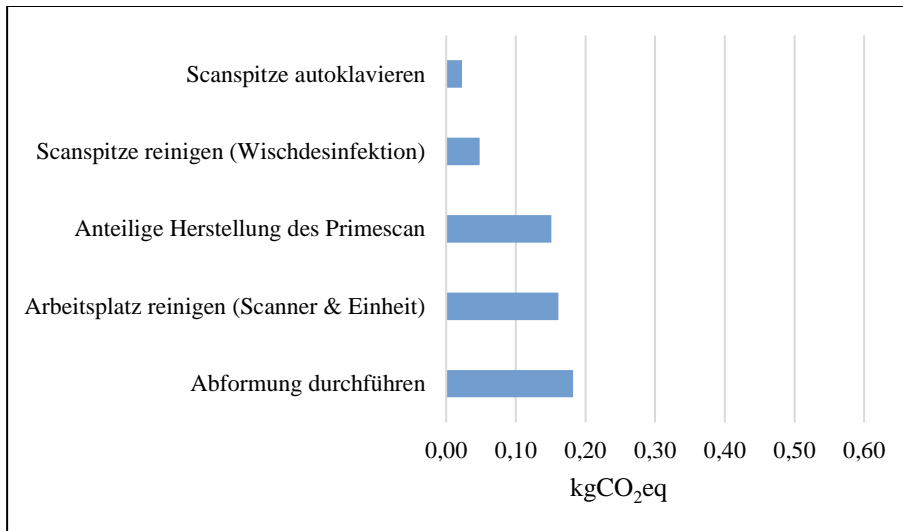


Abb. 12.3: Prozessschritte digital, AU.

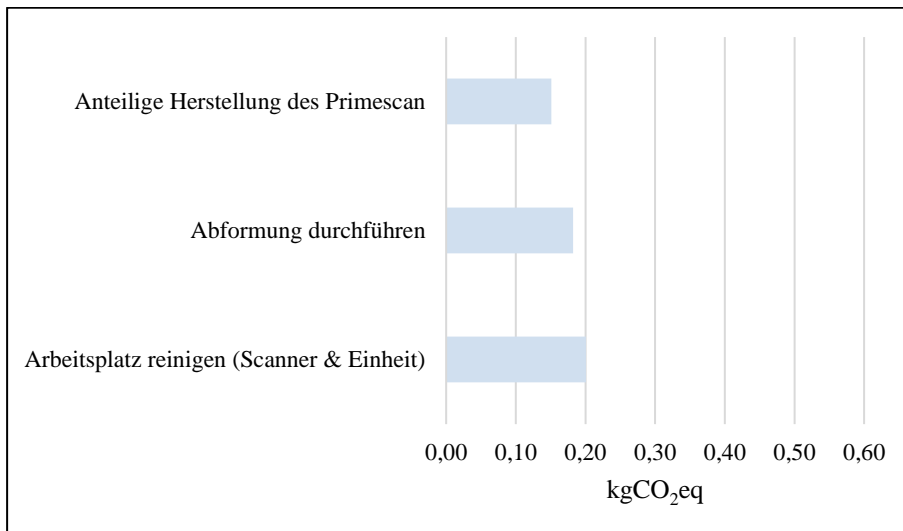


Abb. 12.4: Prozessschritte digital, WI.

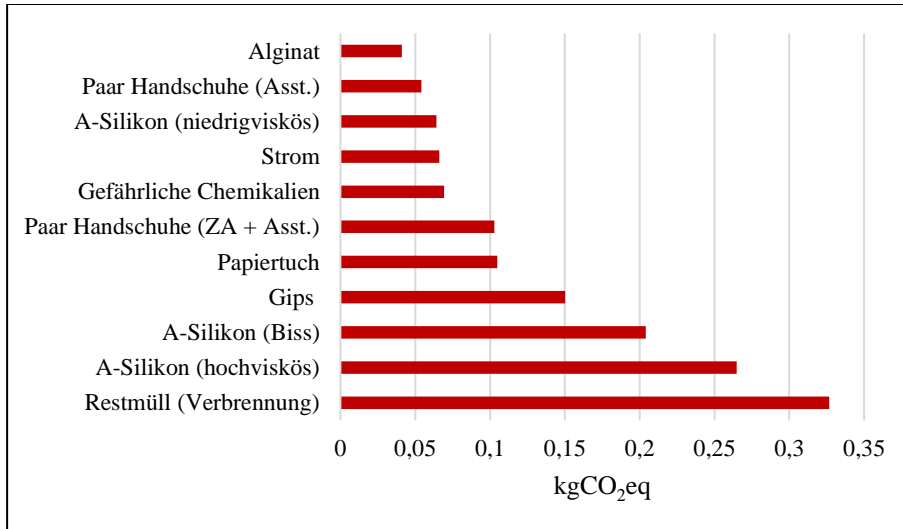


Abb. 12.5: Materialanteile analog.

