

Masterarbeit

Jan Stieglitz

Constraint gestützte Workbench zur Einführung von
Personal-Fabrication im digitalen Unterricht

Jan Stieglitz

Constraint gestützte Workbench zur Einführung von Personal-Fabrication im digitalen Unterricht

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung
im Studiengang *Master of Science Informatik*
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Birgit Wendholt
Zweitgutachter: Prof. Dr. Julia Padberg

Eingereicht am: 02.02.2022

Jan Stieglitz

Thema der Arbeit

Constraint gestützte Workbench zur Einführung von Personal-Fabrication im digitalen Unterricht

Stichworte

Werkzeugketten, Personal Fabrication, digitale Werkbank, digitales Lernen

Kurzzusammenfassung

Diese Masterarbeit untersucht den im Rahmen eines Studienprojekts entwickelten Prototyp einer digitalen Lernumgebung zur Planung und Umsetzung von Projekten, die Fertigungsverfahren aus dem Umfeld von Personal Fabrication anwenden. Die Untersuchung befasst sich mit der Unterstützung des Anwenders bei der Planung und Umsetzung des Projekts und den möglichen Einsatz der Software als digitale Lernumgebung. Dabei wird gezeigt welche Zentralen Konzepte, für die Modellierung und für eine spätere Erweiterung des Modells durch eine Lehrkraft, umgesetzt wurden

Jan Stieglitz

Title of Thesis

Constraint-based workbench for the introduction of personal fabrication in digital teaching

Keywords

Toolchain, Personal Fabrication, digital Workbench

Abstract

This master's thesis examines the prototype of a digital learning environment developed as part of a study project for the planning and implementation of projects that use manufacturing processes from the field of personal fabrication. The investigation deals with the support of the user in the planning and implementation of the project and the

possible use of the software as a digital learning environment. It is shown which central concepts were implemented for the modeling and for a later extension of the model by a teacher

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	viii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Vorstellung des Themas	2
1.3 Zielsetzung	2
1.3.1 Arbeitshypothese	2
1.4 Methodik	3
1.5 Struktur der Arbeit	3
2 Aktuelle Forschung	5
2.1 Personal Fabrication	5
2.1.1 Technologische Treiber	6
2.1.2 Forschung	9
2.2 Didaktik digitaler Lernformen	18
2.3 Workflowmodellierung	20
2.4 Zusammenfassung	22
3 Anforderungsanalyse	24
3.1 Nutzerrollen	24
3.1.1 Anwender	25
3.1.2 Einsteiger	25
3.1.3 Fortgeschrittene und Experten	26
3.1.4 Lehrkraft	26
3.2 Struktur des Projektwerkzeugkastens	26
3.2.1 Elemente	27
3.2.2 Projektphasen	29
3.2.3 Wissensbasis	30
3.2.4 Hilfesystem	31

3.3	Ablauf	32
3.3.1	Projektplan eines Tutorial-Projekts	32
3.3.2	Nutzung durch erfahrene Nutzer	36
3.4	Nutzerinteraktion	37
3.5	Funktionale Anforderung	37
3.6	Nicht Funktionale Anforderungen	38
3.7	Zusammenfassung	38
4	Konzeption und Umsetzung	40
4.1	Projekt und Tutorial Projekt	40
4.1.1	Bauteil	40
4.1.2	Projekt	42
4.1.3	Umsetzungsliste	43
4.2	Nutzerinteraktion	44
4.3	Wissensbasis	44
4.3.1	Produzierbarkeit	45
4.3.2	Modellierbarkeit	46
4.3.3	Transformation	46
4.3.4	Erweiterbarkeit	47
4.4	Hilfesystem	48
4.5	Systemarchitektur	48
4.6	Zusammenfassung	49
5	Zusammenfassung	51
5.1	Fazit	51
5.2	Ausblick	52
5.3	Danksagung	53
	Literaturverzeichnis	54
A	Anhang	59
A.1	Softwareanalyse	59
A.1.1	Grafik (2D CAD)	59
A.1.2	3D CAD	59
A.1.3	CAM Lasercut	63
A.1.4	CAM 3D-Druck	64
A.1.5	GCODE-Runner	65

B Acronyme	66
Selbstständigkeitserklärung	68

Abbildungsverzeichnis

3.1	Projektplan mit Bauteilen	32
3.2	Dialoge der Projektplanung	33
3.3	Vollständiger Projektplan für die Smarte Lampe	34
3.4	Einfache Werkzeugkette für den 3D-Druck mit Hilfsmodellen	35
3.5	Auszug der Aufgabenliste in der Projektumsetzung	36
4.1	Klassendiagramme zur Modellierung des Bauteils	41
4.2	Klassendiagramm zur Modellierung des Projekts	42
4.3	Ein Umsetzungsschritt enthält Texte und Referenzen zu den Abhängigkeiten sowie dem Ursprung im Projektplan	43
4.4	Klassendiagramm der Wissensbasis mit den drei Regelsystemen	45
4.5	Baummodell eines Projektplans	47
4.6	Konzept für die Benutzeroberfläche zur Administration der Wissensbasis	48
4.7	Konzept für den Kontextgenerator des Hilfesystems	49

1 Einleitung

1.1 Motivation

Personal Fabrication und digital gestützte Lehre sind im Rahmen der Diskussion um die Digitalisierung aktuelle Themen. Aus diesem Grund beschäftigt sich diese Arbeit mit dem Einsatz von digitalen Werkzeugen und Personal Fabrication für Neueinsteiger. Neben der Forschung an Materialien und Verfahren ist im Themengebiet Personal-Fabrication auch die Sammlung und Verbreitung von Fachwissen für Laien ein zentrales Thema. Dies deckt sich in Teilen mit den Forderungen nach Digitalisierung an den Schulen in Deutschland. Dabei wird neben einem Ausbau des Informatik-Unterrichts und der Forderung nach Vermittlung von Kompetenzen im Bereich der digitalen Kommunikation auch digitale Produktionsverfahren als Thema in die Diskussion eingebracht. Dass die Einführung von neuen Technologien in Schulen nicht auch gleichzeitig deren Nutzung bedeutet, kann am Beispiel von Beamern und Smartboards beobachtet werden. Oft werden sie nicht oder als Ersatz für den Tageslichtprojektor genutzt. Damit neue Technologien in der Schule ihr Potential entfalten können, muss der Einstieg in deren Nutzung entsprechend gestaltet sein. Um allen Schülern den Zugang zu bieten, muss auch den nicht technisch Interessierten ein Einstieg ermöglicht werden.

Für viele Zwecke im Bereich von Personal Fabrication lassen sich im industriellen Kontext Workbenches mit diversen Funktionalitäten und Features finden. Diese Werkzeuge lassen sich meist universell einsetzen und durch Plugins entsprechend erweitern. Im industriellen Kontext bieten diese komplexen Systeme den Vorteil, dass meist nur ein Werkzeug alles erledigen kann. Gleichzeitig wird die Komplexität dieser Software und das Verständnis für die Arbeitsweise ein Problem für Einsteiger. Dazu kommt, dass das Ziel, nämlich der Einstieg in neue Fertigungstechnologien von diesen Werkzeugen nicht unterstützt wird. Das buchstäbliche Begreifen und Verbinden des digitalen Modells mit dem gedruckten Ergebnis soll nicht durch die Erfahrung mit einem 'unübersichtlichen', komplexen Werkzeug überschattet werden.

1.2 Vorstellung des Themas

Im Bereich Personal Fabrication wird viel Forschung und Entwicklung betrieben, dabei wird ein breites Spektrum an Themen bearbeitet. Zudem ist das Thema nicht zuletzt durch die Verfügbarkeit von günstigen Geräten wie 3D-Drucker und Lasercutter auch außerhalb der Wissenschaft weit verbreitet. Ein Teil der Forschung betrachtet explizit das Heranführen von Einsteigern in einzelne Themengebiete. Diese Ansätze werden jedoch auf ein konkretes Szenario fokussiert und daran einzelne Aspekte und Erkenntnisse diskutiert. Da das Forschungsgebiet gerne im Rahmen einer industriellen Revolution benannt wird, ist ein leichter Zugang zum Verständnis des Themas wünschenswert. Für den Einstieg in eine Technologie wie den 3D-Druck ist zunächst eine Begreifbare (begrenzte) 3D-Modellierung und das daraus entstehende (Druck)Ergebnis wichtig. [7] 'Ziel: die Zykluszeit zu verringern'. Das buchstäbliche Begreifen und Verbinden des digitalen Modells mit dem gedruckten Ergebnis soll nicht durch die Erfahrung mit einem 'unübersichtlichen', komplexen Werkzeug überschattet werden.

1.3 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung des Projektwerkzeugkasten als Unterstützende Softwarelösung zur Planung von Projekten welche Verfahren aus dem Bereich des Personal Fabrication verwenden. Dazu werden Thesen im folgenden Abschnitt 1.3.1 benannt, die als Orientierung in dieser Untersuchung dienen.

1.3.1 Arbeitshypothese

Als Grundlage für die Analyse des Projektwerkzeugkastens werden die folgenden Thesen festgelegt:

Einsteigerproblem Für Einsteiger ergibt sich beim Erlernen verschiedener neuer Themen das Problem, dass die Einsteigerwerkzeuge nur sehr eingeschränkte oder nur spezielle Teilgebiete in der Produktion ermöglichen, weil die Werkzeuge, besonders aus der Forschung, nur sehr eingeschränkt arbeiten. Komplexe Tools sind für Einsteiger der Art unübersichtlich, sodass es für Ungeübte schwer ist mit diesen produktiv umzugehen.

Lernzuwachs Der Projektablauf wird dabei so gestützt, dass ein Einsteiger optimal unterstützt wird, ein fortgeschrittener Anwender jedoch nicht eingeschränkt wird. So erlaubt und unterstützt der Projektwerkzeugkasten den Nutzer dabei Erfahrungen zu machen und daran zu wachsen. Dabei kümmert sich der Werkzeugkasten aber nur um die Anleitung und plausible Abfolge der Werkzeuge in einem Projekt, die Modellierung und damit verbundene Fallstricke werden dem Nutzer bewusst nicht abgenommen.

Flexibilität Das Modell ist so gestaltet, dass durch angelerntes Personal neue Werkzeuge und Verfahren hinzugefügt werden können, ohne vorherige Programmierkenntnisse vorauszusetzen. Durch die deklarative Modellierung der Werkzeuge und dem auf Constraints basierendem Regelwerk, werden dann die neuen Werkzeuge in den Projekten Verfügbar gemacht.

Werkzeugkombination Um die Lücke zwischen den einfachen eingeschränkten und den vielseitig komplexen Werkzeugen zu schließen, ist der Projektwerkzeugkasten als integrative Lösung realisiert. Dabei wird dem Nutzer in der Umsetzung durch die Verwendung mehrerer relativ einfacher Werkzeuge unterstützt. Abhängigkeiten und Übergänge zwischen den Werkzeugen werden durch das interne Modell so gewählt, dass die Verwendung auch für Einsteiger leicht möglich ist.

1.4 Methodik

Wegen der im Jahr 2020 aufgetretenen und bis heute andauernden Corona-Pandemie konnte die angedachte Evaluation nicht umgesetzt werden. Daher wird zur Überprüfung des Ziels dieser Arbeit, eine Anforderungsanalyse und anschließenden Konzeption und Umsetzung in dieser Arbeit durchgeführt.

1.5 Struktur der Arbeit

Das Kapitel 2 beschäftigt sich mit der Einordnung dieser Arbeit in den Kontext der aktuellen Forschung. Dazu stehen neben dem Kernthema *Personal Fabrication* die Themen Didaktik digitaler Lernformen und die Modellierung von Workflows im Zentrum der Recherche. Im folgenden Kapitel 3 wird sich anschließend mit der Aufstellung der

Anforderungen an den Projektwerkzeugkasten beschäftigt. Danach wird in Kapitel 4 diskutiert, wie die Konzepte und Modelle des Projektwerkzeugkastens die zuvor entwickelten Anforderungen erfüllen. Abschließend werden in Kapitel 5 die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Entwicklungen gegeben.

2 Aktuelle Forschung

Dieses Kapitel befasst sich mit der Einordnung der Arbeit in die drei Themengebieten Personal Fabrication, Didaktik digitaler Lernformate sowie Workflow-Modellierung. Die Themen werden unter Bezugnahme auf die im Kapitel 1.3.1 benannten Thesen zum Projektwerkzeugkasten in die jeweilige aktuelle Forschung eingeordnet.

Als Ziel dieser Arbeit steht die Konzeption und Entwicklung einer digitalen Werkbank, welche es Laien ermöglichen soll eigene Projekte mit Fertigungsverfahren und Techniken aus dem Bereich von Personal-Fabrication (PF) und Digital-Fabrication (DF) umzusetzen. Diese Werkbank unterstützt dabei den Anwender im Prozess der Planung und später in der Umsetzung die verschiedenen digitalen Werkzeuge anzuwenden. Dazu wird im Abschnitt 2.1 eine Landkarte über die Forschung und deren Verbindung zur Maker-Szene gezeigt. Anschließend wird in Abschnitt 2.1.2 ein Blick auf verschiedene Verfahren geworfen, die sich für die Modellierung von Projekten in der digitalen Werkbank eignen. Dies soll nicht nur Einsteigern sondern auch erfahreneren Anwendern die Möglichkeit bieten, erste Lernschritte zu begehen bzw. sich in ihren eigenen Fähigkeiten weiter zu entwickeln. Die Anforderungen, hierfür, werden in Abschnitt 2.2 dargestellt. Die flexible Modellierung von Arbeitsprozessen wird anschließend im Abschnitt 2.3 betrachtet.

2.1 Personal Fabrication

Personal Fabrication ist ein Themengebiet mit einer großen Schnittmenge aus dem Feld der Digital Fabrication. Letztere befasst sich mit den Themen rund um automatisierte Fertigung und digitale Modellierung. DF ist ebenso eine Komponente der Industrie 4.0 und findet in verschiedenen Bereichen bereits Anwendung. Zu nennen sind hier sogenannte Losgröße-1-Fabriken [22], die individuelle Produkte fertigen, Ersatzteilmontage mittels 3D-Druck [18] sowie diverse Dienstleister in den Bereichen wie Digitaldruck, Bauteil- und Elektronikfertigung [6, 5, 1].

Personal Fabrication beschäftigt sich über die Entwicklung und Weiterentwicklung von Verfahren und Anwendungen hinaus auch mit Usability, Nachhaltigkeit und gesellschaftlichen Aspekten dieser Technik. Ebenso grenzt sich PF gegenüber DF ab, indem der Fokus auf Maschinen und Verfahren gelegt wird, die sich für einen „Heimgebrauch“ eignen.

Daher wird in Abschnitt 2.1.1 zunächst der Fokus auf die Ursprünge und treibenden Schlüsseltechnologien gesetzt und die Gründe für die Verbreitung und den Einsatz der Technologien im privaten Umfeld analysiert. In der Folge wird die Bedeutung der Maker-Szene für die technologische Weiterentwicklung von Hard und Software ebenso, wie der umgekehrte Einfluss von technologischen Entwicklungen im Bereich der Personal Fabrication auf die Maker betrachtet. Hieraus ergibt sich, dass die Maker-Szene auch eine interessante Zielgruppe für den Projektwerkzeugkasten darstellt.

Im Abschnitt 2.1.2 wird die Seite der Forschung zu Personal Fabrication gezeigt. Neben dem allgemeinen Überblick über die aktuelle Forschung, werden die drei Themen UI, Verfahren und erleichtertes Einstieg gesondert betrachtet. Dabei wird einerseits die thematische Vielfalt des Forschungsgebiets gezeigt, andererseits auch, dass bisher nur in Teilgebieten einzelnen Lösungen für ein Fertigungsverfahren oder eine besonders benutzerfreundliche Anwendung jeweils im Fokus steht. Jedoch steht der gesamte Prozess von der Modellierung zur Fertigung nicht im Fokus, da dies zu weit vom Thema wegführen würde.

2.1.1 Technologische Treiber

Die rasche Verbreitung von Personal Fabrication lässt sich auf zwei Entwicklungen zurückführen: Die Hardwareentwicklung, insbesondere der 3D-Druck, welche eine direkte Fertigung von digital modellierten Bauteilen ermöglichte sowie die zeitgleich aufkommende Maker-Szene, welche sich zuvor aus den als Heimwerker bzw. DIY-Bewegung bekannten technisch interessierten Privatleuten entwickelte.

Hardware

In Personal Fabrication ist ein entscheidender Faktor die Fertigung von Bauteilen aus digitalen Modellen. Die Werkzeuge, welche dies ermöglichen, fallen in die Gruppe der Computerized Numerical Control (CNC)-Maschinen. Es handelt sich dabei um Maschinen, die durch ein Programm gesteuert einen Fertigungsprozess abwickeln. Es wird dabei

zwischen additiven und subtraktiven Verfahren unterschieden. Die für Personal Fabrication wichtigsten Werkzeuge sind 3D-Drucker, CNC-Fräse und Lasercutter. Dabei handelt es sich, bei den beiden zuletzt genannten Verfahren, um subtraktive Prozesse, also Methoden, bei denen Material abgetragen wird.

3D Drucker Beim 3D-Drucker handelt es sich, unabhängig vom verwendeten Druckprozess um ein Verfahren, welches Objekte durch schichtweises Hinzufügen eines Werkstoffs aufbaut. Ausschlaggebend für die schnelle Verbreitung von 3D-Druckern waren zwei Dinge, zum einen, die sich entwickelnde Maker-Kultur und zum anderen das Auslaufen des Patents für das sogenannte Fused-Deposition-Modeling (FDM)-Verfahren. Die technisch interessierten Bastler aus der Maker-Szene bildeten einen idealen Nährboden und besaßen eine passende Infrastruktur, wie Makerspaces und die Dokumentation ihrer Projekte im Internet. Durch die abgelaufenen Patente (US5876550A ,US4996010A) für FDM und Stereolithografie (SLA) wurde nun die Technologie vom Patentschutz befreit und traf auf die technisch interessierte Gruppe der Maker, welche die neuen Möglichkeiten nutzten und weiterentwickelten. So entstanden zunächst verschiedene Projekte zum Bau von 3D-Druckern mit einfachen Mitteln.

Das gängigste Verfahren mit einer großen Verbreitung, besonders im privaten Bereich, ist FDM. Dabei handelt es sich um eine Methode, die als Computer gesteuerte Heißklebepistole beschreiben kann. Ein Kunststofffaden wird dabei erhitzt und in dünnen Lagen zunächst auf eine Grundplatte, danach auf der wachsenden Struktur abgelegt. So entsteht schichtweise ein dreidimensionaler Körper. Bei SLA handelt es sich um einen Prozess, der durch selektives Aushärten von lichtempfindlichen, flüssigen Kunststoffen ebenfalls durch schichtweisen Auftrag Objekte entstehen lässt. Durch diese schnelle Verbreitung und Weiterentwicklung wird dem 3D-Druck im Heimgebrauch das Potential zum Umbruch der Industrie und der Art, wie wir bestimmte Produkte konsumieren zugeschrieben. [14]

Weitere Verfahren, wie zum Beispiel das Lasersintern bei dem ein pulverförmiger Werkstoff mittels Laser verschmolzen werden, sind dabei weniger im Personal Fabrication Umfeld vertreten. Jedoch werden diese Verfahren mittlerweile als Service von spezialisierten Herstellern angeboten.

CNC-Fräse und Lasercutter CNC-Fräse und Lasercutter stehen für Werkzeuge aus der Gruppe der subtraktiven Fertigungsprozesse. Dabei unterscheidet sich der Lasercutter von der CNC-Fräse in soweit, dass der Lasercutter ausschließlich für den 2D Bereich

eingesetzt wird und als Werkzeug einen Laserstrahl einsetzt. Beide Systeme beginnen mit einem Rohmaterial, welches im Laufe des Bearbeitungsprozesses durch Abtragen in die gewünschte Form gebracht wird. Für den Gebrauch im Umfeld von Personal Fabrication sind vorrangig CNC-Fräsen mit 3, seltener 4 oder 5 Achsen zu finden. Mit dem Aufkommen der Maker-Szene haben sich aber auch in diesem Bereich die Preise für die Fertigungsmaschinen deutlich gesenkt und sind dadurch auch zu Treibern von Personal Fabrication und deren Weiterentwicklung geworden.

