
Der 3D-Druck als Lernkontext im Mathematikunterricht

Der Einsatz digitaler Technologien als Lernkontexte zur Förderung
fachlicher Kompetenzen sowie der Berufsorientierung und -vorbereitung
in der Sekundarstufe I und II

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

MIRA HYKKELBJERG WULFF

Wiemersdorf, August 2024

Erstgutachter: Prof. Dr. Aiso Heinze

Zweitgutachter: Prof. Dr. Daniel Sommerhoff

Tag der mündlichen Prüfung: 06.12.2024

DANKSAGUNG

Ich möchte mich zuerst bei all denen Personen bedanken, die mich auf dem Weg der Promotion begleitet haben und ohne deren Unterstützung, Zuspruch und Rückhalt diese Forschungsarbeit nicht zustande gekommen wäre. Vor allem möchte ich mich herzlich bei meinem Doktorvater Prof. Dr. Aiso Heinze bedanken, der mich während meines Masterstudiums durch ein deutsch-dänisches Forschungsprojekt für die Wissenschaft begeistern konnte, mir ermöglicht hat, mein Promotionsvorhaben am IPN durchzuführen und mich während des Promotionsprozesses betreut hat.

Für die inhaltliche und methodische Unterstützung möchte ich vor allem meiner Mentorin Dr. Anika Radkowitzsch und meinem Mentor Dr. Sascha Hohmann danken. Darüber hinaus danke ich Melissa Skerhutt, Ilayda Toprak und Lena Osbahr, die im Rahmen ihrer Hilfskrafttätigkeiten oder Masterarbeiten mich gewissenhaft und zuvorkommend unterstützt haben. Das Forschungsprojekt, an das die vorliegende Arbeit angeknüpft ist, wäre außerdem nicht ohne eine enge Zusammenarbeit im Team des DiASper-Projekts zustande gekommen. Hier gilt ein großer Dank meinem langjährigen Büropartner und Administrator des DiASper-Projekts, Dr. Marc Wilken, sowie Bente Weigelin von der SDU Odense (DK) für den wertvollen gemeinsamen Austausch auch über das Projektende hinaus. Vielen Dank auch an Prof. Dr. Jacob Nielsen, Dr. Jørgen Chr. Larsen und Dr. Bjarke Pedersen für die Zusammenarbeit und die Ermöglichung eines Forschungsaufenthalts an der SDU Odense (DK) im Rahmen der Projektlaufzeit sowie an alle unterstützenden Hilfskräfte von der SDU Odense (DK). Ebenso geht ein Dank an all die Netzwerkpartner:innen am IQSH sowie an Schulen und Unternehmen, die mich während und nach der Projektlaufzeit begleitet haben. Stellvertretend für die Netzwerkschulen möchte ich mich bei Philipp Eigenbrod (Gemeinschaftsschule am Brook, Kiel) und Gustav Venth (Gymnasium Kronwerk, Rendsburg) und stellvertretend für die Netzwerkunternehmen bei Lars Liedmann (Basler AG, Ahrensburg) bedanken, die mein Forschungsprojekt mit ihrer Zeit und mit konstruktiven Gesprächen bereichert haben.

Darüber hinaus geht ein herzlicher Dank an die Abteilung Didaktik der Mathematik des IPN sowie alle weiteren IPN-Angehörigen, die mich auf meinem Weg begleitet und unterstützt haben. Die Erinnerungen an Film-Abende und andere gemeinsame Aktivitäten werde ich noch lange in dankbarer Erinnerung behalten. Ganz besonders hervorzuheben sind hier Dr. Femke Sporn, Dr. Lara Petersen und Franziska Fischer sowie meine ehemalige Kollegin Dr. Dunja Rohenroth, die mich während meines Promotionswegs begleitet und mir immer, aber insbesondere auch in den letzten Zügen des Anfertigen der Dissertation, mit offenen Ohren, vielen guten Ratschlägen

und Wünschen oder Schokolade zur Seite standen. Ich danke euch von ganzem Herzen und bin sehr dankbar, euch in meinem Leben zu haben!