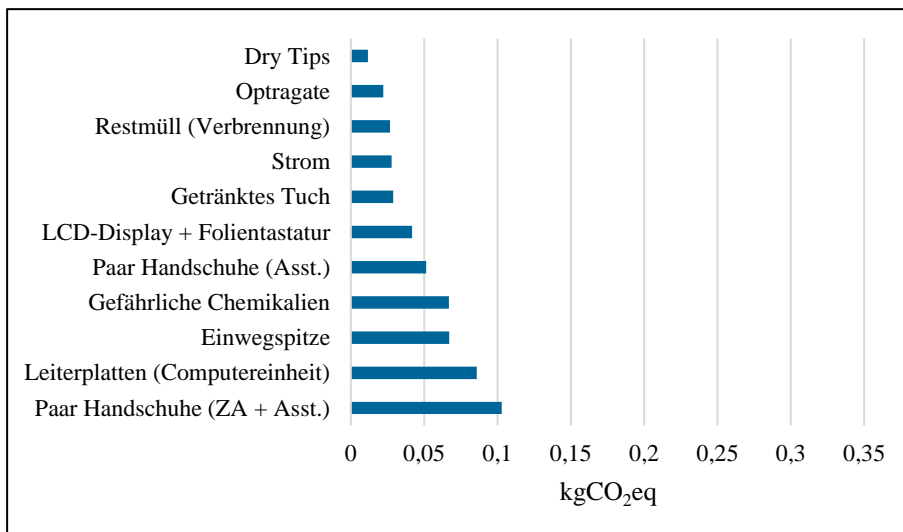


Abb. 12.6: Materialanteile digital, EI.

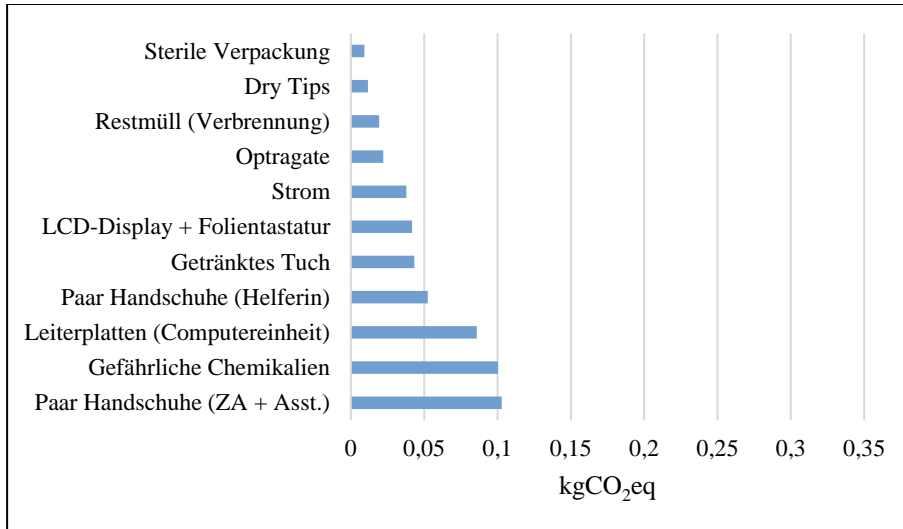


Abb. 12.7: Materialanteile digital, AU.