Maker

Wie schon im vorangegangenen Abschnitt erwähnt sind Maker als technisch interessierte und über das Internet miteinander vernetzte Menschen eine treibende Kraft, wenn es um Personal Fabrikation geht. Dazu soll ein kurzer Überblick die Entstehung der Bewegung und die Einstellung ihrer Mitglieder zeigen, in wie fern sie eine bedeutende Kraft für die Entwicklung von Personal Fabrication darstellen.

Nach einer etwas ruhigeren Phase in Sachen Eigenbau, Hacking und Heimwerken seit den 1990er Jahren, kam es zu Beginn der 2010er Jahre zu einem Wiederaufleben der Kultur um Selbstgemachtes. Sowohl in den USA, als auch in Europa entwickeln sich Gruppen von interessierten Menschen, die sich durch den Begriff Maker definieren. Der Unterschied zu den bisherigen Aktivitäten im Eigenbaubereich ist die themenübergreifende Arbeit und das gezielte Mischen von verschiedenen Fachbereichen. Was früher die Heimwerker und Elektroniker klar trennte, wird nun kombiniert und themenübergreifend betrachtet. In diesem Zuge entwickeln sich verschiedene Formate wie Zeitschriften und digitale Medien, in denen Projekte und Techniken vorgestellt werden und auch Einsteiger ermutigen, zu experimentieren bzw. bei Problemen unterstützen [4].

Treffpunkte der Maker sind Orte in denen Projekte umgesetzt werden und ein lokaler Austausch ermöglicht wird. Hackersspaces, Makerspaces, Fab Labs und Repair-Cafes sind verschiedene Bezeichnungen für Versammlungs- und Werkstätten, in denen sich Maker zum Austausch und gemeinsamen Arbeiten treffen. Abgesehen von den Repair-Cafes, welche sich dem Reparieren von defekten Geräten im speziellen widmen, lassen sich die drei anderen als offene Werkstätten beschreiben, die meist durch einen Verein o.ä. getragen werden. Dies bietet den Vorteil, dass ein Makerspace als Gemeinschaft teure Geräte

wie CNC-Fräsen, Lasercutter oder 3D-Drucker anschaffen kann und viele von deren Nutzung profitieren können. Neben der Umsetzung von Projekten ist ein zentraler Punkt der Makerspaces der Informations- und Wissensaustausch in Form von Festivals, wie der Makerfaire, Vorträgen und Workshops [23]. Diese werden vorrangig für Teilnehmer gestaltet, die zuvor keine Erfahrung mit dem Thema hatten oder die Vertiefung in spezielle Themengebiete wünschen [37].

Neues wagen ist ein erklärtes Ziel der Maker, sei es aus Spaß, Neugier oder Wissensdurst. Viele, die sich selbst zu den Makern zählen, nutzen die Projekte, um sich neue Herausforderungen zu stellen, seien es intellektuell oder die handwerklichen Fähigkeiten. Auch gescheiterte Projekte werden präsentiert und die entsprechenden Fehler analysiert und aufgearbeitet. Dabei ist es nicht selten, dass jemand, der sich in einem Themengebiet sehr gut auskennt, einen neuen Weg sucht, indem er sich in eine neue Technik oder einen fremden Prozess einarbeitet. Damit bilden die Maker, neben den Neueinsteigern, eine interessante Zielgruppe für den Projektwerkzeugkasten. Einerseits, weil sie als Interessierte neue Verfahren kennenlernen wollen, andererseits bringen sie Erfahrungen und Angewohnheiten mit, welche durch die Verwendung des Projektwerkzeugkastens nicht als störend empfunden werden sollen. Gleichzeitig ergibt sich auch noch ein Anspruch an die Flexibilität des Werkzeugkastens bei der Unterstützung neuer Produktionsverfahren.

2.1.2 Forschung

Die wissenschaftliche Forschung beschäftigt sich mit Personal Fabrication aus einem anderen Blickwinkel als die der Maker. Wichtige Konferenzen, auf denen regelmäßig neue Projekte und Forschungsergebnisse veröffentlicht werden, sind die ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI) und ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST) zu nennen, welche regelmäßig stattfinden. Viele Beiträge werden dabei aus dem Umfeld des Hasso-Plattner-Institut (HPI) und MIT - Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory (MIT CSAIL) vorgestellt. Dabei sind die Themen über das Forschungsfeld breit gestreut und umfassen u.a. neu entwickelter Hardware (3D-Drucker mit CNC Fräse)[35], Verfahren und Softwarewerkzeuge wie auch Automatisierungslösungen mit KI [33]. Unabhängig von den Umsetzungen befassen sich vor allem Müller und Baudisch [7] eingehend mit der Einordnung und Beschreibung des Forschungsgebiets, sowie dessen Entwicklung.

Die wissenschaftlichen Arbeiten, welche sich direkt mit PF beschäftigen, lassen sich in drei, für diese Arbeit relevante Gruppen einteilen: *Digitale Werkzeuge / UI*, *neue Fertigungsverfahren* und *Einstiegs erleichtern*. Die Einteilung ist dabei an die von Baudisch [7] benannten sechs Herausforderungen für PF angelehnt und greift dabei die Themen aus der Sicht des Anwenders auf sowie ihren Bezug zu den beiden ersten Arbeitsthemen *Einstiegs erleichterung* und *Werkzeugkombination* aus Kapitel 1.3.1. Da die Projekte sich nicht ausschließlich einem einzigen Themengebiet zuordnen lassen, erfolgt die Einordnung anhand von Schwerpunkten.

Die betrachteten Arbeiten weisen bezogen auf das Thema PF eine Gemeinsamkeit auf. Ein Problem oder eine Fragestellung wird in Form eines spezialisierten vertikalen Prototyps bearbeitet. Dabei werden eine Vielzahl von spezielle Einzellösungen, in Form von Werkzeugen und Strategien entwickelt und deren Umsetzbarkeit im gewählten Szenario belegt. Im Gegensatz zu den Einzellösungen soll der Projektwerkzeugkasten als eine generalisierte Lösung, sozusagen als Hilfe zum Lernen von PF-Themen, entwickelt werden, welche den Einstieg als auch die Vertiefung von Wissen ermöglicht. Anhand der ersten drei Thesen aus Kapitel 1.3.1 werden die Forschungsergebnisse in den benannten Kategorien betrachtet. Die daraus für den Projektwerkzeugkasten wichtigen Erkenntnisse und Entscheidungen werden anschließend zusammengefasst.

Digitale Werkzeuge / UI

Digitale Werkzeuge machen die Erstellung von Produktionsdaten für DF erst möglich. Sie unterstützen dabei in den Bereichen Modellierung, Transformation und Steuerung der Produktion. Damit umfassen sie, auch in PF, den gesamten Bereich der digitalen Modellierung, bis hin zur Erstellung der Fertigungsdaten und Ansteuerung der Produktionsmaschinen. Es zeigt sich, dass Werkzeuge, die nur einen bestimmten Arbeitsschritt realisieren meist einfacher zu bedienen sind. Gleichzeitig muss für einen Einsatz dieser Werkzeuge ein Überblick über die Arbeitsweise beim Nutzer vorhanden sein, damit dieser die Werkzeuge kombiniert anwenden kann.

Die wissenschaftliche Literatur zu digitalen Werkzeugen ist sehr umfangreich und wird hier in die folgenden drei Kategorien eingeteilt: im ersten Abschnitt werden die einfachen Werkzeuge, die als Teil einer Produktionskette eine bestimmte Aufgabe übernehmen betrachtet. Im zweiten Abschnitt werden die Eigenschaften von integrierten Arbeitsumgebungen (Werkbank) erläutert, die im Gegensatz zu den singulären Ansätzen der einfachen

digitalen Werkzeuge eine möglichst vollständige Integration aller nötigen Prozessschritte als Monolith implementieren. Als dritte Gruppe werden Werkzeuge, die sich durch ihre neuartigen Interaktionsformen von den klassischen Wegen der digitalen Modellierung abgrenzen, untersucht.

Einfache Werkzeuge Digitale Werkzeuge dienen der Modellierung und Verarbeitung von Daten, um Produktionsdaten für einen Personal Fabrication Prozess zu erstellen. Dabei übernehmen Werkzeuge einzelne Schritte in der Modellierung oder Weiterverarbeitung der Datenmodelle. Die Gruppe der Werkzeuge lassen sich in drei Kategorien gliedern: *Generalwerkzeuge*, *Spezialwerkzeuge* und *Templatewerkzeuge*. Ein *Generalwerkzeug* realisiert einen bestimmten Vorgang, wie Modellierung, Optimierung oder Konvertierung innerhalb des Prozesses zur Erstellung von Fertigungsdaten. Der Prozessschritt, wie die Bearbeitung eines 3D-Modells, wird dabei in einem weiten Umfang unterstützt, ist aber auf diesen Prozessschritt begrenzt. Werkzeuge grenzen sich so durch den singulären Ansatz von den Werkbanken, die als integrierte Monolithen zu betrachten sind ab. *Spezialwerkzeuge* lösen innerhalb des Modellierungsprozesses ein bestimmtes, meist komplexes, Problem. Um diese Anforderung zu erfüllen, ist das Einsatzgebiet daher auf diese Aufgabe beschränkt und lässt sich nicht außerhalb diese Einschränkung einsetzen. *Templatewerkzeuge* erzeugen ihre Daten nicht vollständig neu, sondern nutzen zuvor angelegte Vorlagen, welche an vorgegebenen Stellen angepasst werden können. Durch diese Einschränkung lassen sich diese Werkzeuge, auf Kosten der Flexibilität, meist leichter bedienen.

Ein *Generalwerkzeug* ist eine Software, die auf einen bestimmten Prozessschritt, wie Modellierung, fokussiert ist. Dabei unterstützt das Werkzeug diesen Prozessschritt mit Funktionen, welche für die allgemeine Umsetzung notwendig sind. Dabei werden bei der Modellierung zum Beispiel keine Einschränkungen im Bezug auf Material und Fertigungsverfahren gestellt. Ein *Generalwerkzeug* für 3D-Modellierung ist CraftML von Yeh et al. [43]. Dabei wird, mittels einer Beschreibungssprache in HTML-ähnlichen Syntax ein 3D Modell erzeugt, welches für die Verwendung mit einem 3D-Drucker oder einer CNC-Fräse verwendet werden kann. Das Werkzeug legt sich dabei nicht bezüglich der weiteren Verwendung des beschriebenen Modells fest, jedoch hat es einen klar festgelegten Prozessschritt, den es als Funktion umsetzt, nämlich die Erzeugung eines 3D-Modells aus einer Beschreibung. Ähnlich können auch andere 3D-Zeichen und Konstruktions-Programme in diese Kategorie eingeordnet werden.

Spezialwerkzeuge bieten Funktionen für eingeschränkte Anwendungsfälle und spezielle Aufgaben. Die Einschränkungen durch die Spezialisierung können in verschiedenen Bereichen, wie zur Produktion verwendetes Material oder Produktionsverfahren, auftreten. Im Bereich der Verwendung von 3D-Druckern zeigen die Arbeiten von Roumen et al.[30] sowie Chen et al.[11] Lösungen, die sich auf den Prozess des 3D-Druckens mittels FDM-Verfahren festgelegt haben.

Bei Grafter handelt es sich um ein Werkzeug von Roumen et al. [30], welches verschiedene 3D-Modelle rekombiniert. Dazu wird in einem ersten Schritt eine Analyse von bestehenden 3D-Modellen vorgenommen. Die einzelnen Bauteile werden erkannt und ihren Funktionen nach klassifiziert und zugeordnet. Anschließend können die Bauteile, wie in einem Baukastensystem, zu neuen Objekten wieder zusammengefügt werden. Grafter ist dabei auf die Produktion von 3D-Modellen sowohl für die zu analysierenden, als auch die produzierten Modelle, eingeschränkt.

Das im Projekt Encore beschriebene Verfahren des Augmented Printing von Chen et al. [11] ist noch wesentlich stärker auf einen bestimmten 3D-Druckprozess festgelegt. Das Werkzeug bietet Funktionen zur Reparatur, Erweiterung und Kombination von bestehenden Objekten mittels 3D-Druck. Auch hier handelt es sich um ein *Spezialwerkzeug*, welches auf die Verwendung von 3D-Scanner und 3D-Drucker angewiesen. Als Druckverfahren kann dabei nur das FDM-Verfahren, also das Aufschmelzen und schichtweise Ablegen von Kunststoffen, eingesetzt werden. In beiden Beispiele wird gezeigt, dass *Spezialwerkzeuge* in ihrem Einsatzgebiet komplexe Probleme lösen, jedoch im Bezug auf ihren Anwendungsbereich, die Modellierung, das Fertigungsverfahren und die Materialauswahl sehr stark einschränkend wirken.

Templatewerkzeuge stellen eine besondere Form von Modellierungswerkzeugen dar, denn sie erlauben die Modellierung nur im Rahmen der vorgefertigten Modelle und den einstellbaren Parametern. Damit ist diese Gruppe der Werkzeuge noch weniger flexibel in der Anwendung als die *Spezialwerkzeuge*. Dafür lassen sich diese Werkzeuge, vor allem durch die Einschränkung, auch von Einsteigern oft leicht nutzen, um schnell ein Modell und die entsprechenden Fertigungsdaten zu erzeugen, weil die vorgefertigten Modelle nur an die persönlichen Wünsche angepasst werden müssen. Hierfür gilt jedoch im Bezug auf die Konfigurierbarkeit, dass diese nur soweit möglich ist, wie es der Ersteller des Modells vorgesehen hat. Über die festgelegten Parameter hat der Anwender keine Chance das Modell in einem Templatewerkzeug zu modifizieren.

In "Design and Fab by Example" [32] zeigen Schulz et al. ein Beispiel für die template-basierte personalisierte Fertigung von Gegenständen. Wie in einem Katalog kann sich der Nutzer ein Objekt als Vorlage auswählen. Auf Basis dieses gewählten Templates können nun einige definierte Parameter vom Anwender festgelegt und damit das Objekt entsprechend modifiziert werden. Die Anwendung ist für Einsteiger besonders leicht zu verstehen und es lassen sich damit schnell produzierbare Ergebnisse erzielen. Gleichzeitig sind die Einschränkungen durch das verwendete Template erkennbar, die eine freie Modellierung, wie es ein *Generalwerkzeug* ermöglicht, nicht zulässt. Ein weiterer Ansatz zur template-basierten Modellierung wird in Retrofab von Remakers et al. [29] gezeigt. Für die automatische Erweiterung von einfachen Haushaltsgeräten zu "smarten Geräten" werden Bauteile entworfen, die vor das bestehende Gehäuse des Gerätes gebaut werden und damit eine automatische Steuerung ohne Eingriff in die Geräteelektronik ermöglichen. Mit diesem Vorsatzgerät kann dann zum Beispiel ein Toaster, wie in dem Projekt gezeigt, als Internet of Things (IoT)-Gerät ferngesteuert werden. Dazu wird das zu bearbeitende Gerät mittels 3D-Scanner als Modell erstellt, um anschließend die Bedienelemente automatisch mit Aktoren und Sensoren zu ergänzen. Als Templates sind hier die Bedienelemente zu verstehen, die im Werkzeug automatisiert eingesetzt werden, da sie nicht vom Nutzer modelliert oder beeinflussbar sind.

Auch CraftML [43] lässt sich wie OpenSCAD als Templatewerkzeug betrachten, da beide Werkzeuge auf einer deklarativen Modellierung beruhen. Durch das Anpassen von Variablen kann so ein komplexes Modell ohne tieferes Wissen über die Modellierung angepasst werden. Gleichzeitig besteht über die Anpassung hinaus für den Nutzer weiterhin die Möglichkeit, das Modell mit dem Werkzeug frei zu bearbeiten.

Werkbanken Werkbanken sind integrierte Arbeitsumgebungen, die mehrere unterschiedliche Werkzeuge zusammenfassen und damit Produktionsprozesse in großem Umfang, in einigen Fällen sogar vollständig, unterstützen. Werkbanken bilden also eine Möglichkeit, innerhalb einer Umgebung von der Modellierung bis zum Erstellen der Produktionsdaten, manchmal auch die Steuerung des Fertigungsprozesses, alle notwendigen Schritte innerhalb einer Umgebung zu erledigen. Gleichzeitig stellen sie durch die Integration hohe Anforderung an die Erfahrung auf der Anwenderseite, sowohl was die Fertigungsprozesse, als auch die Orientierung innerhalb der Werkbank angeht. In der Betrachtung muss zwischen den Werkbanken im industriellen Einsatz und den Forschungsansätzen unterschieden werden. Die Projekte aus der Forschung befassen sich, wie bei den zuvor gezeigten Projekten auch, jeweils mit einem bestimmten Problem, welches mit

dem jeweiligen Ansatz gelöst wird. Diese spezialisierten Werkbanken sind durch ihre Einschränkung auf einen bestimmten Einsatzbereich sehr einsteigerfreundlich gestaltet. Bei den kommerziellen Werkbanken handelt es sich um allgemeinere und umfassende Werkzeugsammlungen, die im Gegensatz zu den Forschungsprojekten möglichst alle Aufgaben von der Modellierung bis zur Produktion abdecken. Dadurch sind sie, aufgrund ihrer Komplexität, in der Anwendung wenig für Einsteiger geeignet.

Beispielhaft kann hier die Mechanism Perfboard von Jeong et al. [17] betrachtet werden. Diese bietet einen Baukasten an zweidimensionalen mechanischen Komponenten, wie Hebel und Kurbeln an, um dann virtuell einen Mechanismus zu konstruieren und anschließend in einer Simulation auf das zu erwartende Verhalten zu testen. Anschließend können die Entwürfe mittels Lasercutting umgesetzt werden, um dann eine funktionierende Mechanik als Produkt zu erhalten.

Im Bereich der 3D Modellierung gehen Weichel et al. mit MixFab [39], einer Mischung aus 3D Scan und Augmented-Reality sowie Modellierungstool, einen Schritt weiter in die Richtung der direkten Manipulation und Kombination von virtuellen und realen Objekten. Dieses System ist durch die eingesetzten Technologien auch in der Anwendung gut mit einer Werkbank zu vergleichen.

Neben diesen beiden Beispielen aus der Forschung sind Werkbanksysteme besonders im Bereich von CAD in 2D sowie 3D in der Industrie üblichen Softwarewerkzeuge. Diese Systeme, wie FreeCad [3] und Fusion360 [2] als Beispiel für 2D/3D-CAD bestehen letztendlich aus einer Sammlung von integrierten Einzelwerkzeugen in einer Umgebung zusammengefasst. Dadurch bieten sie nahezu keine Grenzen in ihrer Anwendbarkeit und Funktion, stellen aber gleichzeitig eine große Komplexität dar und setzen ein erhebliches Grundwissen über die Thematik beim Anwender voraus.

Neue Interaktionsformen Neben dem in den vorhergehenden Abschnitten gezeigten klassischen Modellierungsansätzen, wird auch an neuen Ansätzen zur interaktiven Modellierung und direkten Nutzerinteraktion gearbeitet. Dazu werden Technologien wie Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR), 3D-Scanner uvm. eingesetzt. Durch die meist enge Kopplung zwischen Nutzereingabe und Produktionsverfahren, sind diese Werkzeuge im Bereich der *Spezialwerkzeuge* einzuordnen. Gleichzeitig erfüllen sie vollständige Modellierungsprozesse, in einzelnen Fällen sogar die Produktion des entworfenen Modells. Dadurch sind diese Werkzeuge auch nicht weit von der Einordnung als Werkbank entfernt. Die Ziele dieser neuen Ansätze liegen meist in der Vereinfachung im Umgang

mit PF-Fertigungsprozessen. Dies wird über verschiedene Ansätze wie Automatisierung oder direkte Interaktion mittels AR oder VR-Umgebungen erreicht.

Im Projekt Roma von Peng et al. [27] steuert der Anwender einen 3D-Druck aus einer AR-Umgebung heraus. Gleichzeitig zur Modellierung wird mittels 3D-Drucker, in diesem Fall ein Roboterarm mit 6 Achsen und FDM-Druckkopf das Objekt realisiert. Das Ziel der Anwendung ist dabei das möglichst schnelle Feedback zur Nutzereingabe. Um dies zeitnah zu ermöglichen, wird das Modell als Drahtgitter-Struktur gedruckt. Auch das oben genannte Projekt RetroFab lässt sich durch den 3D-Scanner basierten Ansatz sowie der automatischen Erweiterung alter Geräte um neue Funktionen, in dieser Kategorie einordnen. Nachtigall et al. [25] gehen hier einen Weg der Kombination von 3D-Scan und Templatewerkzeug um Schuhe mittels 3D-Druck zu produzieren, die auf die Fußform des Trägers abgestimmt sind. Bei MixRepair von Blank et al. [8] handelt es sich um ein Konzept für eine virtuelle Werkbank, in der defekte Objekte mittels 3D-Scan geladen und anschließend in der virtuellen Umgebung repariert werden können. Dabei wird ein Modell erstellt, welches anschließend zur Reparatur des Objektes ausgedruckt werden kann.