Zuletzt möchte ich mich herzlich bei meiner Familie und meinen außeruniversitären Wegbegleiter:innen bedanken, ohne deren bedingungslosen Rückhalt und Unterstützung ich diesen Weg nicht hätte gehen können. Ich danke euch, Mama und Papa, für eure bedingungslose Liebe und für eure Unterstützung in der Schulzeit, im Studium und auch über das Studium hinaus. Bedstemor og bedstefar, jeg takker jer for jeres kærlighed og for at jeg altid har mulighed for at være derhjemme hos jer. Ich danke meinen Theater-Menschen für die vielen tollen Ausgleichsmomente auf, hinter und vor der Bühne. Und vor allem möchte ich mich bei meinen zwei liebsten Menschen bedanken: Tak, Anne, for at du altid er med mig! Danke, Max, dass du immer an meiner Seite stehst!

ZUSAMMENFASSUNG

In Anbetracht der fortschreitenden Digitalisierung der Arbeitswelt sowie des gegenwärtigen und künftigen Fachkräftemangels unterliegen die Anforderungsprofile an (zukünftige) Arbeitnehmer:innen einem kontinuierlichen Wandel. Diese Entwicklungen finden Berücksichtigung in der Ausgestaltung von Ausbildungs- und Studiengängen. Um zukünftigen Arbeitnehmer:innen den Übergang in die Arbeitswelt zu erleichtern, kann eine frühzeitige Orientierung und Vorbereitung auf die digitale Arbeitswelt von Nutzen sein. Dementsprechend wird in den allgemeinbildenden Schulen neben der Förderung fachlicher, emotionaler und sozialer Kompetenzen zusätzlich ein Schwerpunkt auf die Möglichkeiten einer frühzeitigen Berufsorientierung und -vorbereitung gelegt. Die curricularen Ziele der allgemeinbildenden Schulen sind von essentieller Bedeutung, so dass sich daraus eine Diskrepanz zwischen den curricularen Inhalten der einzelnen Unterrichtsfächer und den beim Übergang in die Arbeitswelt erwarteten Kompetenzen in Bezug auf digitale Technologien ergibt. Die vorliegende kumulative Dissertation begegnet dieser Diskrepanz am Beispiel der Verknüpfung des regulären Mathematikunterrichts mit der 3D-Druck-Technologie unter Zuhilfenahme des Ansatzes des Educational Design Research.

Die Grundlage für den Designprozess bildeten zwei Rahmenbedingungsstudien, die Gelingensbedingungen für eine im Sinne der curricularen Ziele sowie der Berufsorientierung und -vorbereitung zielführende Einbindung der 3D-Druck-Technologie im regulären Mathematikunterricht adressierten. Im Rahmen der Studien wurden einerseits 15 Repräsentant:innen der digitalen Arbeitswelt mithilfe leitfadengestützter Interviews befragt. Gegenstand der Interviews waren die Kenntnisse, die von zukünftigen Arbeitnehmer:innen im Hinblick auf 3D-Druck erwartet werden sowie die Möglichkeiten der Vermittlung dieser Kenntnisse während der Schulzeit aus industrieller Sicht. Die Ergebnisse lassen sich in zwei Kategoriensysteme unterteilen: Das erste System umfasst relevante Kenntnisse und Kompetenzen im Umgang mit der Technologie, während das zweite System die Wünsche der Repräsentant:innen der digitalen Arbeitswelt an die Schulbildung widerspiegelt. Andererseits wurden die schulischen Gelingensbedingungen eines Technologieeinsatzes analysiert. Hierbei wurde ein Fokus auf die Ausprägung von ausgewählten internen Barrieren gelegt, wobei insbesondere die *Selbstwirksamkeitserwartungen* in den Kompetenzbereichen *TK*, *TPK* und *TPACK* sowie *task value beliefs* und deren Zusammenhang mit der Nutzungsin-tention der 3D-Druck-Technologie im Mathematikunterricht untersucht wurden. Dazu wurde eine Online-Befragung von 166 Mathematiklehrkräften durchgeführt. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die *Selbstwirksamkeitserwartungen* bezüglich der

technologischen Komponenten des Lehrkräftewissens und die *task value beliefs* in einem positiven Zusammenhang mit der Nutzungsintention der Lehrkraft stehen.