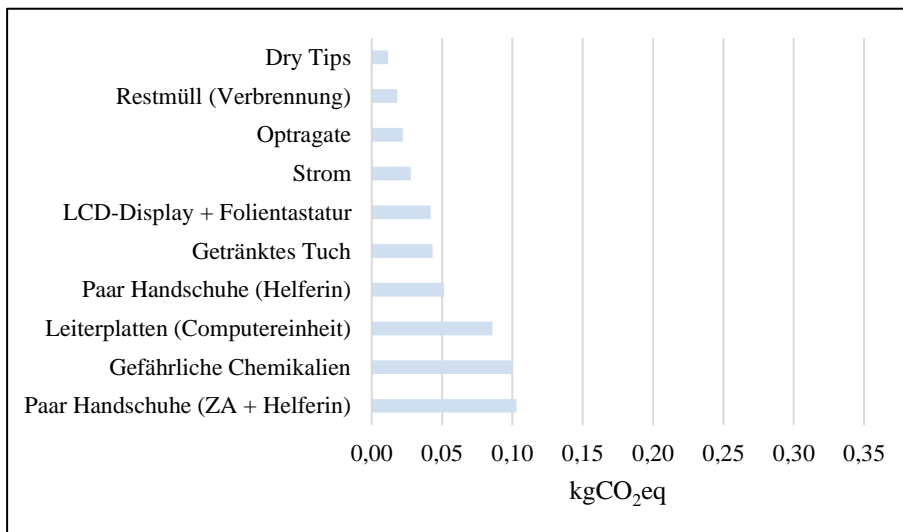


Abb. 12.8: Materialanteile digital, WI.