Zusammenfassung digitale Werkzeuge In diesem Abschnitt wurden die verschiedenen Typen von digitalen Werkzeugen vorgestellt. Die Kategorien für einfache Werkzeuge, die Gruppe der Werkbänke und aktuelle Ergebnisse aus der Forschung zu neuen Interaktionsformen zeigen verschiedene Möglichkeiten, wenn es um die Nutzung durch Einsteiger in das Themengebiet PF geht. Es gibt vor allem bei den einfachen Werkzeugen Ansätze der einsteigerfreundlichen Gestaltung, auch wenn bei einigen dies zu Lasten der freien Gestaltung wie bei den *Templatewerkzeugen* geht. Einzelne Teilaspekte wurden beleuchtet und Anfänger freundlich umgesetzt, aber es fehlt die weiterführende Prozessbegleitung für ein vollständiges Produzieren. Gleichzeitig lässt sich an der Menge der gezeigten Werkzeuge sehen, dass es wenig Bedarf für ein weiteres neues Werkzeug gibt. Vielmehr besteht die Notwendigkeit einer Orientierungshilfe, welche die Auswahl von passenden Werkzeugen unterstützt. Der Projektwerkzeugkasten hat das Ziel mittels eines integrativen Ansatzes einem Nutzer einen leichten Einstieg zu ermöglichen. Durch eine Unterstützung bei der Auswahl und Anwendung von digitalen Werkzeugen wird die Lücke zwischen den großen komplexen Werkbanksystemen, den Werkzeugen für spezielle Anwendungen sowie den für Einsteiger geeigneten Werkzeugen geschlossen. Dabei soll es sich explizit nicht um ein neues Werkzeug oder eine optimierte Werkbank handeln,

sondern ein interaktives Planungstool, das bei der Formulierung einer Idee und deren Umsetzung in Form von Fertigungsprozessen unterstützt.

Neue Fertigungsverfahren

Nach den im voran gegangenen Abschnitt beschriebenen digitalen Werkzeugen, mit ihrem Fokus auf die Modellierung und Erstellung von Fertigungsdaten, werden hier neue Produktionsverfahren beschrieben. Diese Verfahren setzen zwar weiterhin auf die bekannten Produktionsverfahren der PF, jedoch liegt der Fokus hier nicht auf der Modellierung, sondern auf den neuen Einsatzmöglichkeiten. Ähnlich den neuen Interaktionsformen aus dem vorangegangenen Abschnitt werden hier neue Lösungen und erste Konzepte gezeigt. Mit Trussformer zeigen Kovacs et al. [20] den Bau von großen Strukturen aus PET-Flaschen, die mittels 3D-gedruckter Teile verbunden werden. Wakimoto et al. [38] zeigen einen Ansatz, wie mittels 3D-Druck ein Roboterspielzeug neben einem Software-Update auch ein Hardware-Update bekommt und damit real wachsen kann. Bei 4D-Texture von Sun et al. [34] steht die Verkürzung von Druckzeiten im 3D-Druck im Vordergrund. Da die Druckzeit erheblich von der Höhe des zu druckenden Objektes abhängt, wurde hier ein Verfahren basierend auf der Idee des japanischen Origami, entwickelt. Das gedruckte Teil wird nach der Fertigung mittels Hitze in die eigentliche Form gebogen.

Zur Fertigung von flexiblen Leiterbahnen gehen Lambrichts et al. [21] einen neuen Weg der Platinenfertigung. Hier werden mittels Lasercutter abwechselnd aufgeklebte Lagen von Kupferfolie und Kaptonband geschnitten, um mehrlagige flexible Leiterbahnen zu erstellen. Einen anderen Ansatz zur Erstellung von flexiblen elektrischen Verbindungen gehen Klamka et al. [19]. Der Fokus liegt hier auf der Verwendung in Textilien. Bei den sogenannte Wearables, werden die elektrischen Verbindungen auf das Trägermaterial aufgebügelt.

Auch in dieser Kategorie zeigen sich die zuvor schon benannten Einschränkungen in der Verwendbarkeit für Einsteiger. Es werden zwar gute Ansätze und vertikale Prototypen zur Lösung konkreter Probleme gezeigt, diese fokussieren sich aber auf ein sehr enges Anwendungsfeld und setzen jeweils ein bestimmtes Vorwissen wie auch die Beherrschung der Standardprozesse voraus. Durch die ständig neu entwickelten Verfahren und Materialien muss der Projektwerkzeugkasten auch nach der Fertigstellung erweiterbar bleiben, um die neuen Erkenntnisse integrieren und mit dem Werkzeugkasten einsetzen zu können.

Die hier genannten Verfahren zeigen, dass stetig neue Ideen für den Einsatz von PF-Fertigungsverfahren entwickelt werden, diese aber vielfach auf den bekannten Verfahren basieren. Die gezeigten neuen Konzepte sind grundsätzlich interessant, viele aber nur für Anwender, die grundlegende Erfahrung haben. Damit der Projektwerkzeugkasten die neuen Produktionsverfahren unterstützen kann, muss die Möglichkeit bestehen neue Prozesse und Methoden zu ergänzen.

Einstieg erleichtern

Wie in den Abschnitten zuvor gezeigt, werden in vielen Projekten Lösungen erforscht, die sich auf ein spezielles Problem spezialisieren oder einen einzelnen Prozess vom Entwurf bis zur Produktion als vertikale Prototypen realisieren. Unterstützung in einem vollständigen Produktionsprozess vom Entwurf bis zum funktionsfähigen Produkt wird lediglich in Form verschiedener Workshops unter Anleitung diskutiert. Es zeigt sich in der Anwendung, das bisher für die Produktion einer Idee zusätzliches Erfahrungswissen nötig ist, um die Übergänge zwischen Modellierung, Erstellung von Fertigungsdaten und der Herstellung des modellierten Objekts, zu realisieren.

Wie schnell Einsteiger ihre Ideen, mittels PF in einem Workshop, zu funktionierenden Produkten umsetzen können, zeigt die Untersuchung von Mellis et al. [23]. Die Aufgabe der Betreuer bestand dabei vorrangig in der Einführung in die verwendete Software sowie in der Unterstützung zwischen den einzelnen Prozessschritten. Hansen et al. [15] kommen in ihrer Untersuchung zu einem ähnlichen Schluss, dass die Umsetzung zu einem Teil von der technischen Ausrüstung, zum anderen von der Unterstützung in den Übergängen der Modellierung zur Produktion abhängig ist. Von Wibawa et al. [41] wird auf ähnliche Weise beschrieben, dass PF genau dann für Einsteiger funktioniert, wenn die Unterstützung entlang des Produktionsprozesses gewährleistet ist.

Im Bezug auf die explorativen Möglichkeiten des kreativen Lernens sind sich die Autoren der zuvor genannten Arbeiten einig, dass es für die Modellierung und anschließende Fertigung hinreichend einsteigerfreundliche Werkzeuge vorhanden sind. Gleichzeitig wird auf ein notwendiges Expertenwissen für die Übergänge vom Modellieren zur Fertigung hingewiesen. An dieser Stelle besteht also eine Lücke zwischen den Werkzeugen, die jeder für sich genommen einsteigerfreundlich sind, aber an der Schnittstelle zum Folgewerkzeug abbrechen und den Einsteiger beim Übergang alleine lassen.

An dieser Stelle kann der Projektwerkzeugkasten zwei Lücken schließen. Zunächst wird die Lücke zwischen den einzelnen Werkzeugen adressiert, um an den Übergängen einerseits zu unterstützen und andererseits deren Aufgabe zu verdeutlichen. Die zweite Wirkung besteht in der Möglichkeit des explorativen Arbeitens und der gleichzeitigen fachlichen Unterstützung durch den Projektwerkzeugkasten, welche den kreativen Umgang mit den Werkzeugen ermöglicht und an den notwendigen Stellen so unterstützt, dass eine Umsetzung des Projekts technisch möglich wird.

2.2 Didaktik digitaler Lernformen

Damit der Anspruch des Projektwerkzeugkastens unerfahrenen Nutzern einen Einstieg und erfahrenen Anwendern eine Weiterbildungsmöglichkeit zu bieten, erreicht wird, zeigt dieser Abschnitt die Ergebnisse und Ansätze aus der Forschung zum Einsatz von digitalen Lernformen.

Um die Wirksamkeit von digitalen Lernformaten beurteilen zu können, fordern Freudenreich et al. eine Bewertung der digitalen Lernumgebung nach dem Grad der Unterstützung für die verschiedenen Lernentwicklungsphasen, dazu gehören *Modelling*, *Coaching*, *Scaffolding* und *Fading*. *Modelling* beschreibt das Lernen durch die Erklärung und das Vorführen eines Lehrers oder Meisters. *Coaching* beschreibt die Nachahmung durch Replikation unter Anleitung, welche eine erste eigene Handlung des Lernenden bedeutet. Die Phase des *Scaffolding* ist dann die Steigerung zu anspruchsvolleren Aufgaben und die dadurch eintretende Festigung des Gelernten durch Übung und erste selbstständige Arbeiten. In der letzten Phase, dem *Fading* tritt die Hilfe des Lehrers in den Hintergrund, wodurch der Lernende beginnt das Gelernte weiter zu entwickeln und selbstständig anzuwenden. Anhand dieser Eigenschaften lässt sich für eine digitale Lernumgebung untersuchen, inwieweit sie zur Unterstützung der jeweiligen Lernentwicklungsphase geeignet ist. Damit schreiben Freudenreich et al. der digitalen Lernumgebung die gleiche Rolle zu, wie üblicherweise ein Lehrer dies gegenüber einem Lernenden übernimmt. Darüber hinaus weisen die Autoren darauf hin, dass die Qualität der Lernsoftware sich erhöht, wenn diese einen explorativen Umgang ermöglichen. Ähnlich argumentieren auch Trichina et al. [36], in ihrem Beispiel einer Simulation der Turingmaschine. Das Experimentieren und Beobachten der Auswirkung hat laut der Untersuchung einen besseren Lernerfolg und höhere Motivation zur Folge, als den zu lernenden Inhalt anhand der formalen Beschreibung zu verinnerlichen.

Besonders mit der Forderung nach Möglichkeiten des explorativen Lernens erfolgt, dass es nicht ausreichend ist digitale Lernformate als reinen Übergang von klassischen Medien wie Papier und Tafel hin zu Smartboards und Tablets zu realisieren. Vielmehr sollten die Möglichkeiten ausgeschöpft werden, die Lehre durch eine Digitalisierung des Unterrichts effizienter zu gestalten. Für eine entsprechende Umsetzung einer Unterrichtssituation schlagen Jantke und Knauf [16] einen Lösungsansatz vor, der die Planung von Lerneinheiten in E-Learning-Systemen als Weg betrachtet, der die oben genannten Schritte realisiert. Der Ansatz beschreibt die Aufarbeitung des Lehrinhalts mittels einer Storyboard getriebenen Methode, mit dem Ziel das zu vermittelnde Wissen mit den Möglichkeiten des digitalen Lernens optimal zu unterstützen. Dabei sollen durch den Arbeitsablauf zwei Ziele erreicht werden: einerseits die Nutzung des Potentials der digitalen Lernumgebung, durch neue Methoden und Formate, andererseits wird so vermieden, dass die vorhandenen Lehrmittel lediglich in die digitale Umgebung übertragen werden. Durch dieses Vorgehen sollen unter anderem Möglichkeiten für exploratives Lernen, vertiefende Informationen und direktes Feedback bei der Erstellung von Inhalten vermittelt werden. Der Projektwerkzeugkasten soll daher nicht nur die Modellierung des Projekts ermöglichen, sondern auch kontextbezogene Zusatzinformationen, sowohl als Grundlagen für den Einstieg als auch als vertiefende Information für erfahrene Anwender, bereitstellen.

Insgesamt zeigt sich, dass digitale Bildung ein Konzept benötigt, um wirksam zu greifen. Auf der anderen Seite steigt der Bedarf an digitalen Lernformen stetig, nicht zuletzt durch die aktuellen Entwicklungen der Corona-Pandemie. In Folge des so steigenden Bedarfs muss auch die Qualität des digitalen Lernangebots entsprechend hoch sein. Dabei zeigen die Untersuchungen von Mosteanu [24] und Börnert et al.[10], dass der Umstieg von klassischen auf digitalen Lernformen einen Prozess bedeutet, der, wie es auch Jantke und Knauf fordern, den Inhalt in die neuen Methoden transformieren muss. Die Qualität hängt dabei laut Börnert et al. nicht zuletzt von der Motivation und Einstellung der Lehrenden ab, welche die Inhalte bereitstellen. Darüber hinaus müssen aber auch die Lernumgebungen diesen Prozess der Digitalisierung der Lehre sowohl in der Erstellung von Inhalten als auch in der Anwendung durch die Lernenden, unterstützen, um so für eine hohe Qualität sorgen zu können. Daher muss der Projektwerkzeugkasten eine einfache Möglichkeit, zum Ergänzen oder Erweitern von Inhalten durch Lehrende ohne spezielle Vorkenntnisse bieten.

Aus der Perspektive der Jugendlichen betrachtet bedeutet ein digitalisierter Unterricht eine Anpassung der Lernsituation an die bereits durch Smartphone und Internet geänderte Lebensrealität. Wie es in einer Untersuchung von Blauvelt et al. [9] aufgeführt wird,

soll durch digitale Modellierungen von mechanischen Systemen, bei Schülern ein Interesse für Ingenieursberufe geweckt werden. Der Anlass war die Beobachtung, dass die Anzahl der an Ingenieursberufen interessierten Schüler stetig zurück ging. In einem Versuch zeigten Blauvelt et al., dass mit dem Einsatz geeigneter Software Einstiegshürden vermindert werden. Insgesamt zeigte sich, dass nicht nur die Qualität der Lehre durch einen digitalen Unterricht, sondern auch die Motivation und das Interesse erhöht werden.

Für den Einstieg in Personal Fabrication ist es also zweckmäßig, eine digitale Form der Wissensvermittlung zu verwenden. Dies sollte neben den im vorherigen Abschnitt 2.1.2 beschriebenen erleichterten Einstieg durch geeignete Werkzeuge auch für die Lernumgebung gelten. Der Werkzeugkasten soll durch geeignete digitale Werkzeuge in der Lernumgebung den Einstieg in das Themengebiet erleichtern und den Medienbruch im Lernen, durch eine kontinuierliche Arbeit mit digitalen Umgebungen beseitigen. Des Weiteren soll der Werkzeugkasten den Computer als Lehr-, Lern- und Arbeitsmedium stärker etablieren, wie es von Niegemann et al.[26] beschrieben wird.

2.3 Workflowmodellierung

Der Projektwerkzeugkasten hat neben dem didaktischen Ziel auch die Anforderung an eine flexible Prozessmodellierung. Da der Projektablauf vom Anwender mit möglichst geringen Einschränkungen frei modellierbar sein soll, wird zur Überprüfung und anschließenden Anwendung des Projekts ein Modell benötigt, welches flexibel und im Nachhinein einfach erweiterbar ist. In diesem Abschnitt werden die drei Ansätze für die Workflowmodellierung, Business Process Modelling Notation (BPMN), Petri-Netze und ein deklarativer Ansatz, kurz vorgestellt, auf ihre Eignung untersucht und eine entsprechende Auswahl getroffen.

BPMN steht für Business Process Modelling Notation und stellt eine etablierte Lösung zur digitalen Abbildung und Steuerung von Arbeitsabläufen dar, deren Ziel die digitale Repräsentation von Geschäftsprozessen ist. Bei der Vorstellung durch White [40] wird BPMN als eine Standardisierung der Abbildung von Prozessabläufen benannt, welche aus der Betrachtung diverser vorhergehender Modelle entstand. Das Ziel dieses Modells ist eine vollständige Abbildung von Geschäftsprozessen, um für die Digitalisierung bestehende Prozesse abbilden zu können. Dazu sind verschiedene Elemente wie Prozessschritte, Verzweigungen, Nachrichten zur Kommunikation zwischen zwei Prozessen und diverse

weitere Möglichkeiten vordefiniert. Dies macht BPMN einerseits flexibel, andererseits bedarf es viel Erfahrung um Prozesse auf diese Art abzubilden und anschließend automatisiert ablaufen lassen zu können. Wolf et al. [42] beschreiben bei der Analyse von BPMN, dass zwar ein linearer Prozess in BPMN leicht zu modellieren sei, komplexere Modelle lassen sich jedoch nur mit ausreichend Erfahrung und tieferem Kenntnis sinnvoll erzeugen. Diese Erfahrung kann für die Erweiterung durch eine Lehrkraft, welche den Projektwerkzeugkasten für die digitale Lehre einsetzen möchte, nicht vorausgesetzt werden.

Petri-Netze wurden ursprünglich zur Modellierung von nebenläufigen Systemen entwickelt. Durch die Analyse der in Petrinetzen modellierten Systeme lassen sich Aussagen über deren Verhalten und Eigenschaften, wie zum Beispiel Deadlocks oder Verklemmungen, ableiten und beweisen. Im Vergleich zum BPMN kommen Petrinetze mit deutlich weniger Elementen aus. So existieren in Petrinetzen neben den Regeln, unter welchen Umständen eine Transition schalten kann, keine expliziten Elemente wie Bedingungen oder Vergleiche. Diese lassen sich aber aus den Elementen entsprechend modellieren. Da einige Verhaltensweisen schwierig mit einfachen Petrinetzen umzusetzen sind, wurden verschiedene Formalismen wie gefärbte, zeitgesteuerte oder ineinander geschachtelte Petrinetze entwickelt, die eine entsprechende Umsetzung erleichtern oder für eine bessere Übersichtlichkeit sorgen[13]. Für eine Workflow-Modellierung unter dem Einsatz von Petrinetzen fordern Salimifard et al. [31] geeignete Modellierungswerkzeuge sowie den Einsatz von zeitgesteuerten gefärbten Petrinetzen um Arbeitsabläufe sinnvoll modellieren zu können. Duvigneau [13] zeigt dazu die Mächtigkeit der klassischen Petrinetze und der erweiterten Regelsätze, wie bei gefärbten Petrinetzen er weist aber insbesondere auch daraufhin, dass besonders die sichere Modellierung von Bedingungen sehr aufwändig ist. Lineare Prozessketten und die Synchronisierung von nebenläufigen Prozessen mit einfachen Bedingungen lassen sich leicht in Petrinetzen realisieren. Um komplexere Bedingungen modellieren zu können, muss neben der eigentlichen Bedingung auch deren Komplementär modelliert werden. Dazu müssen auch alle bedingungsändernden Transitionen verbunden sein, wodurch die Komplexität des Netzes extrem steigt.

Zur Trennung der verschiedenen Domänen im Projektwerkzeugkasten könnten gefärbte Petrinetze in der Modellierung zum Einsatz kommen. Ebenso eignen sich Petrinetze für die Verifikation der Modelle und Abläufe des Projektwerkzeugkastens, für die Ergänzung von neuen Verfahren und Materialien. Durch Nicht-Experten ist die Verwendung von Petrinetzen jedoch als zu schwierig anzusehen.

Deklaratives Modell Ein deklaratives Modell, wie es von Pesic et al. [28] vorgestellt wird, ist eine auf Constraints basierende Lösung zur Modellierung von Arbeitsabläufen. Die Erstellung eines Workflows erfolgt dabei durch die Auswahl von Variablen und Werten unter der Einhaltung überprüfbarer Regeln. Die als Constraints formulierten Regeln bestimmen unter welchen Vorbedingungen die Schritte zu einem Ablauf verbunden werden dürfen. Der so entstehende Graph und seine Eigenschaften hängt direkt von den für das Modell gewählten Constraints ab, welche so darüber entscheiden, ob ein Workflow Zyklen enthalten darf oder ob das Modell jederzeit lebendig ist.