Die Resultate der Rahmenbedingungsstudien dienten als Basis für den weiteren Verlauf des Designprozesses mit dem Ziel, Unterrichtskonzepte zu entwickeln, die die 3D-Druck-Technologie authentisch und zielführend als Lernkontext in den regulären Mathematikunterricht integrieren. Der Designprozess begann mit der Untersuchung der Verknüpfungspunkte zwischen den mathematischen Elementen, die den 3D-Druck-Prozessen zugrunde liegen (Modellierung, Triangulierung, Slicing, Druckprozess), und den curricularen Lerninhalten des regulären Mathematikunterrichts. Anschließend wurde ein Prototyp für den mathematischen Lerninhalt „zusammengesetzte Körper“ entwickelt. Das prototypische Unterrichtskonzept wurde in fünf Zyklen evaluiert und optimiert: Das Unterrichtskonzept wurde (1) von zehn Lehrkräften hinsichtlich seiner theoretischen Umsetzbarkeit, (2) von drei Industrievertreter:innen hinsichtlich der Authentizität der Einbindung der 3D-Druck-Technologie und (3) mithilfe einer Schulklasse hinsichtlich seiner praktischen Umsetzbarkeit im Schulkontext formativ evaluiert und jeweils iterativ an die Resultate angepasst. Darüber hinaus wurde das prototypische Unterrichtskonzept in zwei Evaluierungszyklen summativ mittels einer Prä-Post-Befragung hinsichtlich seines Mehrwerts (4) im Laborkontext und (5) im Feld evaluiert. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass das Lernen mit dem Lernkontext 3D-Druck positive Auswirkungen auf Aspekte des 3D-Druck bezogenen Selbstkonzeptes sowie auf die Förderung digitaler Kompetenzen hat. Zudem zeigt sich, dass das Lernen mathematischer Inhalte nicht vernachlässigt wird.

Um einen breiten Einsatz der entwickelten und evaluierten Unterrichtskonzepte zu gewährleisten, wurden nach der letzten summativen Evaluierung Kurz-Fortbildungen für Lehrkräfte durchgeführt. Im Rahmen dieser Fortbildungen wurden der Lernkontextansatz anhand von Beispielen aus den Unterrichtskonzepten vorgestellt und den Lehrkräften erste Handlungskompetenzen im Umgang mit der 3D-Druck-Technologie vermittelt. Darüber hinaus erhielten die teilnehmenden Lehrkräfte im Anschluss an die Fortbildung alle im Forschungsprojekt entwickelten Unterrichtsmaterialien (didaktische Begründungen, Stundenraster, Arbeitsblätter, Aufgabenvideos und Erläuterungen zu den 3D-Druck-Prozessen). Im Allgemeinen wurden die Fortbildungen von den teilnehmenden Lehrkräften positiv bewertet. Die Resultate einer verknüpften Prä-Post-Befragung der teilnehmenden Lehrkräfte deuten darauf hin, dass bereits die Teilnahme an einer kurzen Fortbildung zu einem häufigeren Einsatz der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht führt und dass sich Lehrkräfte mit ungünstigeren Voraussetzungen in der Ausprägung ihrer internen Barrieren gegenüber dem Technologieeinsatz im Mathematikunterricht an die Lehrkräftegruppen mit günstigeren Voraussetzungen angleichen.