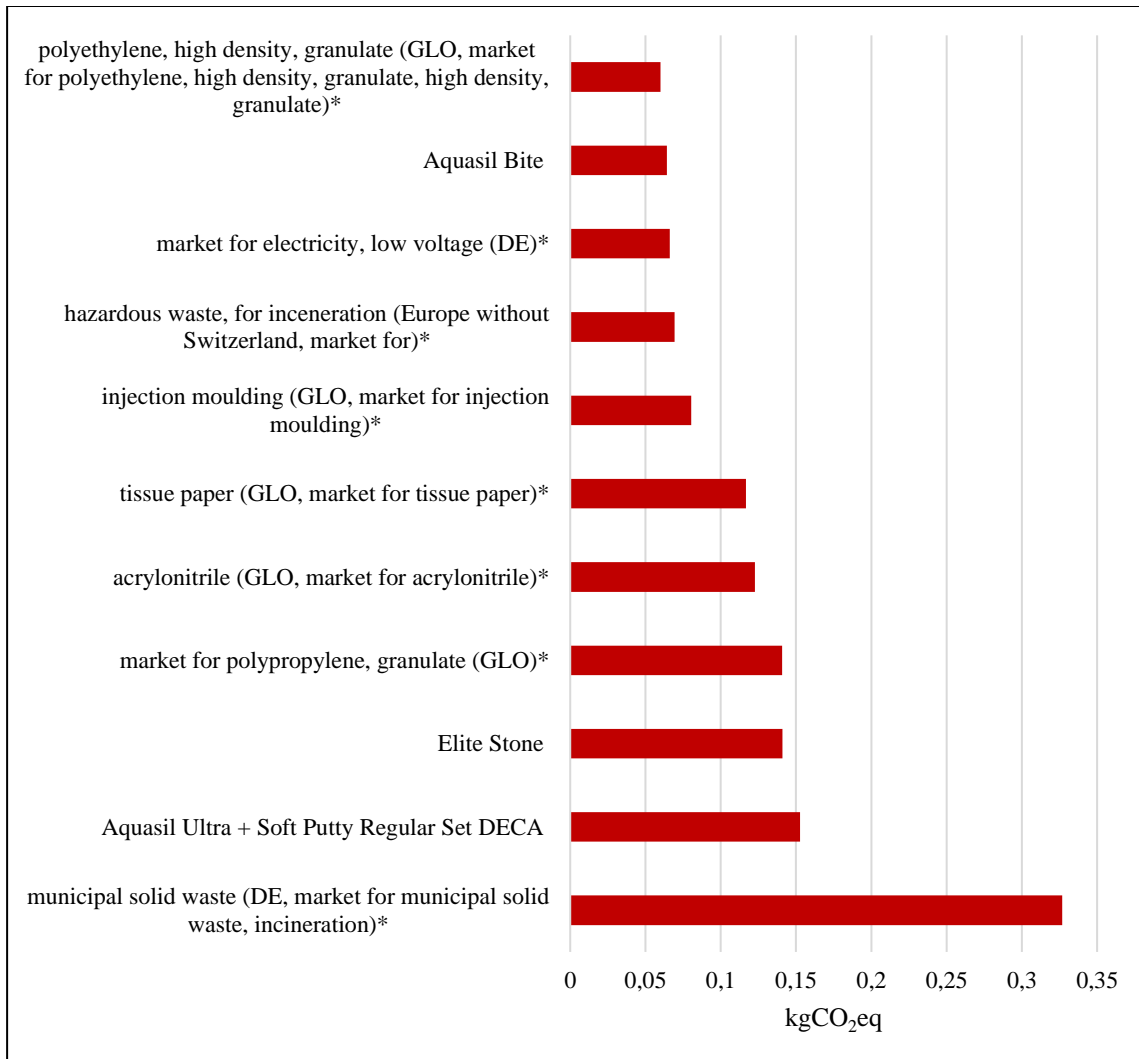


Abb. 12.9: Rohstoffanteile analog, (*Datensatz Ecoinvent).

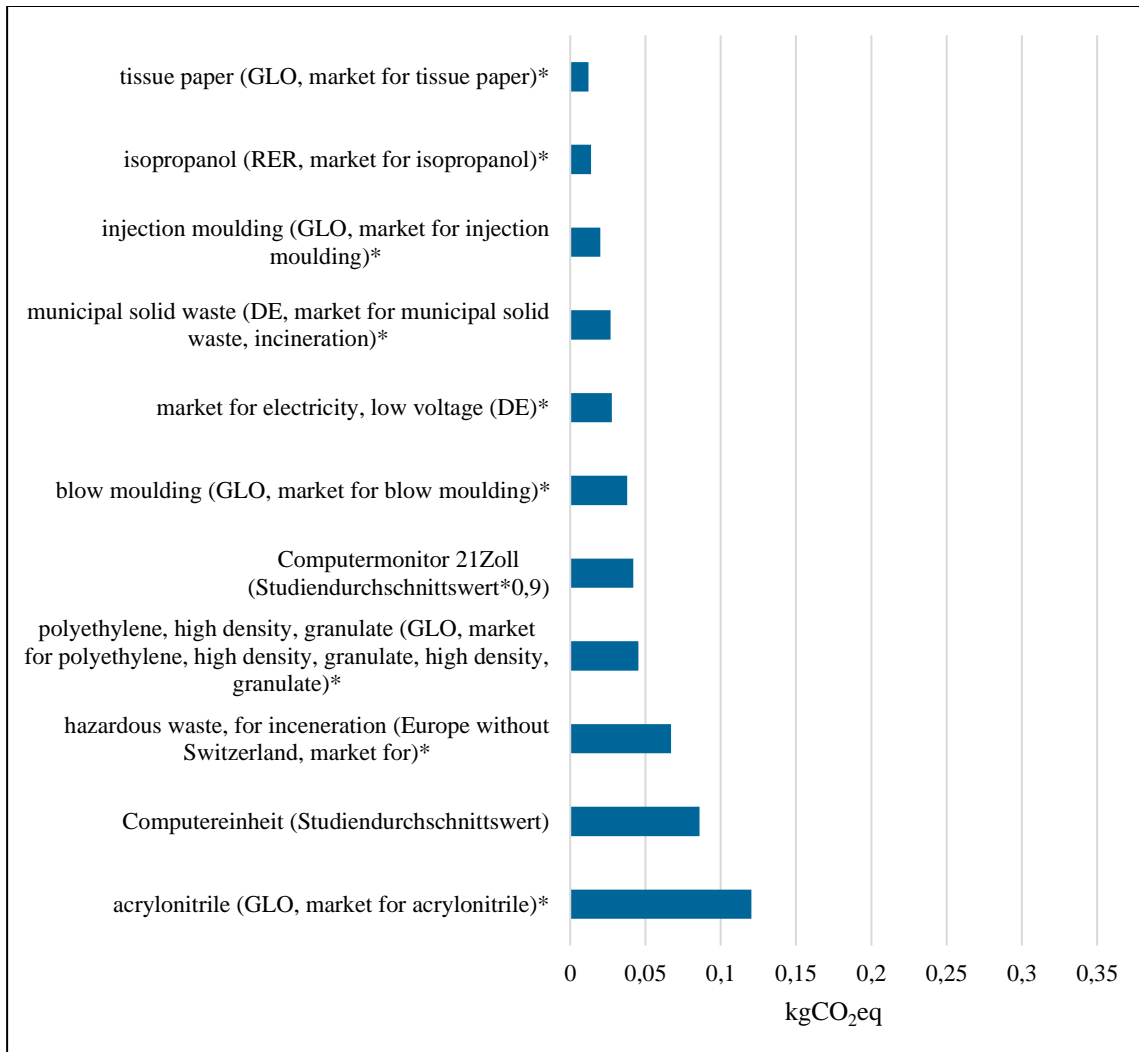


Abb. 12.10: Rohstoffanteile digital, EI, (*Datensatz Ecoinvent).