Van der Aalst et al. [12] beschreiben darüber hinaus die Eigenschaften von deklarativen Workflow-Modellen im Spannungsfeld zwischen einfacher Bearbeitung und strukturierter Anwendung. Neben den Einschränkungen für große strikt prozedurale Prozesse und die Grenzen des im Artikel untersuchten Interpreters, wird auf die Vorteile durch eine problemorientierte grafischen Darstellung des Modells für den Nutzer hingewiesen. Damit im Projektwerkzeugkasten das Workflowmodell auch von Laien erweitert werden kann, lässt sich ein Teil des Modells als festgelegtes Grundmodell betrachten. Der zweite Teil des Modells beschreibt in Form von Filtern weitere Vorbedingungen welche entsprechend die Auswahl einschränken. Damit beschreibt ein deklaratives Modell lediglich die Vorbedingungen, Regeln und Eigenschaften, wie ein Workflow zu modellieren ist. Damit die aus der Arbeitshypothese gestellte Anforderung, nach der einfachen Erweiterung ohne spezielle Vorkenntnisse in der Programmierung, erfüllt ist, wird für den Projektwerkzeugkasten ein deklaratives Modell zur Umsetzung verwendet. Die Filter, welche die Kombination von Verfahren, Material und Werkzeugen beeinflussen, werden so realisiert, dass auch für Laien die Erweiterung des Modells möglich ist. Um Sackgassen und Zyklen zu vermeiden, wird das Modell für den Projektwerkzeugkasten so konstruiert, dass sowohl für den Projektplan als auch für die Werkzeugketten nur Baumstrukturen entstehen können.

2.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Themen Personal Fabrication, Didaktik digitaler Lernformen und Workflowmodellierung und deren Stand der Forschung im Bezug auf den Projektwerkzeugkasten betrachtet. Dabei zeigte sich für die Forschung im Bereich der Personal Fabrication eine enge Verbindung zu der Maker-Bewegung und dem Interesse, neben neuen Entwicklungen, auch den Einstieg für Interessierte zu erleichtern. Die

Bemühungen für einen erleichterten Zugang beschränken sich derzeit jedoch auf einzelne vertikale Prototypen, die sich auf einen dedizierten Aspekt von Personal Fabrication konzentrieren und weniger auf einen umfänglichen Ansatz, der mehrere Verfahren in Kombination in Betracht zieht, wie es für diese Arbeit als Ziel formuliert wurde. Gleichzeitig wird die Aufgabe des Projektwerkzeugkastens als integrative Lösung, wie in 1.3.1 gefordert, erkennbar, da vor allem die spezialisierten Werkzeuge mit ihren Fachgebiete in Kombination mit Generalwerkzeugen umfassende Lösungen ermöglichen.

Im Abschnitt zur Didaktik digitaler Lernformate wurden die Grundlagen an digitale Lernsysteme und die verschiedenen Phasen des Lernens betrachtet. Dabei wurden die Lernabschnitte *Modelling*, *Coaching*, *Scaffolding* und *Fading*, sowie deren Unterstützbarkeit durch interaktive digitale Lernumgebungen erläutert. Neben der Differenzierung von Lernphasen und den daraus entstehenden Anforderung an die Lernsysteme wurde auch die Wirkung des explorativen Lernens anhand der Untersuchung von Workshops mit Personal Fabrication Themen untersucht. Dabei zeigte sich, dass der Lernfortschritt durch die praktische Anwendung in den Workshops zu einem besseren und nachhaltigerem Verständnis bei den Teilnehmern beiträgt. Welches die Forderung aus 1.3.1 und 1.3.1, nach einer digitalen Lern- und Arbeitshilfe für PF-Projekte unterstützt.

Der letzte Abschnitt zum Thema Workflowmodellierung untersuchte die Eignung drei verschiedener Ansätze BPMN, Petrinetze und deklarative Modellierung auf ihre Eignung für den Einsatz im Projektwerkzeugkasten. Hier wurde die Entscheidung für den deklarativen Ansatz zur Modellierung getroffen, um die in 1.3.1 geforderte einfache Erweiterbarkeit des Modells nach der Entwicklung ermöglichen zu können. Ebenso stellte sich heraus, dass gefärbte Petrinetze eventuell geeignet sind, um die Modellierung auf Anwendbarkeit und Fehler zu prüfen.

3 Anforderungsanalyse

Dieses Kapitel beschreibt im ersten Abschnitt 3.1 die Rolle der Nutzer und wie sie durch den Projektwerkzeugkasten in der Planung und Umsetzung eines PF-Projektes unterstützt werden. Die Eigenschaften der Elemente des Projektwerkzeugkastens sowie deren Beitrag zur Erfüllung der These in Abschnitt 1.3.1 zeigt die Strukturanalyse im Abschnitt 3.2. Ein exemplarischer Ablauf einer Projektplanung am Beispiel eines Projekts für Anfänger im Abschnitt 3.3 legt dar, welche Unterstützung der Projektwerkzeugkasten *Einsteiger*, *Fortgeschrittenen* und *Experten* bietet. Anschließend werden die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen zusammengefasst aufgezeigt.

3.1 Nutzerrollen

Für den Projektwerkzeugkasten wird von vier Nutzerrollen ausgegangen, die sich jeweils in ihrer Expertise zu PF-Themen unterscheiden. Zunächst wird der Einsatz des Projektwerkzeugkastens anhand der Rolle eines *Anwenders* im Allgemeinen beschrieben. Anschließend wird der Lernzuwachs wie in den Thesen, des Abschnitts 1.3.1, zuvor beschrieben, anhand der Rollen von *Einsteiger*, *Fortgeschrittenen* und *Experten* aufgezeigt. Dabei hat ein *Einsteiger* bisher noch keine Erfahrung in der Umsetzung von PF-Projekten. *Fortgeschrittene* Benutzer haben bereits erste Erfahrungen mit der Verwendung von PF-Technologien und sind mit deren Grundlagen vertraut. *Experten* nutzen den Aufbau des Projektwerkzeugkastens um sich in die Anwendung neuer Fertigungsverfahren einzuarbeiten. Die Rolle der *Lehrkraft* besteht in der Konfiguration des Projektwerkzeugkastens und unterscheidet sich dadurch von den zuvor genannten Rollen. Die *Lehrkraft* muss sowohl das Modell des Projektwerkzeugkastens verstehen, als auch in der Lage sein, die *Wissensbasis* um neue *Elemente* zu erweitern. Somit unterscheidet sich diese Rolle von den oben genannten *Anwender*-Rollen da sie nicht die Umsetzung eines Projektes zum Ziel hat.

3.1.1 Anwender

Der Projektwerkzeugkasten soll dem Anwender eine Möglichkeit bieten, ein PF-Projekt zu planen und umzusetzen. Das Ziel besteht in der Planung und Fertigung eines Produkts, zu dessen Umsetzung der Anwender einen Projektplan erstellt, aus dem anschließend eine interaktive Anleitung zur Projektdurchführung erzeugt wird. Der Projektwerkzeugkasten hat dazu drei Module, die im Entwurfsprozess den Nutzer unterstützen. Die *Wissensbasis* realisiert eine Modellprüfung und sorgt dafür, dass das Projekt von der Auswahl der Projektstruktur umsetzbar ist. Die *Tutorial-Projekte* dienen als Vorlage und der Vorkonfiguration von festgelegten Einstellungen im Projekt, sodass der Nutzer durch die Vorlage entsprechend geführt wird. Das *Hilfesystem* unterstützt, sowohl bei der Projektplanung, als auch bei der späteren Projektdurchführung, und liefert Hinweise und weiterführende Informationen zum Projektkontext. Darüber hinaus kann der Anwender in der Projektplanung zu jedem Element Notizen verfassen, die im entsprechenden Kontext in der *Projektdurchführung* wieder angezeigt werden. Der Zustand eines Projekts kann durch den Benutzer jederzeit gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgerufen werden.

3.1.2 Einsteiger

Für einen Einsteiger ist sowohl die Arbeit an Projekten mit PF-Hintergrund, wie auch die Arbeit mit dem Projektwerkzeugkasten unbekannt. Daher wird für diesen quasi doppelten Einstieg eine entsprechende Führung durch den Projektwerkzeugkasten ermöglicht. Die Führung wird mittels der Tutorial-Projekte erreicht, die als Vorlage für ein Projekt dienen. Zusätzlich kann ein Tutorial-Projekt die Anzahl der vom Benutzer veränderbaren Einstellungen einschränken. So wird erreicht, dass der Einsteiger durch die Einschränkung im Prozess der Projektplanung geleitet und nicht durch zu viele Optionen abgelenkt oder überfordert wird. Ein Tutorial-Projekt kann sowohl die *Werkzeug-, Verfahrens- und Materialauswahl* (siehe 3.2) beschränken, als auch die Modellierung eines Bauteils, sodass im Rahmen des Schulunterrichts einzelne vorgefertigte Bauteile umgesetzt werden können. Zusätzlich bietet ein Tutorial für die Bedienung des Projektwerkzeugkastens eine erste Orientierung in der Anwendung.

3.1.3 Fortgeschrittene und Experten

Fortgeschrittene Nutzer und Experten haben gegenüber dem Anwender Erfahrungen in der Umsetzung von PF-Projekten und können mit dem Projektwerkzeugkasten selbstständig Projekte planen und umsetzen. Dabei können *Tutorial-Projekte* als Vorlage für ein Projekt eingesetzt werden. Jedoch entfällt bei dieser Nutzergruppe die Festlegung von Einstellungen. Der Experte kann den Projektwerkzeugkasten darüber hinaus frei als Planungswerkzeug einsetzen. Dabei wird er fachlich bei der Erstellung des Projektplans und den Werkzeugketten durch die Wissensbasis unterstützt.

3.1.4 Lehrkraft

Die Lehrkraft erfüllt bei der Verwendung des Projektwerkzeugkastens administrative Aufgaben. Die Ergänzung der *Wissensbasis* um neue *Verfahren, Werkzeuge und Materialien* sowie die Einstellung, welche dieser Elemente für die Anwender verfügbar sind, ist die wichtigste Aufgabe. Die *Wissensbasis* bildet eine Sammlung von Regeln und Abhängigkeiten, welche sowohl den Planungsprozess unterstützt, als auch die Transformation des Projektplans in die Aufgabenliste der Umsetzungsphase realisiert. Durch die Ergänzung der *Wissensbasis* kann der Projektwerkzeugkasten flexibel erweitert und an die Anforderungen im Einsatzkontext angepasst werden. Des Weiteren soll die Lehrkraft für die Anwendung des Projektwerkzeugkastens im Unterricht passende *Tutorial-Projekte* anlegen können.

3.2 Struktur des Projektwerkzeugkastens

Im Folgenden werden zunächst die Elemente des Werkzeugkastens beschrieben. Die Elemente *Material, Verfahren* und *Werkzeug*, ermöglichen eine abstrakte Beschreibung des Projekts und die Modellierung der Abhängigkeiten. Anschließend werden die Projektphasen vorgestellt.

Die Durchführung eines Projekts wird vom Projektwerkzeugkasten in zwei Projektphasen unterteilt. Die erste Phase, die *Projektplanung*, unterstützt die Festlegung der Projektstruktur. Die zweite Phase ist die *Projektumsetzung*, in der die Realisierung des Projekts unterstützt wird.

3.2.1 Elemente

Die Elemente beschreiben Abstraktionseinheiten für den Projektplan und erlauben es technische und logische Abhängigkeiten bei der Erstellung eines Projektplans einzuhalten. Dabei werden für die Umsetzung sowohl der *digitale Anteil* durch die Modellierung und Anwendung von Werkzeugen, als auch der *physische Teil* bestehend aus konkreten Materialien und Fertigungsverfahren beschrieben, die zusammen ein Bauteil ergeben. Dabei entstehen zwei Gruppen von Abhängigkeiten. Die erste Gruppe ist die Abhängigkeit zwischen Material und Fertigungsverfahren im eingesetzten Fertigungsprozess. Die zweite Gruppe stellt die Abhängigkeiten bei der Bildung von Werkzeugketten dar. Dabei muss das Ergebnis der Werkzeugkette die Anforderungen des ihr zugeordneten Fertigungsprozess erfüllen.

Material Als Material wird der Rohstoff bezeichnet, welcher durch das Fertigungsverfahren zu einem Bauteil verarbeitet wird. Je nach eingesetztem Verfahren können nur Materialien mit bestimmten Eigenschaften verwendet werden. Für die Verwendung von Plattenmaterial wie Sperrholz und Acrylglas können sowohl Lasercutter, als auch CNC-Fräsen als *Fertigungsverfahren* verwendet werden. Kunststoff-Filamente lassen sich dagegen ausschließlich auf einem FDM-3D-Drucker sinnvoll einsetzen.

Fertigungsverfahren Als Fertigungsverfahren wird die Bearbeitung eines Materials bezeichnet. Dabei wird zwischen subtraktiven, additiven, umformenden und fügenden Verfahren unterschieden. Beim 3D-Druck handelt es sich um ein additives Fertigungsverfahren, welches durch schichtweises Auftragen eines Materials ein *Bauteil* aufbaut. Lasercutter realisiert ein subtraktives Verfahren, welches das Material gravieren und schneiden kann.

Werkzeug Ein Werkzeug ist eine Software, welche bei der digitalen Modellierung und Fertigung von Bauteilen eine Aufgabe erfüllt. Computer-Aided-Design (CAD)-Programme ermöglichen die digitale Modellierung von Bauteilen. Konverter und Finisher dienen der Umwandlung und Anpassung von Modellen. Dabei liegt die Aufgabe der Konverter in der Transformation von Modellen aus einem bestimmten in ein anderes Datenformat, wohingegen Finisher eine meist algorithmische Nachbearbeitung der Modelle vornehmen. Zum Beispiel wandelt Gruppe der Computer-Aided-Manufacturing (CAM)-Programme

ein Modell in Fertigungsdaten, zum Ansteuern der im Fertigungsverfahren eingesetzten Maschine, um.

Werkzeugkette Eine Werkzeugkette beschreibt das Zusammenspiel aus verschiedenen Werkzeugen für die Fertigung eines Bauteils. Für die Kombination von Werkzeugen wird davon ausgegangen, dass ein Werkzeug je einen Ausgang und mindestens einen Eingang besitzt. Werden zwei Werkzeuge miteinander kombiniert, so müssen der Ausgang des vorgehenden mit einem Eingang des folgenden Werkzeugs kompatibel sein. Dadurch, dass in einem Werkzeug mehrere Modelle miteinander kombiniert werden können, kann eine Werkzeugkette an mehreren Stellen beginnen, jedoch hat sie immer genau ein letztes Werkzeug. Das Ende einer Werkzeugkette wird durch das durchzuführende Fertigungsverfahren bestimmt, welches durch eine Steuersoftware oder ein bestimmtes Dateiformat vorgegeben wird. Der Anfang einer Werkzeugkette muss durch ein vorhandenes Modell oder durch eine Modellierung des Nutzers, zum Beispiel mittels CAD-Programm, abgeschlossen sein.

Bauteil In der Umsetzung des Projekts stellt ein Bauteil ein physisches Objekt dar, welches produziert oder bereitgestellt wird. Wird ein Bauteil im Rahmen des Projektes produziert, besteht es aus je einem Material, Fertigungsverfahren und einer Werkzeugkette. Bei der Modellierung muss die *Wissensbasis* sicherstellen, dass sowohl das Material, als auch das Ergebnis der modellierten Werkzeugkette jeweils zum eingesetzten Verfahren passt. Typische Beispiele für Bauteile in PF-Projekten sind allgemein mechanische Komponenten, wie Zahnräder, Hebel und Gehäuse. Ein Beispiel für externe Bauteile sind elektronische Komponenten wie Lautsprecher, LEDs und Batterien.

Verbindung Eine Verbindung zeigt auf, wie zwei Bauteile miteinander kombiniert werden. Dadurch entsteht ein neues zusammengesetztes Bauteil, welches mit anderen Bauteilen weiter kombiniert werden kann, bis alle im Projekt angelegten Bauteile miteinander zu einem Produkt verbunden sind. Für die Verbindung kann der Nutzer je nach Art der zu verbindenden Bauteile, verschiedene Methoden wählen. Dabei können Hilfsmittel wie Klebstoffe oder Schrauben zum Einsatz kommen oder bei geeigneter Modellierung durch Formschluss (Verzahnung) oder Kraftschluss (Klemmung) verbunden werden.

Produkt Alle miteinander verbundenen Bauteile bilden ein Produkt. Dies ist das physische Ergebnis, welches durch die Umsetzung des Projekts entsteht.

3.2.2 Projektphasen

Die Nutzung des Projektwerkzeugkastens gliedert das Projekt in zwei getrennte Phasen *Projektplanung* und *Projektumsetzung*. Damit trennt der Projektwerkzeugkasten die grobe Konzeption, mit der Festlegung von Bauteilen und deren Verbindungen, von der späteren Modellierung und Umsetzung. Weiterhin ist im Projektwerkzeugkasten der Übergang von einer Projektplanung in die Projektumsetzung notwendig, um aus der Projektbeschreibung einen *Umsetzungsplan* abzuleiten, der die Umsetzung anleitet. In der Phase der *Projektumsetzung* unterstützt dann der Projektwerkzeugkasten den Nutzer bei der Modellierung und Fertigung der Bauteile durch die Schritte im Umsetzungsplan. Mit Abschluss des letzten Umsetzungsschritts wird das *Produkt* als Ergebnis des Projekts fertiggestellt.

Projektplanungsphase

In der Projektplanungsphase wird die Projektbeschreibung durch den Nutzer entwickelt. Die kann in einem leeren oder in einem durch eine Vorlage vorgelegten Projekt geschehen.

Projektbeschreibung In der Projektbeschreibung wird das Projekt durch den Nutzer abstrakt beschrieben. Dazu werden Bauteile angelegt und deren Material, Fertigungsverfahren und Werkzeugkette definiert. Die Bauteile werden mittels Verbindungen miteinander kombiniert. Diese Kombination beschreibt ein Produkt, welches das Projektergebnis darstellt.

Tutorial-Projekt Ein Tutorial-Projekt ist eine Vorlage für die Projektbeschreibung. In dieser Vorlage werden einzelne Elemente für das Projekt vorgelegt und können zusätzlich gegen Veränderung durch den Nutzer gesperrt werden. Darüber hinaus kann ein Tutorial-Projekt auch die Auswahl der für das Projekt zur Verfügung stehenden Elemente einschränken.

Abschluss der Projektplanung Ist ein Projekt vollständig beschrieben, so kann der Projektplan in die Aufgabenliste der Umsetzungsphase überführt werden. Der Projektwerkzeugkasten prüft die Vollständigkeit jedoch nur bezogen auf das Modell des Projektplans. Dieser Plan wird dann als vollständig akzeptiert, wenn alle Bauteile miteinander zu einem Produkt verbunden sind und alle Werkzeugketten für die Bauteile umsetzbar sind. Die Prüfung erfolgt anhand der in der Wissensbasis konfigurierten Regeln für die Elemente des Projektwerkzeugkastens.

Umsetzungsphase

In der Umsetzungsphase unterstützt der Projektwerkzeugkasten die Realisierung des Projekts. Dazu wird eine *Aufgabenliste* mit *Umsetzungsschritten* aus der Projektplanung erstellt, die zur Umsetzung des Projekts durch den Nutzer abgearbeitet wird.

Umsetzungsschritt Ein Umsetzungsschritt ist eine Aufgabe, welche die Umsetzungsphase des Projektwerkzeugkastens einen bestimmten Arbeitsschritt beschreibt. Alle Umsetzungsschritte eines Projektes bilden den Umsetzungsplan. Bei der Erzeugung des Umsetzungsplans, werden die Schritte mit Abhängigkeiten annotiert, welche die Vorbedingung der Umsetzung durch den Nutzer beschreiben. Dadurch kann in der Umsetzungsphase die Reihenfolge, in der die einzelnen Arbeitsschritte des Umsetzungsplans zu erledigen sind, von Nutzer frei gewählt werden, sofern die für den Schritt gesetzten Vorbedingungen erfüllt sind.

Erstellen der Aufgabenliste Bei der Erstellung der Aufgabenliste werden die Elemente des Projektplans mit Hilfe der Wissensbasis in einzelne Aufgaben überführt und mit Abhängigkeiten annotiert. Aus einem Element können dabei abhängig von seinen Eigenschaften mehrere Umsetzungsschritte und Abhängigkeiten generiert werden. Die entstandene Liste gibt dann den Workflow für die Umsetzung des Projekts vor.