Für zukünftige Forschung kann das Forschungsprojekt eine Vorgehensvorlage für eine Weiterentwicklung des Lernkontextansatzes in verschiedenen Bereichen darstellen. Des Weiteren können die aus dem vorliegenden Designprozess abgeleiteten Designprinzipien auf andere Kontexte mit vergleichbaren Rahmenbedingungen übertragen werden. Im Rahmen der Forschung zu Lehrkräftefortbildungen liefert das Forschungsprojekt einen Ansatz für die Entwicklung informativer Kurz-Fortbildungen.

ABSTRACT

In the context of a rapidly evolving digitalized working environment and a shortage of skilled labor, the requisite skill sets for (prospective) employees are undergoing a transformation. These developments are being addressed in both training and study programs. In order to facilitate the transition of future employees into the professional sphere, it would be beneficial to provide them with preliminary guidance and preparation in navigating the digital working world. In addition to promoting technical, emotional, and social skills, general education schools should also focus on opportunities for early career orientation and preparation. As the curricular objectives of general education schools are not to be overlooked, this results in a discrepancy between the curricular content of the individual subjects and the skills expected in the transition to the world of work with regard to digital technologies. This dissertation addresses this discrepancy by employing the Educational Design Research approach to integrate 3D printing technology into regular mathematics lessons.

Two framework studies formed the foundation for the design process, which addressed the conditions for the successful integration of 3D printing technology in regular mathematics lessons in terms of curricular objectives and career orientation and preparation. In this context, 15 representatives of the digital world of work were interviewed using guided interviews to ascertain the knowledge related to 3D printing that future employees are expected to possess and to identify how this can be addressed from an industrial perspective while they are still in school. The results comprise two category systems: the first encompasses pertinent knowledge and abilities pertaining to the technology, whereas the second reflects the aspirations of digital industry representatives regarding the education of the younger generation. Conversely, the school environment was examined with regard to the factors that facilitate or impede the effective integration of technology, with a particular focus on the role of *self-efficacy* in the areas of *TK*, *TPK*, and *TPACK* as well as *task value beliefs* in influencing the intention to utilize 3D printing technology in mathematics lessons. This was accomplished through an online survey of 166 mathematics teachers. The results indicate a positive correlation between *self-efficacy* regarding the technological components of teachers' knowledge and *task value beliefs* and the intention to use the software.

The findings of the framework condition studies constituted the foundation for the subsequent stages of the design process, with the objective of developing pedagogical approaches that integrate 3D printing technology in a genuine and deliberate manner as a learning context within the conventional mathematics curriculum. This process commenced with an examination of the interconnections between the mathematical principles underlying 3D printing procedures (modeling, triangulation, slicing,

and the printing process) and the curricular learning content of conventional mathematics lessons. Subsequently, a prototype was developed for the mathematical learning content designated as "composite solids." The prototype teaching concept was subjected to five evaluation cycles to assess its efficacy and identify areas for improvement. Consequently, the teaching concept was subject to formative evaluation (1) by ten teachers in terms of its theoretical feasibility, (2) by three industry representatives in terms of the authenticity of the integration of 3D printing technology, (3) and with the assistance of a school class in terms of its practical feasibility within the school context. The results of each evaluation were used to inform iterative adaptations to the teaching concept. Furthermore, the prototypical teaching concept was subjected to a summative evaluation through a pre-post survey in two evaluation cycles. This evaluation was conducted with regard to its added value (4) in the laboratory context and (5) in the field. The findings indicate that learning through the context of 3D printing has a beneficial impact on various aspects of the 3D printing-related self-concept and the advancement of digital competencies. Moreover, the results indicate that the learning of mathematical knowledge is not neglected.