Anhang

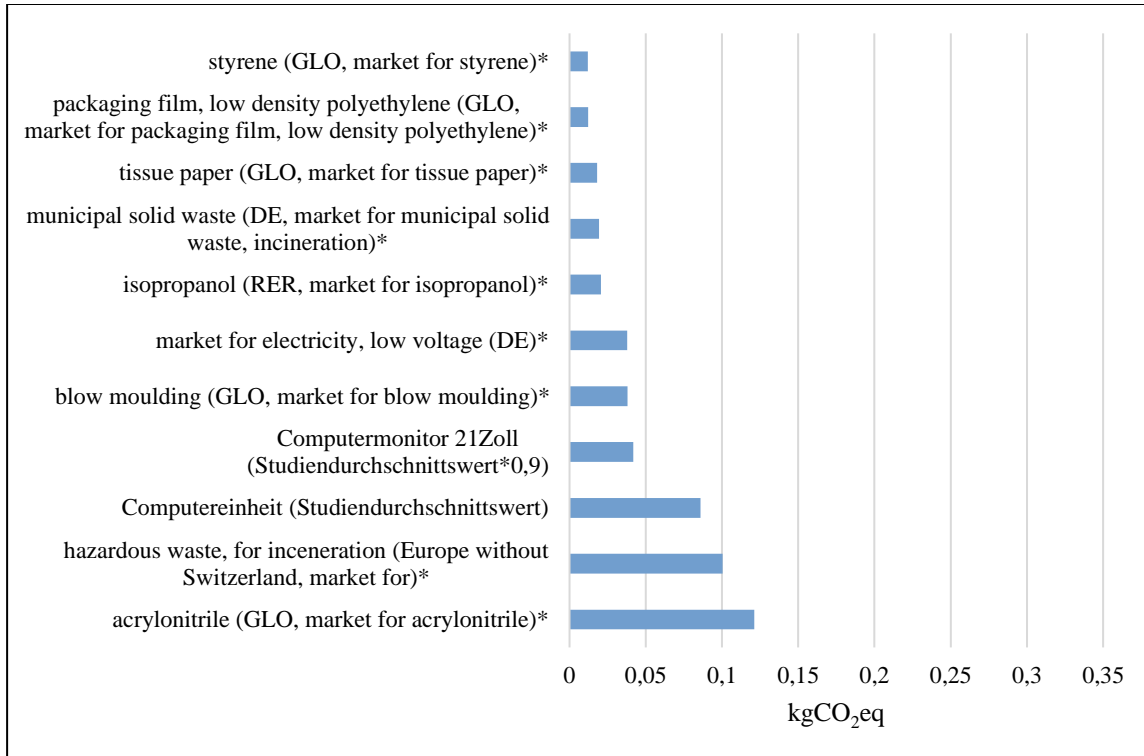


Abb. 12.11: Rohstoffanteile digital, AU, (*Datensatz Ecoinvent).