3.2.3 Wissensbasis

Durch die Forderungen der Thesen in Abschnitt 1.3.1 nach einer flexiblen Lösung, die eine kombinierte Anwendung verschiedener Werkzeuge ermöglicht, benötigt der Projektwerkzeugkasten eine *Wissensbasis*, zur Verwaltung und Anwendung verschiedener Regeln. Im

Betrieb des Projektwerkzeugkastens erfüllen die in der Wissensbasis hinterlegten Regeln zwei Aufgaben. Die erste Aufgabe besteht in der Überwachung der Projektplanung. Bei den Elementen beginnend legen diese Regeln fest, welche Materialien und Verfahren gemeinsam ein Bauteil ergeben können. Damit stellt die Wissensbasis die *Produzierbarkeit* sicher. Die *Modellierbarkeit* der Werkzeugketten wird durch die Regeln der Wissensbasis sicher gestellt. So sind die aufeinanderfolgenden Werkzeuge miteinander kompatibel und die Werkzeugkette liefert ein für das Fertigungsverfahren des Bauteils produzierbare Daten. Ebenso legt die Wissensbasis fest, welche Verbindungsmethoden für die zu verbindenden Bauteile zur Verfügung stehen. Dazu lassen sich jeweils Abhängigkeiten bezüglich der in den Bauteilen verwendeten Materialien festlegen. Die zweite Aufgabe der Regeln besteht in der Transformation eines Projektplans in die Aufgabenliste der Umsetzungsphase. Die Regeln realisieren dabei ein Workflowmodell, welches die Umsetzung der Elemente eines Projektplans in einzelne Aufgaben beschreibt. Zusätzlich annotiert das Modell jede erstellte Aufgabe mit einer Liste von Abhängigkeiten, die vor der Bearbeitung dieser Aufgabe erfüllt sein müssen. So ist es möglich, dass der Nutzer die Reihenfolge der Umsetzungsschritte möglichst frei wählen kann. Insgesamt bildet die Wissensbasis so ein deklaratives Workflow-Modell, welches durch, als Constraints formulierte, Regeln die Einhaltung des Workflows sicherstellt. Dabei werden durch die Wissensbasis die Constraints nur auf ihre Einhaltung überprüft und nicht zur Lösung eines durch Constraints beschriebenen Problems genutzt. Dies ist zunächst die Aufgabe des Anwenders in der Projektplanung. Ein automatisches Lösen von Constraints würde eine Intransparenz schaffen, welche der These zum Lerneffekt in Abschnitt 1.3.1 und dem didaktischen Anspruch des Projekts entgegen steht.

3.2.4 Hilfesystem

Ein Hilfesystem soll dem Nutzer, abhängig vom aktuellen Kontext, passende Informationen zur Arbeit mit dem Projektwerkzeugkasten sowie zu Fertigungsverfahren und Materialien liefern. Dazu soll das Hilfesystem auf geeignete Quellen verweisen und zu dem aktuellen Kontext einen kurzen Erklärungstext liefern.

3.3 Ablauf

In diesem Beispiel wird der Ablauf eines Projekts mit Unterstützung des Projektwerkzeugkastens vorgestellt, aus dem dann die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen formuliert werden. Der Ablauf wird dabei anhand der Struktur des Projektwerkzeugkastens beschrieben. Als Szenario wird ein Projekt für Anfänger mit der Unterstützung durch ein Tutorial-Projekt gezeigt. Ziel des Projektes ist der Bau einer smarten Lampe. Es werden die notwendigen Arbeitsschritte zur Vervollständigung des Projektplans sowie der Aufbau der Werkzeugkette am Beispiel des Projektes beschrieben. Danach wird anhand der aus dem Projektplan erzeugten Umsetzungsliste die Aufgabe der Transformation beschrieben. Hierbei wird auch die Rolle der in der Wissensbasis enthaltenen Regeln für die Erstellung der Umsetzungsschritte erläutert und welchen Einfluss dies auf die selbstständige Umsetzung des Projekts hat.

Die freie Nutzung des Projektwerkzeugkastens wird anschließend, mit dem Blick auf die Nutzergruppen der Fortgeschrittenen und Experten, erläutert.

3.3.1 Projektplan eines Tutorial-Projekts

Durch die Verwendung eines Tutorial-Projekts beginnt der Nutzer mit einem Projekt, welches bereits Bauteile enthält. Abbildung 3.1 zeigt hier die Sicht auf den Projektplan,

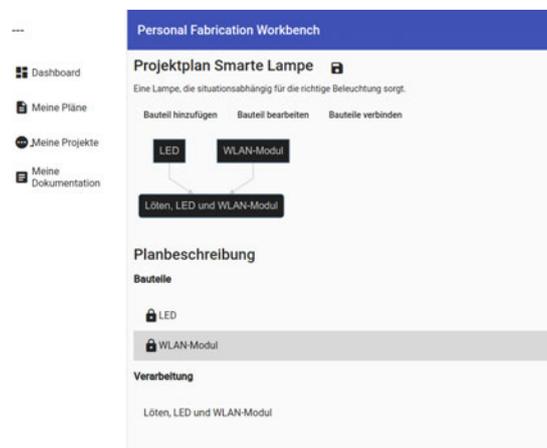
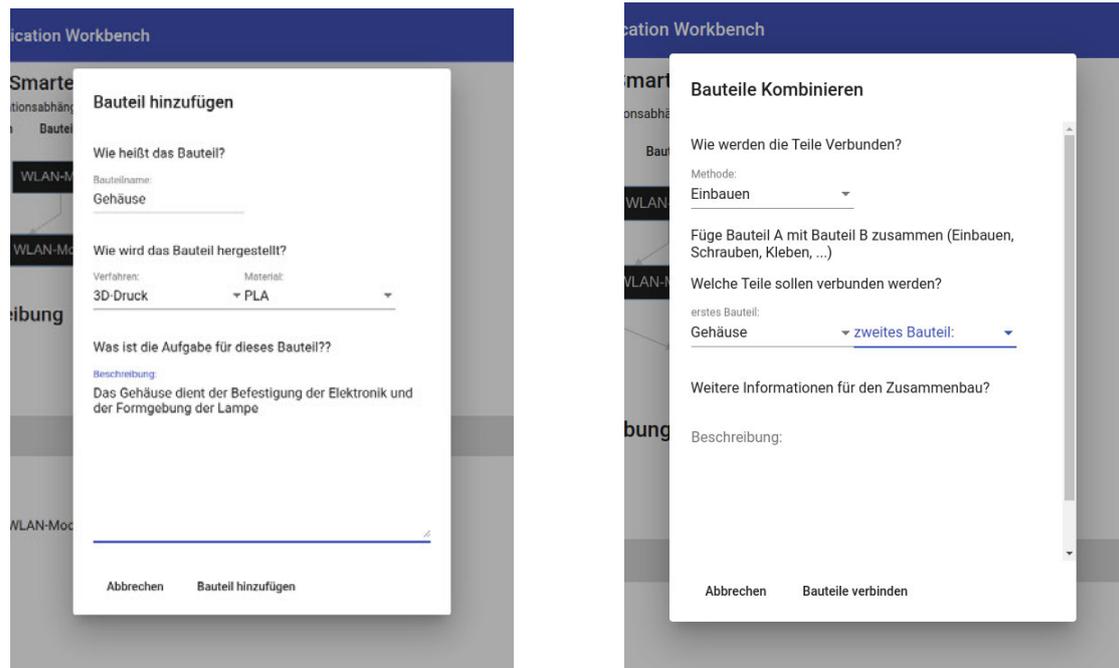


Abbildung 3.1: Projektplan mit Bauteilen

mit den vorgegebenen Bauteilen in zwei Darstellungsformen. Oben als Diagramm mit

eckigen Boxen für Bauteile und abgerundete Boxen für die Verbindung aus zwei Bauteilen. Unten wird das Projekt in zwei Listen dargestellt, die Liste der Bauteile und die Liste der Verbindungen. Das Schloss-Symbol vor den Bauteilen zeigt, dass eine Veränderung an diesem Bauteil nicht Möglich ist. Dies wurde im Tutorial-Projekt durch den Ersteller zuvor festgelegt. Das Ziel, welches durch die verwendete Vorlage vorgegeben wird, ist die Herstellung einer smarten Lampe. Beide Bauteile, ein LED-Ring und ein Mikrocontroller sind über die Verbindung Löten zu einem Composit-Bauteil zusammengesetzt.



(a) Dialog zum Anlegen eines Bauteils im Projektplan

(b) Dialog Verbindung/Bearbeitung von Bauteilen

Abbildung 3.2: Dialoge der Projektplanung

Erstellen eines neuen Bauteils Als nächster Schritt soll ein Gehäuse in den Projektplan eingefügt werden. Dazu legt der Nutzer ein neues Bauteil an. Für das Erstellen eines neuen Bauteils wird dem Nutzer ein Formular wie in Abbildung 3.2a gezeigt. Darin können der Bauteilname, das Fertigungsverfahren und Material, sowie eigene Notizen oder Bemerkungen für das Bauteil hinterlegt werden. Nach dem Anlegen des Bauteils ist dies als eigenständige Box auf dem grafischen Projektplan sowie unten in der Bauteilliste dargestellt. Durch die Vorgabe, dass ein Projekt nur ein, aus Bauteilen zusammengesetztes, Produkt erzeugen darf, also alle Bauteile miteinander verbunden sein müssen, ist

eine Umsetzung des Projektplans so noch nicht möglich. Um dieser Anforderung nachzukommen, wird als nächstes eine Verbindung zwischen der Elektronik und dem Gehäuse erstellt. Beim Anlegen einer Verbindung bietet der Projektwerkzeugkasten verschiedene Verbindungsmethoden und die im Projekt enthaltenen, für eine Verbindung zur Verfügung stehenden Bauteile an. Abbildung 3.2b zeigt den Dialog mit der ausgewählten Verbindungsmethode "Einbau" sowie dem Gehäuse als Auswahl des ersten Bauteils. Als zweites Bauteil lässt sich nun ausschließlich das Composit-Bauteil aus den Elektronikmodulen auswählen.

In beiden Fällen, Bauteilanlage und Verbindung sorgen die aus der Wissensbasis gelieferten Regeln dafür, dass der Nutzer seine Auswahl in beliebiger Reihenfolge durchführen kann. Um eine unzulässige Auswahlkombination zu verhindern, beeinflusst die Auswahl eines Feldes die jeweils anderen Felder so, dass nur die Elemente dargestellt werden, die laut den Regeln der Wissensbasis kombinierbar sind. Gleichzeitig werden auch die Elemente ausgeblendet, die in der Folge einen Deadlock in der Auswahl erzeugen können. Nach dem Verbinden des Gehäuses mit der Elektronik sieht der Projektplan nun aus wie

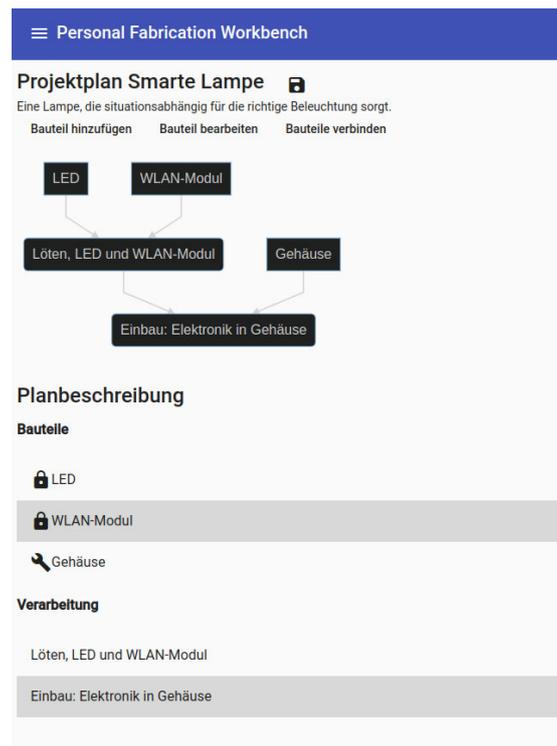


Abbildung 3.3: Vollständiger Projektplan für die Smarte Lampe

in Abbildung 3.3 gezeigt. Der Schraubenschlüssel neben dem Bauteillisteneintrag für das

Gehäuse weist darauf hin, dass eine Bearbeitung des Bauteils, im Gegensatz zu den vom Tutorial-Projekt vorgegebenen, möglich ist.

Aufbau der Werkzeugkette Eine weitere Vorgabe des Tutorial-Projekts bezieht sich auf die zu verwendende Werkzeugkette. Diese wurde für die in diesem Tutorial-Projekt verfügbaren Fertigungsmethoden 3D-Druck und Lasercutting entsprechend vorbelegt. Die Modellierung der Werkzeugkette funktioniert ähnlich wie das Anlegen eines Bauteils, jedoch wählt der Nutzer direkt die Verbindung zwischen den Werkzeugen aus. Anhand von Abbildung 3.4 lässt sich der Aufbau der Werkzeugkette erkennen. Die Werkzeuge und externe Dateien sind in Boxen mit spitzen Ecken dargestellt, die Boxen mit abgerundeten Ecken enthalten das zwischen den Werkzeugen verwendete Datenformat. Bis auf die letzte, die rechte Box lassen sich die anderen Datenformate ausblenden. Diese Box beschreibt das für die Bauteilfertigung notwendige Datenformat, welches vom ausgewählten Fertigungsverfahren abhängt. In diesem Fall ist es ein G-Code-Format für 3D-Drucker. Das Werkzeug links des G-Codes muss dieses Format ausgeben können. Die Werkzeugkette enthält an dieser Stelle eine sogenannte Slicer, welche verschiedene 3D-Modellformate unter anderem *STL-Dateien* unterstützt. Das Vorgängerwerkzeug in diesem Fall OpenSCAD erfüllt die Aufgabe und würde ohne seine Vorgänger bereits eine valide Werkzeugkette bilden. In diesem Fall werden noch zwei externe Dateien mit den Modellen des LED-Rings und Mikrocontroller in der Werkzeugkette benannt, die bei der Modellierung der Lampe unterstützen.

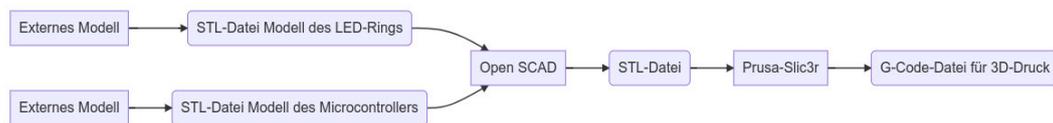


Abbildung 3.4: Einfache Werkzeugkette für den 3D-Druck mit Hilfsmodellen

Der Projektplan ist nun vollständig beschrieben. Es gibt also keine unerfüllten Abhängigkeiten in einer Werkzeugkette oder losen Bauteile im Projekt, welche nicht in das Produkt integriert wurden. Wird dieser Zustand festgestellt, kann der Nutzer mit der Umsetzung des Projekts beginnen.

Den Projektplan umsetzen Um einen Projektplan in die Umsetzungsphase zu bringen kann entweder aus dem Projekt oder aus der Projektliste heraus die Erzeugung der

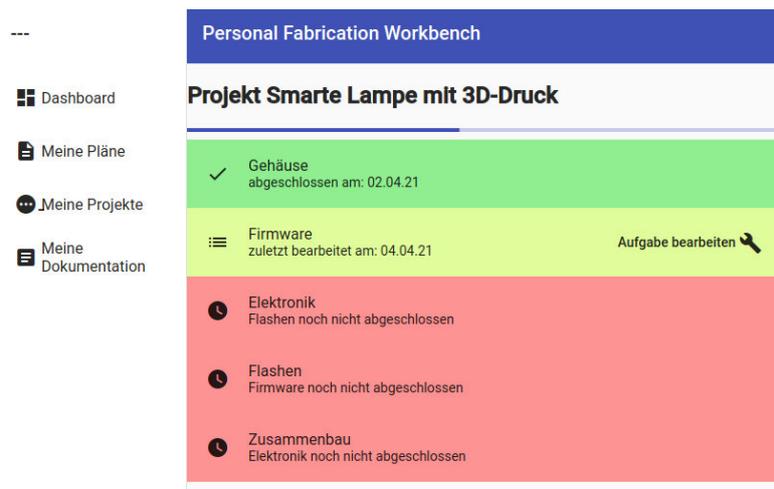


Abbildung 3.5: Auszug der Aufgabenliste in der Projektumsetzung

Aufgabenliste gestartet werden. Der Projektplan wird dann mittels der in durch die Wissensbasis festgelegten Regeln in Aufgaben zerlegt. Diese enthalten die Beschreibung des konkreten Arbeitsschritts, sowie Annotationen bezüglich ihrer Abhängigkeiten von vorher zu erledigenden Aufgaben. Die in Abbildung 3.5 gezeigte Liste zeigt die abgeschlossenen und noch zu bearbeitenden Schritte (farblich gekennzeichnet). Grüne Aufgabe sind als erledigt markiert. Gelbe Einträge lassen sich aktuell umsetzen und rote Listenelemente haben Abhängigkeiten, die zuvor erfüllt werden müssen. Wird eine Aufgabe aufgerufen, so zeigt der Projektwerkzeugkasten die Details zu der Aufgabe an. Dies sind die Aufgabenbeschreibung, die Zusammenhänge im Projektkontext, die in der Projektplanung erstellten Notizen zum Bauteil und die Verbindungen zu anderen Aufgaben. Zusätzlich ist eine Hilfesystem vorgesehen, welches auf die im Aufgabenkontext passende Information verweist. Der Nutzer beginnt mit der Aufgabenliste: zunächst werden die Bauteile digital modelliert, danach gefertigt und anschließend das Produkt zusammengesetzt. Dabei wird jeder Arbeitsschritt, den der Nutzer ausführt, durch die Umsetzungsschritte und die darin zusammengefassten Informationen und Hinweise begleitet.

3.3.2 Nutzung durch erfahrene Nutzer

Das zuvor in 3.3.1 gezeigte Vorgehen ist durch das Tutorial-Projekt stark eingeschränkt um einen Anfänger zunächst durch einen leichten Einstieg an die Umsetzung von PF-Projekten heranzuführen. Dieses Vorgehen ist für erfahrenere Nutzer hinderlich, da sie sowohl den Umgang mit dem Werkzeugkasten, als auch entsprechendes Wissen durch die

Umsetzung ihrer Projekte erreicht haben. Daher besteht die Möglichkeit für erfahrene Nutzer die einschränkende Festlegung von Parametern zu übergehen. Bei der Anwendung eines Tutorial-Projekts kann der Nutzer dann wählen, ob das Projekt mit oder ohne festgelegte Parameter erstellt werden soll.

Unabhängig von den Tutorial-Projekten, kann auch mit einem leeren Projekt begonnen werden. Der Nutzer wird dann lediglich durch das Regelwerk der Wissensbasis und Informationen des Hilfesystems unterstützt. Auch frei geplante Projekte können so in eine Umsetzungsphase mit vollständiger Aufgabenlist überführt werden.

3.4 Nutzerinteraktion

Dieser Abschnitt beschreibt die Nutzerinteraktionen, welche die im vorherigen, den Ablauf beschreibenden, Abschnitt 3.3 gezeigt wurden. Die notwendigen Interaktionen lassen sich für jedes Element des Projektwerkzeugkastens in den drei Gruppen: *Anlegen*, *Bearbeiten* und *Entfernen* zuordnen. Beim Anlegen wird das betreffende Element mit den minimal notwendigen Parametern, wie einer Möglichkeit zur Referenzierung erzeugt und in dem Projektplan hinzugefügt. Das Entfernen bewirkt das Gegenteil zum Anlegen, indem das konkrete Element aus dem Projektplan entfernt, bzw. als solches markiert wird. Die weiteren Aktionen, wie die Auswahl des Fertigungsprozess für ein Bauteil, werden als Bearbeiten bezeichnet.