To facilitate the widespread implementation of the developed and evaluated teaching concepts, brief training sessions were conducted for educators following the conclusion of the final summative evaluation. As part of the training program, the learning context approach was presented with illustrative examples drawn from the teaching concepts. Teachers were also instructed in the fundamental skills required to interact with 3D printing technology. Moreover, all teaching materials developed throughout the research project, including didactic explanations, lesson plans, worksheets, task videos, and explanations of the 3D printing processes, were made accessible to the participating teachers following the training. The training courses were in general rated positively by the participating teachers. The results of a linked pre-post survey of the participating teachers indicate that even participation in a short training course leads to more frequent use of 3D printing technology as a learning context in regular mathematics lessons. Furthermore, teachers with less favorable prerequisites adapt their internal barriers to the use of technology in mathematics lessons to align with those of teachers with more favorable prerequisites.

The research project can serve as a model for future studies seeking to advance the learning context approach in a variety of domains. Moreover, the design principles derived from the present design process can be transferred to other contexts within comparable framework conditions. In the context of research on teacher training, the research project offers a methodology for the development of informative, succinct training courses.

SAMMENFATNING

Set i lyset af den igangværende digitalisering af arbejdsmarkedet samt den nuværende og fremtidige mangel på kvalificeret arbejdskraft er kvalifikationerne for (fremtidige) medarbejdere genstand for løbende ændringer. Der tages højde for dette i udvikling af uddannelses- og studieprogrammer. For at gøre overgangen til arbejdslivet lettere for fremtidige medarbejdere, kan en tidlig forberedelse og orientering om processer i den digitale arbejdsverden være gavnlig. Ud over at fremme tekniske, emotionale og sociale færdigheder fokuserer folkeskoler og gymnasiale uddannelser derfor også mere på muligheder for tidlige karrierelæringsaktiviteter. De almendannende skolers faglige mål er af afgørende betydning, hvilket resulterer i en uoverensstemmelse mellem det faglige indhold i de enkelte fag og de kompetencer, der forventes i overgangen til arbejdslivet særligt med hensyn til de digitale teknologier. Denne kumulative disputats behandler denne uoverensstemmelse ved hjælp af eksemplet på at forbinde den almindelige matematikundervisning med 3D-printteknologi ved hjælp af tilgangen Educational Design Research.

Grundlaget for designprocessen blev dannet af to rammeundersøgelser, der behandler betingelserne for en vellykket integration af 3D-printteknologi i den grundlæggende matematikundervisning med hensyn til læseplanens mål samt karrierevejledning og -forberedelse. Som en del af undersøgelserne blev 15 repræsentanter fra den digitale arbejdsverden udspurgt ved hjælp af ”guidedede interviews”. Emnet for interviewene var hvilken viden, der forventes af fremtidige medarbejdere med hensyn til 3D-printning, samt mulighederne for at undervise i denne viden i skolen ud fra et industrielt perspektiv. Resultaterne kan opdeles i to kategorisystemer. Det første system omfatter relevant viden og kompetencer til at håndtere teknologien, mens det andet system afspejler de ønsker, som repræsentanter fra det digitale arbejdsliv har til undervisningen i skolen. På den anden side blev det analyseret, hvordan en indsats af teknologier på skolerne, kan få succes. Her blev der lagt vægt på, hvor udpræget udvalgte interne barrierer er, med særligt fokus på *self-efficacy* inden for kompetenceområderne *TK*, *TPK* og *TPACK* samt *task value beliefs* og deres forhold til intentionen om at bruge 3D-printteknologi i matematikundervisningen. Til dette formål blev der gennemført en online-undersøgelse blandt 166 matematiklærere. Resultaterne viser, at forventninger om *self-efficacy* vedrørende de teknologiske komponenter i lærerkompetencen og *task value beliefs* er positivt relateret til lærerens intention om at bruge teknologi i undervisningen.