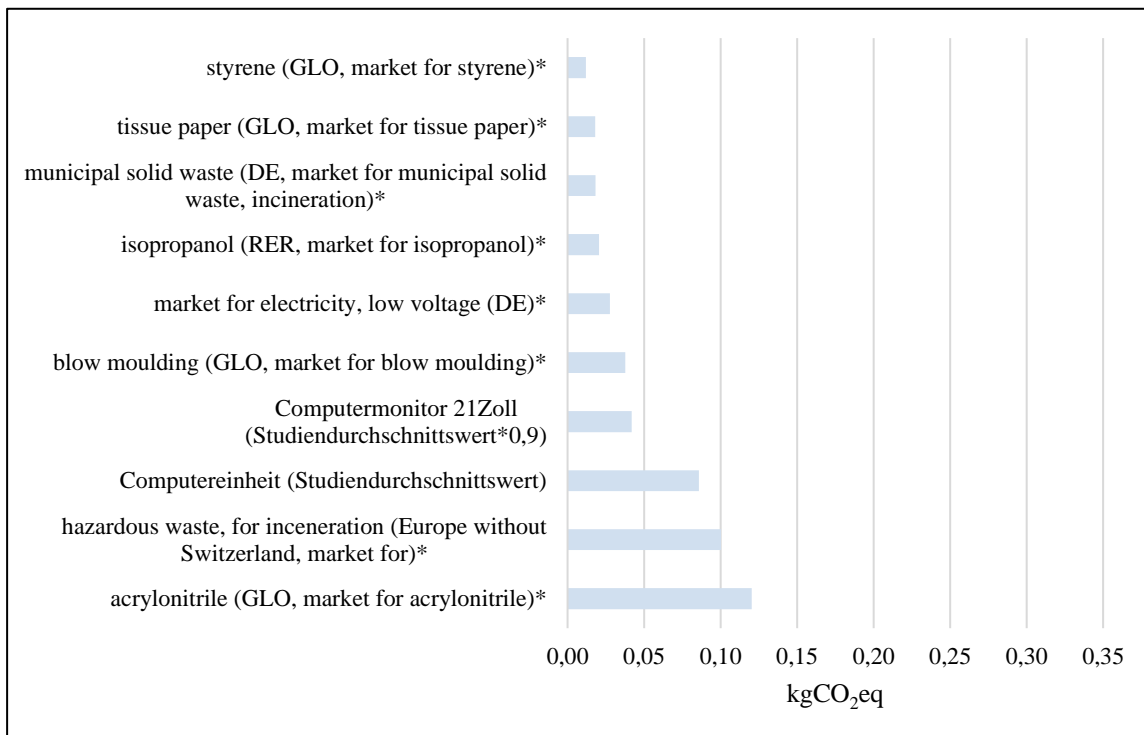


Abb. 12.12: Rohstoffanteile digital, WI, (*Datensatz Ecoinvent).

Tab. 12.34: Anteil der Herstellung bei durchschnittlicher Abformdauer [gCO₂eq],
Nutzungsdauer acht Jahre

Abformungen pro Woche (5 d)															Primescan AC Einsatzzeit pro Tag [h]
1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	25		
Abformungen pro Tag (8 h)															
0,2	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	4,8	5,0		
591,2	591,2	591,2	457,2	342,9	274,3	228,6	195,9	171,4	152,4	137,2	124,7	114,3	109,7	0,17	
197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	195,9	171,4	152,4	137,2	124,7	114,3	109,7	0,50	
98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	1,00	
65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	1,50	
49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	2,00	
39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	2,50	
32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	3,00	
28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	3,50	
24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	4,00	
21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	4,50	
19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	5,00	
17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	5,50	
16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	6,00	
15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	6,50	
14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	7,00	
13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	13,1	7,50	
12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	8,00	

Tab. 12.35: Anteil der Herstellung bei durchschnittlicher Abformdauer [g CO₂-eq], Nutzungsdauer sechs Jahre

Abformungen pro Woche (5d)															Primescan AC Einsatzzeit pro Tag [h]
1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	25		
Abformungen pro Tag (8h)															
0,2	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	4,8	5,0		
788,2	788,2	788,2	609,6	457,2	365,8	304,8	261,3	228,6	203,2	182,9	166,3	152,4	146,3	0,17	
262,7	262,7	262,7	262,7	262,7	262,7	262,7	261,3	228,6	203,2	182,9	166,3	152,4	146,3	0,50	
131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	1,00	
87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	1,50	
65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	2,00	
52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	2,50	
43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	3,00	
37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	3,50	
32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	4,00	
29,2	29,2	29,2	29,2	29,2	29,2	29,2	29,2	29,2	29,2	29,2	29,2	29,2	29,2	4,50	
26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	5,00	
23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	5,50	
21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	6,00	
20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	20,2	6,50	
18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	7,00	
17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	7,50	
16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	16,4	8,00	

Tab. 12.36: Anteil der Herstellung bei durchschnittlicher Abformdauer [g CO₂-eq], Nutzungsdauer vier Jahre