3.5 Funktionale Anforderung

Der Projektwerkzeugkasten realisiert eine Projektplanung und unterstützt die Projektumsetzung durch eine mittels einer Wissensbasis geführten Modellierung und anschließender Transformation des Projektplans in eine annotierte Liste von Aufgaben. Dazu werden Elemente modelliert, mit denen das Projekt zunächst abstrakt beschrieben wird. Der Nutzer kann mit den Elementen durch die Operationen *Anlegen*, *Bearbeiten* und *Entfernen* interagieren. Das als Projektziel so beschriebene Produkt besteht aus einer Menge von Bauteilen, die durch geeignete Verfahren miteinander verbunden werden. Jedes Bauteil besteht aus einem Material, welches durch ein Fertigungsverfahren bearbeitet wurde. Die dafür notwendigen Fertigungsdaten werden durch die in einer Werkzeugkette festgelegten digitalen Werkzeuge erstellt.

Die unterstützende Wirkung des Projektwerkzeugkastens wird durch eine Wissensbasis und die Führung mittels Tutorial-Projekt erreicht. Die fachliche Korrektheit des Projekts sowie die theoretische Durchführbarkeit des Projektplans wird durch die Wissensbasis sichergestellt. Mittels der Tutorial-Projekte können Einsteiger explorativ den Umgang mit dem Projektwerkzeugkasten und die Anwendung verschiedener PF-Fertigungsverfahren erlernen. Eine Unterstützung durch ein kontextabhängiges Hilfesystem, mit Verweisen auf digitale Informationsquellen, durch ein entsprechendes Konzept vorgesehen werden.

3.6 Nicht Funktionale Anforderungen

Da der Projektwerkzeugkasten für den Einsatz in Schulen und außerschulischen Bildungseinrichtungen konzipiert ist, soll der Einsatz unabhängig von den Vorhandenen IT-Systemen und deren Konfiguration möglich sein. Zusätzlich muss eine zentrale Administration die Anpassung an die verfügbaren Materialien, Fertigungsverfahren und digitalen Werkzeuge sowie Erweiterungen der Wissensbasis und des Hilfesystems ermöglichen. Da Schüler einer weiterführenden Schule in der Regel den Umgang mit Smartphone und Tablett beherrschen, eignet sich hierfür besonders die Architektur der Webapplikation, da diese Geräteunabhängig, mittels eines Browsers, genutzt werden kann.

3.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an den Projektwerkzeugkasten beschrieben. Dazu wurden in Abschnitt 3.1 zunächst die relevanten Nutzergruppen und ihre Rollen beschrieben. Die Strukturanalyse beginnend im Abschnitt 3.2 zeigt wie der Projektwerkzeugkasten ein PF-Projekt abbildet.

Die in Abschnitt 3.2.1 gezeigten Elemente repräsentieren den Projektplan, der sich in die physische Anteile Material, Fertigungsverfahren, Bauteil sowie Verbindungen und in den virtuellen Teil der Modellierung, bestehend aus digitalen Werkzeugen und Werkzeugketten, gliedert. Mit den Projektphasen wurde in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, wie zunächst eine abstrakte Projektbeschreibung erfolgt, aus der anschließend eine Liste von Aufgaben für die Umsetzung des Projekts erstellt wird. Um den Projektplan zu bearbeiten, werden Nutzerinteraktionen realisiert, die das *Anlegen*, *Bearbeiten* und *Entfernen* von Elementen im Projektplan ermöglichen. Die Projektbeschreibung durch den Projektplan wurde

dabei als geeignete Basisstruktur zur Beschreibung der Tutorial-Projekte gewählt und die notwendigen Erweiterungen benannt. Für den Abschluss der Projektplanungsphase wurde außerdem eine Prüfung des Projekts auf *Produzierbarkeit* und *Modellierbarkeit* des Projektplans durch die Wissensbasis festgelegt. In der nachfolgenden Umsetzungsphase wird der Nutzer in der Modellierung und Produktion der Bauteile begleitet. Dazu wird eine Aufgabenliste durch die in der Wissensbasis formulierten Regeln erzeugt. Anschließend wurde das Konzept der Wissensbasis untersucht. Diese bildet eine Sammlung von Constraints und überwacht gleichzeitig deren Erfüllung im gesamten Projektverlauf.

Nach der Definition der Struktur des Projektwerkzeugkastens wurde gezeigt, wie ein Einsteiger den Werkzeugkasten, mit Unterstützung durch ein Tutorial-Projekt, anwendet. Die Unterschiede zur Nutzung durch einen erfahreneren Anwender zeigen anschließend, dass weiterhin die Unterstützung durch die Wissensbasis bei der Projektplanung hilft, jedoch bezüglich des Projekts keine weiteren Einschränkungen erfolgen. Dadurch kann der Projektwerkzeugkasten alle Arbeitshypothesen im Bezug auf die hier gestellten Anforderungen erfüllen.

Anschließend wurden die in diesem Kapitels erarbeiteten Ergebnisse in den Abschnitten 3.5 als funktionale und 3.6 nicht-funktionalen Anforderungen zusammengefasst.

4 Konzeption und Umsetzung

Dieses Kapitel veranschaulicht wie die in Kapitel 3 entwickelten Anforderungen an den Projektwerkzeugkasten realisiert wurden. Abschnitt 4.1 zeigt zunächst wie das Datenmodell für ein Bauteil aufgebaut ist. Daraus wird eine Struktur zur Abbildung eines PF-Projekts erarbeitet und wie sich daraus Projektpläne und *Tutorial-Projekte* ableiten lassen. Abschnitt 4.3 beschreibt die Modellierung der Wissensbasis, welche die zentrale Aufgaben im Projektwerkzeugkasten übernimmt. Zu diesen zählen unter anderem die Sicherstellung der *Produzierbarkeit* und *Modellierbarkeit* sowie die Erzeugung der Umsetzungsliste durch das constraint-basierte Regelsystem. In Abschnitt 4.4 wird dann das Konzept des kontextabhängigen Hilfesystems veranschaulicht. Zuletzt wird in Abschnitt 4.5 die Systemarchitektur vorgestellt.

4.1 Projekt und Tutorial Projekt

Als Ergebnis der Anforderungsanalyse in Kapitel 3 ist bekannt, dass ein PF-Projekt das Ziel der Produktion eines Produkts beschreibt. In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie die Eigenschaften des Bauteils im Projektwerkzeugkasten modelliert wurden und wie sich daraus die Strukturen für das Projekt und dessen Erweiterung zu Tutorial-Projekt ergibt. Anschließend wird das Modell der Umsetzungsliste erklärt, welches bei der Transformation des Projektplans in die Umsetzungsphase mit Hilfe der Wissensbasis generiert wird.

4.1.1 Bauteil

Entsprechend der Ergebnisse der Anforderungsanalyse besteht ein Bauteil des Projektwerkzeugkastens aus je einem *Material*, einem *Fertigungsverfahren* und einer *Werkzeug-*

kette. Wie in Abbildung 4.1¹ aufgezeigt, kann die Werkzeugkette als Baumstruktur mit konkreten Werkzeugen und Ausgabeformaten realisiert werden. Dazu dient ein Knotenobjekt *ToolNode*, welches die jeweiligen Werkzeuge, das gewünschte Ausgabeformat und die Referenz auf mögliche Vorgängerknoten enthält. Wie in der Anforderungsanalyse gefordert, bietet diese Modellierung eine flexible Möglichkeit, um jede Kombination von Materialien, Fertigungsverfahren und Werkzeugketten dazustellen. Dabei bleibt die Form des Bauteils sowie weitere Abhängigkeiten logisch wie physisch abstrakt. Die physische Ausgestaltung des Bauteils behält diese abstrakte Beschreibung bis es in der Projektumsetzung konkret modelliert und anschließend produziert wird.

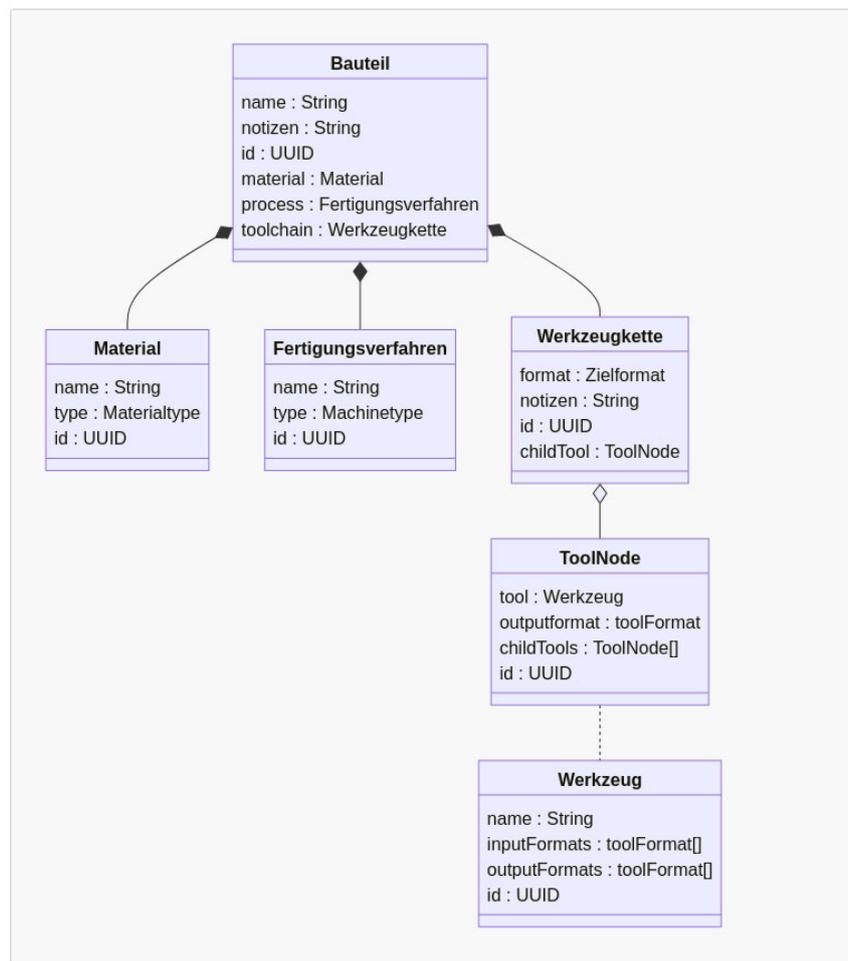


Abbildung 4.1: Klassendiagramme zur Modellierung des Bauteils

¹Für die in den Klassendiagrammen dargestellten Datentypen wurde die in TypeScript übliche Notation der Form "Feldname:Datentyp" verwendet. Eine Array eines Datentyps wird durch [] angezeigt

4.1.2 Projekt

Damit der Projektwerkzeugkasten die physischen und logischen Abhängigkeiten des Bauteils innerhalb des Projekts abbilden kann, muss das Bauteil in den Kontext des Gesamtprojekts eingeordnet werden. Dies geschieht über Verbindungen, welche einen sowohl physischen als auch logischen Verbund darstellen. Der physische Zusammenhang entsteht durch die Beschreibung, welche Bauteile miteinander verbunden werden. Dazu dient die in Abbildung 4.2 gezeigte Struktur *Verbindung*. Weiterhin zeigt die Abbildung, dass ein

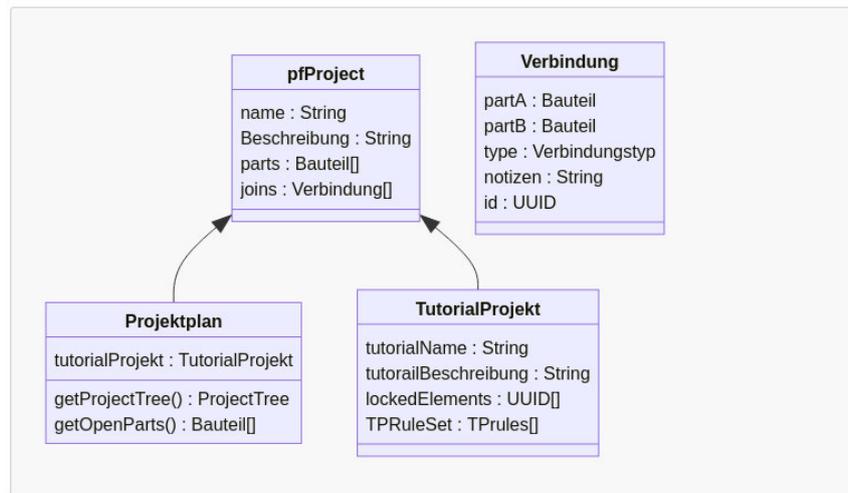


Abbildung 4.2: Klassendiagramm zur Modellierung des Projekts

allgemeines PF-Projekt aus einem Projektnamen, einer Beschreibung, sowie Listen von Bauteilen und Verbindungen besteht. Diese Implementierung ermöglicht nun, dass die Bauteile wie auch die Verbindungen in loser Kopplung, zu verwenden. Dies erfordert gleichzeitig eine Prüfung durch die, in der *Wissensbasis* hinterlegten, Regeln auf *Produzierbarkeit* und *Modellierbarkeit*, da diese durch die verwendete Datenstruktur nicht abgebildet wird. Ein konkreter Projektplan wird aus der Klasse *PfProject* abgeleitet und implementiert zusätzliche Methoden wie im Klassendiagramm dargestellt. Diese berechnen verschiedene Eigenschaften des *Projektplans*, wie zum Beispiel die Repräsentation des gesamten Plans als Baumstruktur (siehe Abbildung 4.5) oder geben Auskunft über nicht verbundene Bauteile.

Tutorial-Projekt

Ein Tutorial-Projekt dient dagegen nur als Vorlage und erweitert, neben Feldern für die textuelle Beschreibung des Tutorials, das Objekt im Wesentlichen um eine Liste (lockedElements), die das Sperren einzelner Elemente beschreibt sowie einen Regelsatz (tpRuleSet) für Vorbelegungen. Diese Regeln ermöglichen auf unterschiedliche Aktionen des Nutzers in der Projektplanung zu reagieren, wie die automatische Übernahme einer vordefinierten Werkzeugkette bei der Erstellung von Bauteilen mit einem bestimmten Fertigungsverfahren.

4.1.3 Umsetzungsliste

Für die Modellierung der Umsetzungsliste wird eine Sammlung von Umsetzungsschritten benötigt. Diese enthalten eine kurze sowie eine ausführliche Beschreibung der Aufgabe. Zusätzlich wird eine Referenz benötigt, die auf den zugehörigen Projektplan und dessen

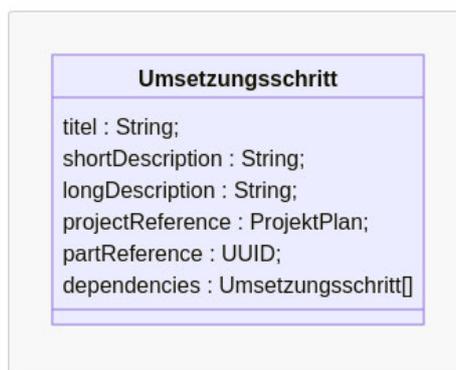


Abbildung 4.3: Ein Umsetzungsschritt enthält Texte und Referenzen zu den Abhängigkeiten sowie dem Ursprung im Projektplan

Element, aus dem die Aufgabe erstellt wurde, verweist. In Abbildung 4.3 zeigt zudem eine Liste von Referenzen zu Umsetzungsschritten, welche vor der Umsetzung durch den Nutzer erfüllt sein müssen. Dadurch ergibt sich, dass eine Umsetzungsliste vom Nutzer in beliebiger Reihenfolge bearbeitet werden kann, unter der Einschränkung, dass die vorausgehenden Abhängigkeiten erfüllt worden sind.

4.2 Nutzerinteraktion

Die in der Anforderungen benannten Nutzerinteraktionen *Anlegen*, *Bearbeiten* und *Entfernen* erlauben dem Benutzer durch die Anwendung den Projektplan zu bearbeiten. Anhand des Projektplans lässt sich die Auswirkung dieser Aktionen am Beispiel eines Bauteils zeigen. Das *Anlegen* bewirkt die Instanziierung eines Bauteils (siehe Abbildung 4.1) und die Befüllung mit einer eindeutige Referenznummer (id). Anschließend wird das so erstellte Objekt im Projektplan (siehe Abbildung 4.2) in der Bauteilliste (parts) referenziert. Zum *Bearbeiten* des Bauteils werden ein oder mehrere Werte der Datenfelder geändert. Um die Operation *Entfernen* realisieren zu können, muss neben dem löschen des zu entfernenden Elements mit den dadurch betroffenen Referenzen sowohl von als auch auf dieses Element umgegangen werden. Das Verfahren hängt dabei von dem betreffenden Typ des Elements ab. Eine Verbindung zweier Bauteile kann problemlos gelöscht werden. Wenn diese Verbindung von einem anderen Verbindungselement referenziert wird, muss lediglich die Referenz auf das zu löschende Element zurückgesetzt werden. Anders sieht es bei konkreten Bauteilen mit Werkzeugkette aus. Hierbei kommt es zu einer Weiterleitung, die auch das *Entfernen* anderer Elemente bewirkt.

4.3 Wissensbasis

Die Kernaufgabe des Projektwerkzeugkastens, bei der Planung und Durchführung von PF-Projekten zu unterstützen, benötigt, neben dem flexiblen Modell, eine geeignete Struktur, um die Anwendbarkeit, der aus dem Projektplan generierten Umsetzungsliste, garantieren zu können. In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie die *Wissensbasis* sowohl die Korrektheit der flexiblen Datenstruktur als auch das in Kapitel 2.3 geforderte deklarative Modell zum Betrieb des Projektwerkzeugkastens abbildet. Die *Wissensbasis* besteht wie in Abbildung 4.4 gezeigten drei verschiedene Regelsätze (PartRuleSet, ToolRuleSet und TransformRuleSet). Diese haben zwei konkrete Aufgaben. Die erste Aufgabe besteht darin Operationen des Nutzers auf dem Projektplan zu prüfen, um so die *Produzierbarkeit* und *Modellierbarkeit* sicherzustellen. Zu den Operationen gehören das Erstellen, Bearbeiten und Löschen von Bauteilen und Verbindungen sowie die Bearbeitung der Werkzeugkette. Um dem Nutzer zu Unterstützen werden nicht durchführbare Operationen in der Benutzeroberfläche zum Beispiel durch die Deaktivierung einer Schaltfläche. Hierzu liefert die *Wissensbasis* alle auf einem Element des Projektplans durchführba-

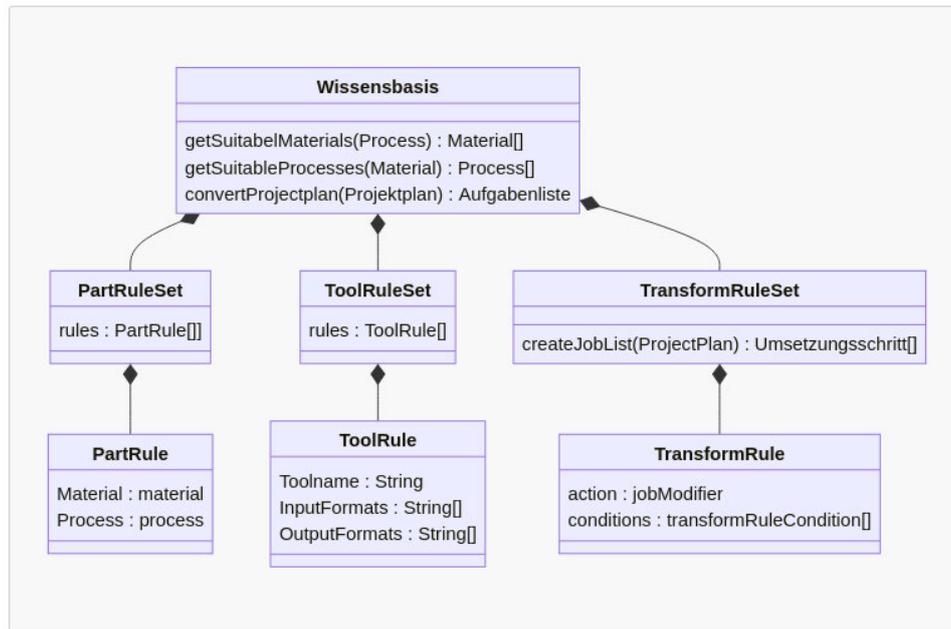


Abbildung 4.4: Klassendiagramm der Wissensbasis mit den drei Regelsystemen

ren Operationen. Die zweite Aufgabe stellt die Transformation des Projektplans in die Umsetzungsliste dar.

4.3.1 Produzierbarkeit

Fertigungsverfahren und Material stellen gegenseitige Anforderungen, damit ein Bauteil produziert werden kann. Daher enthält die *Wissensbasis* eine Sammlung an Regeln, welche die Kombinierbarkeit der Materialien und Werkzeuge gewährleistet. Der Regelsatz lässt sich vereinfacht als eine Matrix aus Verfahren in den Zeilen und Materialien in den Spalten verstehen. Lassen sich die beiden Elemente miteinander kombinieren, so steht in der zugehörigen Zelle der Wert 1. ist die Verwendung ausgeschlossen, so wird eine 0 eingetragen. Sind für die Kombination Abhängigkeiten zu prüfen, so kann eine Referenz auf eine Funktion, welche die Bedingung prüft, verwendet werden. Je nach Funktionsergebnis wird dann die Kombination zugelassen oder abgelehnt. Diese Eigenschaft wurde mit Blick auf die in Kapitel 2.1 analysierten Quellen konzipiert, um den Projektwerk-

zeugkasten in der Struktur auch für kommende Material- und Verfahrenskombinationen erweiterbar zu machen.

4.3.2 Modellierbarkeit

Abhängig vom gewählten Fertigungsverfahren muss eine Werkzeugkette so aufgebaut sein, dass nach Durchführung aller Arbeitsschritte ein geeignetes Ergebnis erzielt wird. Die Analyse gängiger PF-Werkzeuge (siehe A.1) ergab, dass die Modellierung der Werkzeugketten unabhängig vom verwendeten Fertigungsverfahren, zunächst flexibel sein muss. Dabei ist die Flexibilität lediglich durch die Schnittstellen zwischen den Werkzeugen beschränkt. Ein Werkzeug kann dabei in der Anzahl der eingehenden Verbindungen eingeschränkt sein. Dies ist im Fall von Konvertern und Finishern der Fall, da diese nur ein Modell laden und verändert abspeichern. Dadurch ergeben sich für die Prüfung eines Elementes in der Werkzeugkette, ob die Anzahl und das Format der eingehenden Verbindungen mit den möglichen Ausgabeformaten kompatibel ist. Falls mehrere Formate passend sind, wird das Format durch das Folgewerkzeug bestimmt.

4.3.3 Transformation

Die Transformation bildet den entscheidenden Mehrwert des Projektwerkzeugkastens. Durch die Erstellung einer annotierten Aufgabenliste aus dem abstrakten Projektplan wird, wie in den vorherigen Kapiteln betont, der Nutzer beim Umsetzen des Projekts strukturiert angeleitet. Der Projektwerkzeugkasten sieht dazu vor, dass aus jedem Element des Projektplans mindestens eine Aufgabe erzeugt wird. Durch die Regeln für die Transformation kann, abhängig vom Element, seinen Einstellungen und Verbindungen die Erstellung einer Aufgabe verändert werden. Eine Regel kann festlegen, ob eine Abhängigkeit zu einer Vorgängeraufgabe bestehen soll, ob eine zusätzliche Aufgabe erstellt werden muss oder ob eine Aufgabe entfallen kann.

In Abbildung 4.5, welche sich aus der Projektstruktur des in Abschnitt 3.3.1 umgesetzten Projekts ergibt, lässt sich die Gesamtstruktur aus den Bauteilen, Verbindungen und resultierenden Kompositen sowie den Werkzeugketten erkennen. Dieser Baum entsteht durch das Anhängen der Werkzeugketten an die Bauteile, welche im Projektplan durch die Verbindungen bereits einen Baum zur Beschreibung des Produkts bilden müssen. Für die Anwendung der Regeln zur Erstellung der Aufgaben wird der so entstandene

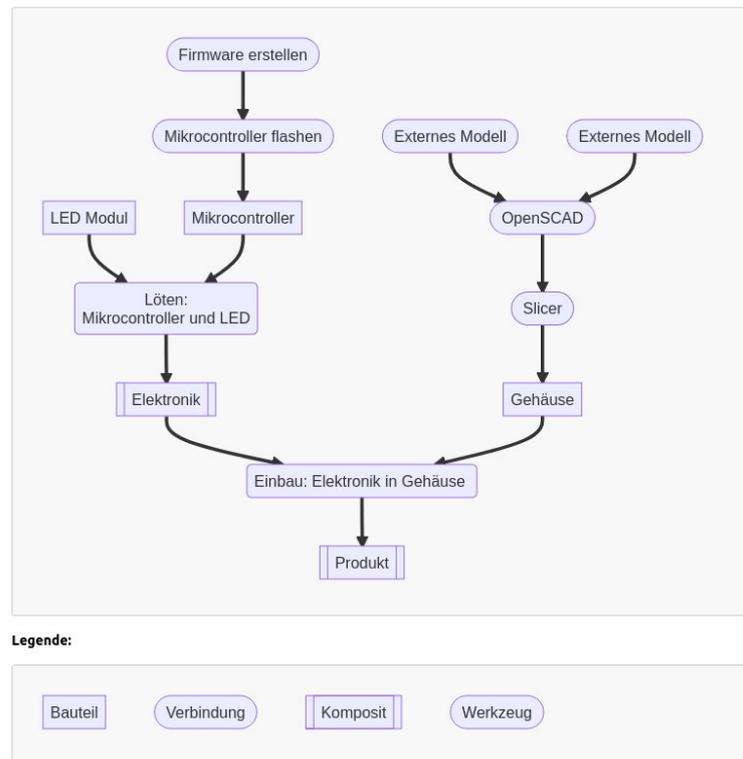


Abbildung 4.5: Baummodell eines Projektplans

Baum von der Wurzel aus (das geplante Produkt) rekursiv durchlaufen. Die Referenzen zur Abhängigkeit werden zuletzt an die Aufgaben gebunden. Dabei können Referenzen beim durch eine Regel bedingten Entfallen einer Aufgabe an deren Vorgänger verschoben werden.

4.3.4 Erweiterbarkeit

Die Rolle der *Lehrkraft* stellt die Anforderung nach leichter Erweiterbarkeit an die Wissensbasis. Des weiteren soll diese Arbeit auch durch Nicht-Experten durchgeführt werden, wodurch eine programmatische Lösung nicht zielführend wäre. Stattdessen wurde bei der Umsetzung des Projektwerkzeugkastens ein Administrationsbereich geplant, der die erweiterbaren Elemente (*Material*, *Fertigungsverfahren* und *Werkzeug*) jeweils tabellarisch darstellt. In Abbildung 4.6 ist die Darstellung als Konzept für die Benutzeroberfläche zur Administration der Regeln abgebildet. Es zeigt die Sicht auf die Liste der Werkzeuge als Tabelle oben und darunter die zu dem ausgewählten Werkzeug erstellten Regeln ebenfalls

Werkzeug	Input	Output	Regeln
OpenScad			
FreeCad			
Inkscape			
...			
Meshmixer			onlyOneInput, Transformation

Regelsatz für das Werkzeug Meshmixer

Regelname	Kontext	Bedingung	Operation
onlyOneInput	Modell	InputNumberMax(1)	Block 
Transformation	Transform	SetJobParameters	Aufgabenbeschreibung... 

Abbildung 4.6: Konzept für die Benutzeroberfläche zur Administration der Wissensbasis

tabellarisch. Aufgrund des zu erwartenden Umfangs der Realisierung des vollständigen Administrationssystems, wurde auf dessen Umsetzung zugunsten des Kernthemas des Projektwerkzeugkastens verzichtet. Das in der Konzeption entstandene Datenmodell für die Regeln wird im Projektwerkzeugkasten für die *Produzierbarkeit*, *Modellierbarkeit* und *Transformation* genutzt.

4.4 Hilfesystem

Für das Hilfesystem wurde in dieser Arbeit ein Konzept zur Steuerung des Inhalts entwickelt. Der Kontext für das Hilfesystem wird als Aggregation aus der aktuellen Ansicht im Projektwerkzeugkasten und den darin enthaltenen Elementen gebildet. In Abbildung 4.7 ist ein Entwurf dargestellt, der die unterschiedlichen Domänen des Projekts zusammenführt. Der Anzeigekontext bestimmt dann passende Inhalte zur Anzeige im Hilfesystem.

4.5 Systemarchitektur

Für die Architektur des Projektwerkzeugkastens bietet sich eine Webapplikation aus verschiedenen Gründen an. Die Anforderungsanalyse ergab dazu diverse Vorteile bezogen

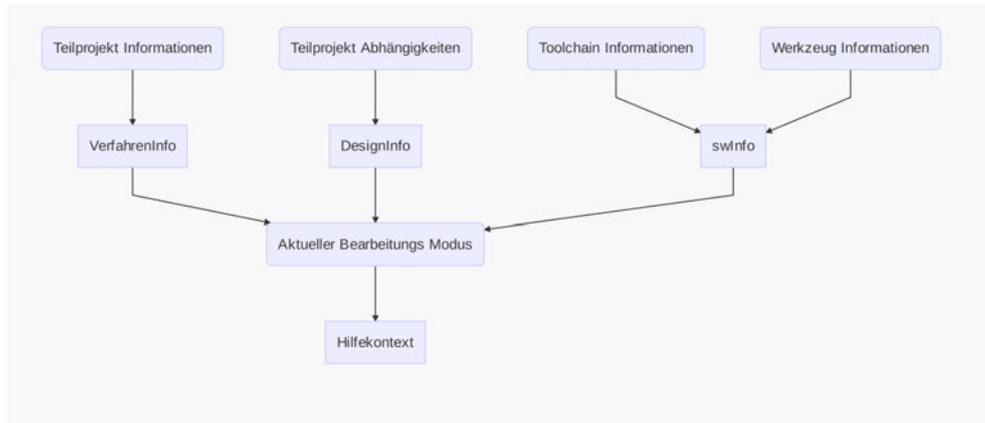


Abbildung 4.7: Konzept für den Kontextgenerator des Hilfesystems

auf das geplante Einsatzgebiet der Software im Schulumfeld. Für den Einsatz des Projektwerkzeugkastens im Rahmen des digitalen Unterrichts ergeben sich verschiedene Vorteile. Dazu zählen die Unabhängigkeit vom genutzten Endgerät, die zentrale Verwaltung und Wartung durch die *Lehrkraft* und die Möglichkeit die Anwendung ortsunabhängig nutzen

Der Projektwerkzeugkasten wurde als Webapplikation mit einer Single-Page-Application als Fat-Client-Frontend und einem NodeJS basierten Backend realisiert wurde. Der Server des Backends wird durch das Framework ExpressJS realisiert. Das Backend dient dabei der Auslieferung des Frontends, als Storage für das Laden und Speichern von Projekten sowie als API für den Projektwerkzeugkasten. Diese API beschränkt sich für den realisierten Prototypen auf die Auslieferung der Regel-, Material- und Verfahrenslisten. Die Umsetzung der Logik und Darstellung der Applikation wird durch das Frontend mittels des Angular-Frameworks erreicht.

4.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde gezeigt, wie die Anforderungen aus Kapitel 3 für eine Umsetzung in einem Prototypen sind. Dazu wurde der Fokus auf die zentralen Strukturen des Projektwerkzeugkastens gelegt. In Abschnitt 4.1 wurde die Datenstruktur, welche die Projekte abbildet, beschrieben. Als primäre Anforderung stand dabei die Flexibilität des Modells für Bauteile in Abschnitt 4.1.1 im Vordergrund. Anschließend wurde gezeigt, wie das Konzept des Projektplans umgesetzt wurde. Dazu ist in Abschnitt 4.1.2

ein Abstraktes Projekt mit dessen Aufgabe, die Bauteile und Verbindungen abzubilden, beschrieben worden. Der Abschnitt 4.3.4 hat das Konzept zur Realisierung einer einfach zu nutzenden Benutzeroberfläche gezeigt, die Erweiterung der Wissensbasis erlaubt. Damit wurden die Anforderungen aus Kapitel 3.5 bezüglich der flexiblen Modellierung und leichten Erweiterbarkeit des Modells erfüllt. Abschnitt 4.1.2 ging dabei speziell auf die Erweiterung als Tutorial-Projekt ein, welches für die Unterstützung der Einsteiger eine zentrale Rolle spielt. Anschließend wurde das Modell für die Umsetzungsliste in Abschnitt 4.1.3 vorgestellt. Die Unterstützung zur Umsetzung von PF-Projekten durch den Werkzeugkasten ist das Thema des Abschnitts 4.3, welcher die Wissensbasis genauer betrachtet. Neben der Realisierung nach der geforderten Sicherstellung von *Produzierbarkeit* und *Modellierbarkeit* ist die Transformation des Projektplans in eine Umsetzungsliste ein wichtiges Modul des Projektwerkzeugkastens, da es wie in Abschnitt 4.3.3 gezeigt, den Schritt vom abstrakten Projektplan zur Produktion unterstützt. Dadurch erfüllt der Projektwerkzeugkasten die Thesen *Einsteigerproblem*, *Lernzuwachs*, *Flexibilität* und *Werkzeugkombination* in Kapitel 1.3.1

Darauf folgend wurde das Konzept für das Hilfesystem anhand einer Abbildung im Abschnitt 4.4 erläutert. Abschließend wurde die Architektur des für diese Arbeit umgesetzten Prototyps aus Abschnitt 4.5 gezeigt. Der Fokus für die Architektur liegt dabei auf dem geplanten Einsatz der Software im Rahmen des digitalen Unterrichts.

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde untersucht, wie der Projektwerkzeugkasten bei der Umsetzung von PF-Projekten unterstützen kann. Dazu wurden im Kapitel 1 zunächst vier Thesen benannt, welche die Probleme benennen, die der Projektwerkzeugkasten zu lösen versucht. Das folgende Kapitel 2 ordnete diese Arbeit in den Kontext der aktuellen Forschung im Bereich Personal Fabrication sowie der Didaktik digitaler Lernformate und Workflowmodellierung ein. Die Anforderungsanalyse in Kapitel 3 gab den Rahmen der Untersuchung durch die funktionalen Anforderungen an den Projektwerkzeugkasten vor. Im anschließenden Kapitel 4 wurden die realisierten Konzepte und deren zentrale Modelle diskutiert. Dabei wurde gezeigt, wie der Projektwerkzeugkasten die zuvor dargestellten Anforderungen bezüglich Flexibilität und Erweiterbarkeit umsetzt. Ebenso wurde anhand der unterstützenden Funktion des *Tutorial-Projektplans* im Abschnitt 3.3 die Eignung zur Verwendung durch *Einsteiger* dargestellt.

5.1 Fazit

Das Ziel der Untersuchung, mit dem Projektwerkzeugkasten eine flexible und erweiterbare Unterstützung in der Umsetzung von Themen im Bereich von Personal Fabrication zu schaffen war erfolgreich.

Umgesetzte Anforderungen Der Projektwerkzeugkasten erfüllt als Prototyp die in dieser Arbeit untersuchten Eigenschaften als digitales Lernsystem für Einsteiger und als Planungswerkzeug für Fortgeschrittene Anwender. Dabei ist die Lösung auf das Kernsystem zur Projektplanung und Erstellung der Aufgabenlisten für die Projektumsetzung fokussiert. Dennoch wurde bei der Umsetzung des Prototyps darauf geachtet, dass die geforderte leichte Erweiterbarkeit durch die Wahl der Datenstrukturen und Modelle auf

der technischen Ebene bereits abgebildet wird. Weiterhin ermöglicht das Modell die Umsetzung beliebiger PF-Projekte. Der Projektwerkzeugkasten erfüllt damit die eingangs aufgestellten Arbeitshypothesen aus Kapite 1.3.1.

offene Punkte Durch die Realisierung als Prototyp ist die Anwendung auf wesentlichen Aspekte der Funktion fokussiert. Neben einer Nutzerverwaltung und Authentifizierung wurde auf die Umsetzung des Hilfesystems verzichtet, da dieses für die zu zeigende Funktion des Projektwerkzeugkastens keine nennenswerte Relevanz hat. Ebenso wurden die *Tutorial-Projekte* zwar implementiert, aber die Erstellung wird nicht mit einem Benutzerinterface unterstützt.

5.2 Ausblick

Der Projektwerkzeugkasten ist ein vertikaler Prototyp welcher lediglich die zu überprüfenden Kernkonzepte umsetzt. Weitere Entwicklungen lassen sich in die Themen Benutzeroberfläche und Fachliche Erweiterungen gruppieren.

Benutzeroberfläche Wie in den offenen Punkten benannt, benötigt der Projektwerkzeugkasten als Webapplikation eine Form der Nutzerverwaltung, sowie eine Benutzeroberfläche für die administrativen Aufgaben durch die Lehrkraft. Darüber hinaus sind verschiedene Module wie eine Dateiverwaltung in der Umsetzungsphase denkbar.

Die Notizen, welche an den Elementen vom Benutzer hinterlegt werden können, reichern derzeit nur die Aufgaben der Umsetzungsliste an. Aus den Notizen in Kombination mit einer Dateiverwaltung ermöglicht dem Benutzer eine Dokumentation des gesamten Projekts, von der Planung bis zum fertigen Produkt.

Die Bedienung betreffend sollte auch über die Erweiterung der Projektplanung zu einer Bedienung mittels Drag und Drop nachgedacht werden, welche vor allem den Nutzern mobiler Endgeräte eine geeignete Interaktion ermöglicht.

Fachliche Erweiterung Im Bereich der fachlichen Erweiterungen bietet sich eine Erweiterung des Projektwerkzeugkastens bei der Bearbeitung der Wissensbasis durch zum Beispiel Modell-Checking an. Dies könnte durch entsprechende Petri-Netze oder andere formale Beschreibungen realisiert werden.

Das Modell des Projektplans ist derzeit gezielt einfach strukturiert, da so die Modellierung und das Verständnis der Zusammenhänge für Einsteiger leichter verständlich wird. Dennoch bietet es sich an vor allem zur Unterstützung großer Projekte das Modell des Projektplans um Elemente wie Mehrfachverbindungen, zur Kombination von mehr als zwei Objekten, und Unterprojekte, zur Ordnung größerer Projektstrukturen, zu erweitern.

Für das Feld der KI bleibt noch die Analyse der Notizen und Projektbeschreibung mittels Text-Mining als mögliches Forschungsgebiet zu benennen.

5.3 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen Bedanken, die mich auf dem Weg durch mein Studium und die Entstehung dieser Arbeit direkt und indirekt Unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt hier meiner Frau und meiner Familie.