Abformungen pro Woche (5d)														
1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	25	
Abformungen pro Tag (8h)														
0,2	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	4,8	5,0	
1182,3	1182,3	1182,3	914,4	685,8	548,6	457,2	391,9	342,9	304,8	274,3	249,4	228,6	219,5	0,17
394,1	394,1	394,1	394,1	394,1	394,1	394,1	391,9	342,9	304,8	274,3	249,4	228,6	219,5	0,50
197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	1,00
131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	1,50
98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	2,00
78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	2,50
65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	3,00
56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	3,50
49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	4,00
43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	43,8	4,50
39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	5,00
35,8	35,8	35,8	35,8	35,8	35,8	35,8	35,8	35,8	35,8	35,8	35,8	35,8	35,8	5,50
32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	32,8	6,00
30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	6,50
28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	28,2	7,00
26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3	7,50
24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	8,00

Primescan AC Einsatzzeit pro Tag [h]

Tab. 12.37: Anteil der Herstellung bei durchschnittlicher Abformdauer [g CO₂-eq], Nutzungsdauer zwei Jahre

Abformungen pro Woche (5d)														
1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	25	
Abformungen pro Tag (8h)														
0,2	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	4,8	5,0	
2364,6	2364,6	2364,6	1828,8	1371,6	1097,3	914,4	783,8	685,8	609,6	548,6	498,8	457,2	438,9	0,17
E788,2	788,2	788,2	788,2	788,2	788,2	788,2	783,8	685,8	609,6	548,6	498,8	457,2	438,9	0,50
394,1	394,1	394,1	394,1	394,1	394,1	394,1	394,1	394,1	394,1	394,1	394,1	394,1	394,1	1,00
262,7	262,7	262,7	262,7	262,7	262,7	262,7	262,7	262,7	262,7	262,7	262,7	262,7	262,7	1,50
197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	197,1	2,00
157,6	157,6	157,6	157,6	157,6	157,6	157,6	157,6	157,6	157,6	157,6	157,6	157,6	157,6	2,50
131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	3,00
112,6	112,6	112,6	112,6	112,6	112,6	112,6	112,6	112,6	112,6	112,6	112,6	112,6	112,6	3,50
98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	4,00
87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	87,6	4,50
78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	78,8	5,00
71,7	71,7	71,7	71,7	71,7	71,7	71,7	71,7	71,7	71,7	71,7	71,7	71,7	71,7	5,50
65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	65,7	6,00
60,6	60,6	60,6	60,6	60,6	60,6	60,6	60,6	60,6	60,6	60,6	60,6	60,6	60,6	6,50
56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	56,3	7,00
52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	52,5	7,50
49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	49,3	8,00

Primescan AC Einsatzzeit pro Tag [h]

13 Erklärung

Ehrenwörtliche Erklärung

„Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nichtveröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten sowie ethische, datenschutzrechtliche und tierschutzrechtliche Grundsätze befolgt. Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, und dass die vorgelegte Arbeit weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt wurde. Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen übernommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkt Bezug genommen wird, wurde als solches kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen genannt, die direkt und indirekt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren. Mit der Überprüfung meiner Arbeit durch eine Plagiatserkennungssoftware bzw. ein internetbasiertes Softwareprogramm erkläre ich mich einverstanden.“

Ort/Datum

Unterschrift

14 Danksagung

Ein großer Dank gilt meiner Doktormutter Prof. Dr. Maximiliane Schlenz-Helmke für die Überlassung des Themas sowie die große Unterstützung und Förderung.

Ein großer Dank gilt außerdem Andre Daum, B.Sc. für die technische Umsetzung des Projekts und das große Engagement im Rahmen der Kooperation mit der Technischen Hochschule Mittelhessen.

Ebenfalls möchte ich Prof. Dr. Harald Weigand, Prof. Dipl.-Ing. Holger Rohn und Fabian Völker, M.Sc. für die gute Zusammenarbeit im Rahmen der Kooperation mit der Technischen Hochschule Mittelhessen danken.

Für die statistische Beratung bedanke ich mich bei Dr. Johannes Herrmann.

Außerdem möchte ich meinen Kolleginnen und Kollegen aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik danken, die mir bei Fragen stets weitergeholfen haben und eine tolle Unterstützung waren.

Ein großer Dank gilt meiner Familie und meinem Mann, die mich stets unterstützt und mir den Freiraum für dieses Projekt gegeben haben.

15 Lebenslauf

Der Lebenslauf wurde aus Datenschutzgründen entfernt.