Literaturverzeichnis

- [1] : Website: <https://jlcpcb.com/>. – URL <https://jlcpcb.com/>
- [2] : Website: <https://www.autodesk.de/products/fusion-360/personal>. – URL <https://www.autodesk.de/products/fusion-360/personal>
- [3] : Website: <https://www.freecadweb.org/>. – URL <https://www.freecadweb.org/>
- [4] : Website: <https://www.heise.de> Artikel zu c't Hardware Hacks Magazin. – URL <https://www.heise.de/newsticker/meldung/c-t-Hardware-Hacks-Das-Heft-fuer-kreative-Technik-Fans-kann-bestellt-werden-1362431.html>
- [5] : Website: <https://www.spreadshirt.de/>. – URL <https://www.spreadshirt.de/>
- [6] : Website:<https://xometry.eu/>. – URL <https://xometry.eu/>
- [7] BAUDISCH, Patrick ; MUELLER, Stefanie: Personal fabrication. In: *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction* 10 (2016), Nr. 3-4, S. 165–293
- [8] BLANK, Christian ; WENDHOLT, Birgit ; WISCHHUSEN, Jonathan: Mobile Mixed Reality Repair Kit. In: PRINZ, Wolfgang (Hrsg.) ; BORCHERS, Jan (Hrsg.) ; JARKE, Matthias (Hrsg.): *Mensch und Computer 2016 - Tagungsband*. Aachen : Gesellschaft für Informatik e.V., 2016
- [9] BLAUVELT, Glenn ; EISENBERG, Michael u. a.: Computer aided design of mechanical automata: Engineering education for children. In: *Proceedings of International Conference on Education and Technology*, 2006, S. 61–66
- [10] BÖRNERT-RINGLEB, Moritz ; CASALE, Gino ; HILLENBRAND, Clemens: What predicts teachers' use of digital learning in Germany? Examining the obstacles and

- conditions of digital learning in special education. In: *European Journal of Special Needs Education* (2021), S. 1–18
- [11] CHEN, Xiang'Anthony' ; COROS, Stelian ; MANKOFF, Jennifer ; HUDSON, Scott E.: Encore: 3D printed augmentation of everyday objects with printed-over, affixed and interlocked attachments. In: *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, 2015, S. 73–82
- [12] DER AALST, Wil M. van ; PESIC, Maja ; SCHONENBERG, Helen: Declarative workflows: Balancing between flexibility and support. In: *Computer Science-Research and Development* 23 (2009), Nr. 2, S. 99–113
- [13] DUVIGNEAU, Michael: *Konzeptionelle Modellierung von Plugin-Systemen mit Petrimetzen*. Bd. 4. Logos Verlag Berlin GmbH, 2010
- [14] GERSHENFELD, Neil ; GERSHENFELD, Alan ; CUTCHER-GERSHENFELD, Joel: *Designing reality: How to survive and thrive in the third digital revolution*. Basic Books, 2017
- [15] HANSEN, Alexandria K. ; HANSEN, Eric R. ; HALL, Taylor ; FIXLER, Mack ; HARLOW, Danielle: Fidgeting with fabrication: Students with ADHD making tools to focus. In: *Proceedings of the 7th Annual Conference on Creativity and Fabrication in Education*, 2017, S. 1–4
- [16] JANTKE, Klaus P. ; KNAUF, Rainer: Didactic design through storyboarding: Standard concepts for standard tools. In: *ACM International Conference Proceeding Series* Bd. 92, 2005, S. 20–25
- [17] JEONG, Yunwoo ; KIM, Han-Jong ; NAM, Tek-Jin: Mechanism perfboard: An augmented reality environment for linkage mechanism design and fabrication. In: *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2018, S. 1–11
- [18] KIRCHHEIM, Andreas: Additive Fertigung als Innovationstreiber. In: *11. Innovationswerkstatt, ITS Industrie-und Technozentrum Schaffhausen, Neuhausen am Rheinfl, 29. Mai 2018*, 2018
- [19] KLAMKA, Konstantin ; DACHSELT, Raimund ; STEIMLE, Jürgen: Rapid Iron-On User Interfaces: Hands-on Fabrication of Interactive Textile Prototypes. In: *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2020, S. 1–14

- [20] KOVACS, Robert ; ION, Alexandra ; LOPES, Pedro ; OESTERREICH, Tim ; FILTER, Johannes ; OTTO, Philipp ; ARNDT, Tobias ; RING, Nico ; WITTE, Melvin ; SYNYSIA, Anton u. a.: TrussFormer: 3D printing large kinetic structures. In: *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2018, S. 113–125
- [21] LAMBRICHTS, Mannu ; TIJERINA, Jose M. ; DE WEYER, Tom ; RAMAKERS, Raf: DIY Fabrication of High Performance Multi-Layered Flexible PCBs. In: *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, 2020, S. 565–571
- [22] LINDEMANN, Udo ; ZÄH, Michael ; GAHR, Andreas ; PULM, Udo ; ULRICH, Christopher ; WAGNER, Wolfgang: Massenproduktion mit Losgröße 1. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 97 (2002), Nr. 5, S. 269–273. – URL <https://doi.org/10.3139/104.100542>
- [23] MELLIS, David A. ; BUECHLEY, Leah: Case studies in the personal fabrication of electronic products. In: *Proceedings of the Designing Interactive Systems Conference*, 2012, S. 268–277
- [24] MOȘTEANU, Narcisa R.: Digital Campus—a future former investment in education for a sustainable society. In: *E3S Web of Conferences* Bd. 234 EDP Sciences (Veranst.), 2021, S. 00029
- [25] NACHTIGALL, Troy R. ; TOMICO, Oscar ; WAKKARY, Ron ; WENSVEEN, Stephan ; VAN DONGEN, Pauline ; VAN NOORDEN, Leonie T.: Towards ultra personalized 4D printed shoes. In: *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2018, S. 1–9
- [26] NIEGEMANN, Helmut ; WEINBERGER, Armin: Was ist Bildungstechnologie? In: *Handbuch Bildungstechnologie*. Springer, 2020, S. 3–16
- [27] PENG, Huaishu ; BRIGGS, Jimmy ; WANG, Cheng-Yao ; GUO, Kevin ; KIDER, Joseph ; MUELLER, Stefanie ; BAUDISCH, Patrick ; GUIMBRETIERE, François: *RoMA: Interactive Fabrication with Augmented Reality and a Robotic 3D Printer*. S. 1–12. In: *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2018. – URL <https://doi.org/10.1145/3173574.3174153>. – ISBN 9781450356206

- [28] PESIC, Maja: Constraint-based workflow management systems: shifting control to users. In: *University Press Facilities, Eindhoven* (2008)
- [29] RAMAKERS, Raf ; ANDERSON, Fraser ; GROSSMAN, Tovi ; FITZMAURICE, George: Retrofab: A design tool for retrofitting physical interfaces using actuators, sensors and 3d printing. In: *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2016, S. 409–419
- [30] ROUMEN, Thijs J. ; MÜLLER, Willi ; BAUDISCH, Patrick: Grafter: Remixing 3D-printed machines. In: *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2018, S. 1–12
- [31] SALIMIFARD, Khodakaram ; WRIGHT, Mike: Petri net-based modelling of workflow systems: An overview. In: *European journal of operational research* 134 (2001), Nr. 3, S. 664–676
- [32] SCHULZ, Adriana ; SHAMIR, Ariel ; LEVIN, David I. ; SITTHI-AMORN, Pitchaya ; MATUSIK, Wojciech: Design and fabrication by example. In: *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 33 (2014), Nr. 4, S. 1–11
- [33] STEMASOV, Evgeny ; RUKZIO, Enrico ; GUGENHEIMER, Jan: The Road to Ubiquitous Personal Fabrication: Modeling-Free Instead of Increasingly Simple. In: *arXiv preprint arXiv:2101.02467* (2021)
- [34] SUN, Lingyun ; LI, Jiaji ; CHEN, Yu ; YANG, Yue ; TAO, Ye ; WANG, Guanyun ; YAO, Lining: 4DTexture: a shape-changing fabrication method for 3D surfaces with texture. In: *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2020, S. 1–7
- [35] TEIBRICH, Alexander ; MUELLER, Stefanie ; GUIMBRETIERE, François ; KOVACS, Robert ; NEUBERT, Stefan ; BAUDISCH, Patrick: Patching physical objects. In: *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, 2015, S. 83–91
- [36] TRICHINA, Elena: Didactic instructional tool for topics in computer science. In: *ACM SIGCSE Bulletin* 31 (1999), Nr. 3, S. 95–98
- [37] VAN HOLM, Eric J.: What are makerspaces, hackerspaces, and fab labs? In: *Hackerspaces, and Fab Labs* (2014)

- [38] WAKIMOTO, Tomomasa ; TAKAMORI, Ryoma ; EGUCHI, Soya ; TANAKA, Hiroya: Growable Robot with 'Additive-Additive-Manufacturing'. In: *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2018, S. 1–6
- [39] WEICHEL, Christian ; LAU, Manfred ; KIM, David ; VILLAR, Nicolas ; GELLERSEN, Hans W.: MixFab: a mixed-reality environment for personal fabrication. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2014, S. 3855–3864
- [40] WHITE, Stephen A.: Introduction to BPMN. In: *Ibm Cooperation 2* (2004), Nr. 0, S. 0
- [41] WIBAWA, Basuki ; SYAKDIYAH, Halimatus ; SIREGAR, Jenny S. ; ASRORIE, DA: Use of 3D printing for learning science and manufacturing technology. In: *AIP Conference Proceedings* Bd. 2331 AIP Publishing LLC (Veranst.), 2021, S. 060002
- [42] WOLF, Idan ; SOFFER, Pnina: Supporting BPMN model creation with routing patterns. In: *International Conference on Advanced Information Systems Engineering* Springer (Veranst.), 2014, S. 171–181
- [43] YEH, Tom ; KIM, Jeeun: CraftML: 3D modeling is web programming. In: *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2018, S. 1–12

A Anhang

A.1 Softwareanalyse

Die nachfolgenden Teilkapitel fassen die Ergebnisse der Softwareanalyse im Personal-Fabrication-Umfeld zusammen

A.1.1 Grafik (2D CAD)

Inkscape

Inkscape ist ein freies Vektorgrafikwerkzeug mit dem Fokus auf SVG-Dateien. Verarbeitet werden aber auch die meisten gängigen Pixelgrafikformate, die sowohl importiert als auch exportiert werden können, jedoch wird keine Bearbeitung auf Pixelebene wie bei Paint ermöglicht. Die Benutzeroberfläche und Bedienung ist an Corel-Draw angelehnt und auf die Bearbeitung von Vektorgrafiken ausgerichtet. Die Eingabe erfolgt nach dem WYSIWYG-Prinzip durch Werkzeugauswahl und Verwendung der Maus, jedoch können die Parameter auch numerisch eingegeben und damit exakte Vektorzeichnungen erstellt werden.

Import Formate SVG, DXF, PDF, PNG, BMP, JPG ...

Export Formate Primär: SVG, PNG (export als Pixelgrafik)
diverse Sonderformate durch Plugins

A.1.2 3D CAD

Beschreibung CAD ist: CAD (Computer Aided Design) beschreibt die Modellierung von 2D und 3D-Objekten mit Hilfe eines CAD-Programms auf einem Computer. Die abstrakten Nutzereingaben werden in Daten zur exakten Beschreibung des Objekts umgerechnet.

Für Personal Fabrication werden diese Programme zur Erzeugung oder Manipulation von virtuellen Objekten und zur späteren Generierung von Fertigungsdaten eingesetzt.

OpenSCAD

OpenSCAD ist ein script basiertes Werkzeug zur Erstellung von 2D und 3D Modellen. Die Modellierung erfolgt durch eine Beschreibungssprache (OpenSCAD-Skript) welche eine parametrisierte Beschreibung von Objekten zulässt. Dem Nutzer stehen zu Beginn lediglich primitive Körper, für 2D Rechteck und Kreis sowie für 3D Kubus, Zylinder und Kugel zur Verfügung. Mittels boolescher Operatoren können diese zusammengefügt oder von einander abgezogen werden, um andere Formen zu schaffen. Komplexere und wiederkehrende Strukturen, wie Zahnräder, können in Bibliotheken ausgelagert und durch Einbinden verwendet werden. Des Weiteren können komplexe Formen als 2D- oder 3D-Objekt importiert werden.

Das Ergebnis kann in einem 3D-Viewer als Vorschau oder als detailliertes Rendering betrachtet werden. Mittels Maus kann im Viewer das Objekt bewegt und betrachtet werden.

Eine Besonderheit an OpenSCAD ist die Benutzung als Werkzeug mittels Kommandozeile. Dies ermöglicht die automatisierte Erzeugung von Objekten, ohne die Benutzung einer graphischen Benutzeroberfläche. So kann ein entsprechendes Skript aus einem Umriss, welcher als dxf-Datei übergeben wird, eine Plätzchenform erzeugen. Mit einem anderen Skript kann automatisch ein Namensschild mit einem übergebenen Namen erzeugt werden.

Import Formate STL, OFF, AMF, 3MF, DXF, SVG, CSG, PNG, BMP

Export Formate STL, OFF, DXF, CSG, PNG

BlocksCAD

BlocksCAD ist eine Portierung von OpenSCAD in den Browser mit einer blockorientierten Programmierung durch Blockly. Vorteilhaft ist, dass der Anwender keine Tippfehler wie vergessene Klammern oder ähnliches hervorrufen kann, da diese Eingaben durch die Blöcke abgesichert werden. Das entworfene Objekt wird in einen Viewer wie in OpenSCAD gerendert und angezeigt.

Import Formate STL, XML(BlocksCAD-Format)
Export Formate STL, OFF, DXF, CSG, PNG, SCAD

craftML

Ähnlich wie OpenSCAD und BlocksCAD wird auch bei craftML das zu entwerfende 3D-Objekt mittels Skriptsprache beschrieben. Der Entwurf wird jedoch kontinuierlich gerendert, sodass Änderungen im Skript ohne das Anstoßen des Renderings sofort sichtbar werden. Die Skriptsprache ist ein XML-Dialekt, der den Einstieg in 3D-Modellierung für Anwender mit Erfahrung im Programmieren von Webseiten einfacher macht.

Import Formate STL,
Export Formate STL,

SketchUp

Ursprünglich entwickelt als 3D-Modellierungswerkzeug für die Erstellung von Objekten in Google-Earth / Google-Maps, wurde das ursprüngliche Programm zu einer Webanwendung weiterentwickelt. Die Bedienung lässt sich als WYSIWYG-Editor für 3D-Modelle beschreiben. Von Linien und primitiven Formen stehen dem Anwender Werkzeuge zum Manipulieren der Objekte zur Verfügung. Die Bedienung stellt dabei nicht sicher, dass ein Modell eine vollständig beschriebene solide Geometrie beschreibt, was zu Fehlern im 3D-Druck führen kann, wenn im Modell Flächen fehlen.

Import Formate STL,OBJ,PNG,JPG
Export Formate STL,SKP

TinkerCAD

Wie SketchUp ist auch TinkerCAD ein einfach zu bedienender Online-Editor, der im Unterschied dazu die Konstruktion von soliden Geometrien durch den Workflow erzwingt. Dazu stehen dem Anwender eine Vielzahl von 3D-Formen in verschiedenen Kategorien, sowie ein Zeichnen und Text-Werkzeug zur Verfügung, die durch eigene Modelle erweitert werden können.

Import Formate STL,OBJ,SVG
Export Formate STL,OBJ,GLB,SVG

Fusion 360

Fusion 360 ist eine klassische CAD-Workbench mit verschiedenen Möglichkeiten Objekte zu Modellieren. Im Vergleich zu den zuvor genannten Modellierungswerkzeugen ist Fusion auf erfahrene und Anwender im industriellen Kontext ausgerichtet. Durch diverse Cloudservices sind Sonderfunktionen wie Belastungsanalyse oder Mechaniksimulationen durch das Programm verfügbar. Einige Funktionen wurden im Jahr 2020 jedoch auf ein kostenpflichtiges Abo beschränkt.

Import Formate STL,
Export Formate STL,

FreeCAD

Im Opensource-Bereich ist FreeCAD eine alternative CAD-Workbench mit ähnlichem Funktionsumfang wie Fusion 360. Auch hier stehen verschieden Module und Verfahren für die Konstruktion von 3D-Modellen zur Verfügung.

Besonders ist hier ein Modul, welches das Verwenden von OpenSCAD-Skripten erlaubt. Damit lassen sich Modelle, die zuvor in OpenSCAD entwickelt wurden, mit FreeCAD weiter nutzen und bearbeiten.

Import Formate STL,
Export Formate STL,

Blender

Blender ist zunächst kein CAD-Werkzeug, dennoch besteht die Möglichkeit, die in Blender Entworfenen 3D-Objekte in unter anderem für den 3D-Druck geeignete Formate zu exportieren. Für Anwender mit Erfahrung in der Verwendung von Blender, ist dieses Programm als Einstieg für die Modellierung von druckbaren Objekten dennoch geeignet.

Import Formate STL, Diverse
Export Formate STL, Diverse

Leopoly

Auch bei Leopoly handelt es sich um eine Webanwendung, die mit drei Verschiedenen Modi Objekte erstellen. Dabei besteht jedoch keine Möglichkeit zwischen den Optionen zu wechseln. Im Modus Sculpting kann ein Grundkörper mit verschiedenen Werkzeugen eingedrückt und gezogen werden, ähnlich dem Arbeiten mit Ton. Der Modus Formshift erlaubt die Manipulation von Parametern eines Torus oder eines Zylinders. Im Modus Cubecraft, kann mit verschieden geformten Bausteinen ähnlich wie Lego ein Objekt zusammen gestellt werden.

Import Formate STL,
Export Formate STL,

A.1.3 CAM Lasercut

Lightburn

Lightburn ist ein CAM-Tool zur Ansteuerung verschiedener Lasercuttersysteme und unterstützt neben Datelexport (Fertigungsdaten auf USB-DISK) und USB-Kommunikation, auch die Ansteuerung über LAN. Lightburn kann sowohl als reines CAM sowie als CAD-CAM-Tool eingesetzt werden, da wichtige Aufgaben wie einfache Formen und Schriften sowie das vektorisieren von Bitmaps in der Software umgesetzt werden können. Neben der Erstellung und Bearbeitung der Formen besteht die Möglichkeit Bibliotheken und Parametersets für verschiedene Laser sowie Materialien zu erstellen und verwenden.

Import Formate (BMP, PNG, JPG), SVG..
Export Formate Ansteuerung verschiedener gängiger Lasercutter-Controller

K40-Whisperer

K40-Whisperer ist eine Software zur Ansteuerung eines unter Makern oft genutzten günstigen Lasercutters. Die Software dient lediglich der Steuerung dieses speziellen Lasercuttertyps und ist im Funktionsumfang auf das Wesentliche reduziert. So kann dieses Programm ausschließlich SVG-Files lesen und anhand der Farben zwischen schneiden, vektrogravieren, rastergravieren unterscheiden. Der Fokus liegt auf der Ansteuerung des Lasers und der Justierung des Laserjobs.

Import Formate SVG
Export Formate Steuerung des K40-Lasers

A.1.4 CAM 3D-Druck

Slic3r (Prusa Edition)

Slic3r ist einer der ersten CAM-Tools für 3D-Drucker im nicht kommerziellen Segment. In der von der Firma Prusa weiter entwickelten Version sind vor allem Erweiterungen für Farbwechsel und variable Schichtstärken ergänzt worden. Dazu verfügt Slic3r über getrennte Einstellungssets für Maschine, Filament und Druckmodell, um die entsprechenden Parametersätze getrennt zu verwalten. Die Steuerdateien zum Drucken, können gespeichert und mittels SD-Karte oder externem G-Code-Runner, einem Werkzeug zur Ansteuerung von 3D-Druckern, genutzt werden. Projekte können mit allen Parametern gespeichert und als Containerformat 3mf exportiert werden.

Import Formate	3MF, STL, OBJ, AMF
Export Formate	GCODE, 3MF
Bedienung	Importieren, Parameter wählen, Slicen, Fertig Voreingestellte Parameter sind direkt nutzbar
Einstieg	Verschiedene Modi (Anfänger - Experte) verhindern Überforderung Einfache Anwendung mit klarem Workflow Alle Slicer-Parameter lassen sich einzeln einstellen
Besonderheiten	Projekte können als 3MF-Datei mit allen Parametern exportiert werden.

Cura

Slicer der Firma Ultimaker

Import Formate	STL, OBJ, X3D, 3MF, BMP, GIF, JPG, PNG
Export Formate	GCODE
Bedienung	Importieren, Parameter wählen, Slicen, Fertig
Einstieg	Verschiedene Modi (Anfänger - Experte) verhindern Überforderung Einfache Anwendung mit klarem Workflow Slicer-Parameter
Besonderheiten	Projekte können als 3MF-Datei mit allen Parametern exportiert werden.

Repetierhost

CAM-Software die mehrere Slicer in einer Workbench mit einem GCODE-Runner kombiniert.

A.1.5 GCODE-Runner

Die meisten 3D-Drucker können G-Codes selbstständig von einer SD-Karte lesen und ausführen. In einigen Fällen ist die Verwendung eines GCODErunners sinnvoll, zum Beispiel wenn dieser mehrere 3D-Drucker gleichzeitig steuern und Überwachen kann.

3D-Druckerserver

Neben der direkten Ansteuerung über USB stellen, die 3D-Druckerserver Octoprint und Repetierserver eine Möglichkeit dar, um den 3D-Drucker über Netzwerk verfügbar zu machen.

B Acronyme

BPMN Business Process Modelling Notation

CSG Constructiv Solid Geometrie

CAD Computer-Aided-Design

CAM Computer-Aided-Manufacturing

PF Personal-Fabrication

DF Digital-Fabrication

CHI ACM Conference on Human Factors in Computing Systems

UIST ACM Symposium on User Interface Software and Technology

IoT Internet of Things

MIT CSAIL MIT - Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory

HTML Hyper-Text-Markup-Language

HTTP Hypertext-Transfer-Protocol

HPI Hasso-Plattner-Institut

ajax Asynchronous JavaScript and XML

AR Augmented Reality

CNC Computerized Numerical Control

JS JavaScript

TS TypeScript

URL Uniform Resource Locator

FDM Fused-Deposition-Modeling

SLA Stereolithografie

VR Virtual Reality

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „— bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] — ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: _____

Vorname: _____

dass ich die vorliegende Masterarbeit – bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Constraint gestützte Workbench zur Einführung von Personal-Fabrication im digitalen Unterricht

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

_____ 

Ort

Datum

Unterschrift im Original