Resultaterne af rammestudierne tjente som grundlag for det videre forløb i designprocessen med formålet at udvikle undervisningskoncepter, der integrerer 3D-

printteknologi autentisk og målrettet som en læringskontekst i den grundlæggende matematikundervisning. Designprocessen begyndte med en undersøgelse af forbindelserne mellem de matematiske elementer, der ligger til grund for 3D-printprocesserne (modellering, triangulering, slicing, printproces) og det faglige læringsindhold i almindelige matematiktimer. Derefter blev der udviklet en prototype til det matematiske læringsindhold »sammensatte figurer«. Prototypens undervisningskoncept blev evalueret og optimeret i fem cyklusser. Undervisningskonceptet blev formativt evalueret (1) af ti lærere med hensyn til dets teoretiske gennemførlighed, (2) af tre repræsentanter fra industrien med hensyn til autenticiteten af integrationen af 3D-printteknologi og (3) med hjælp fra en skoleklasse med hensyn til dets praktiske gennemførlighed i skolekonteksten og iterativt tilpasset resultaterne i hvert enkelt tilfælde. Desuden blev prototypen på undervisningskonceptet evalueret summativt i to evalueringscyklusser ved hjælp af en pre-post-undersøgelse med hensyn til dets merværdi (4) i laboratoriekonteksten og (5) i skolekonteksten. Resultaterne viser, at læring ved hjælp af 3D-printningskonteksten har en positiv effekt på aspekter af 3D-printningsrelateret self-concept og fremme af digitale færdigheder. Det viser også, at læring af matematisk indhold dermed ikke forsømmes.

For at sikre, at de udviklede og evaluerede undervisningskoncepter bliver brugt i et bredt omfang, blev der arrangeret korte kurser for lærere efter den afsluttende summative evaluering. Som en del af disse kurser blev læringskonteksttilgangen præsenteret ved hjælp af eksempler fra undervisningskoncepterne, og lærerne blev undervist i at håndtere 3D-printteknologien. Derudover blev alt undervisningsmateriale, der blev udviklet i forskningsprojektet (didaktiske forklaringer, lektionsplaner, arbejdsark, opgavevideoer, forklaringer af 3D-printprocesserne), stillet til rådighed for de deltagende lærere efter kurset. Generelt blev kurserne vurderet positivt af de deltagende lærere. Resultaterne af en tilknyttet pre-post-undersøgelse af de deltagende lærere viser, at selv deltagelse i et kort kursus fører til hyppigere brug af 3D-printteknologi som læringskontekst i den grundlæggende matematikundervisning, og at lærere med mindre gunstige forudsætninger tilpasser deres interne barrierer for brug af teknologi i matematikundervisningen til grupper af lærere med bedre forudsætninger.

I forbindelse med fremtidig forskning kan dette forskningsprojekt udgøre en plan for videreudvikling af læringskonteksttilgangen på forskellige områder. Desuden kan designprincipperne fra den nuværende designproces overføres til andre kontekster med sammenlignelige rammebetingelser. I forbindelse med forskning i læreruddannelseskurser giver forskningsprojektet en tilgang til udvikling af informative korte uddannelsesprogrammer.

INHALTSVERZEICHNIS

Danksagung	I
Zusammenfassung	III
Abstract	V
Sammenfatning	VII
1 Einleitung	1
2 Theoretischer Hintergrund.....	3
2.1 Rahmenbedingungen der digitalen Arbeitswelt.....	3
2.1.1 Digitalisierung der Arbeitswelt.....	3
2.1.2 Die 3D-Druck-Technologie	5
2.2 Rahmenbedingungen der Schule.....	11
2.2.1 Bildungsziele im Zeitalter der Digitalisierung.....	12
2.2.2 Digitalisierung: Ausgangssituation an deutschen Schulen	14
2.2.3 Berufsorientierung an allgemeinbildenden Schulen.....	15
2.2.4 Gelingensbedingungen für den Einsatz digitaler Technologien im regulären Fachunterricht.....	16
2.3 Zusammenfassung und Forschungsdesiderate	22
2.4 Educational Design Research.....	24
3 Einleitung zu den Rahmenbedingungsstudien.....	27
3.1 Rahmenbedingungen der digitalen Arbeitswelt.....	27
3.2 Rahmenbedingungen der Schule.....	28
3.3 Anmerkung zu den Artikeln.....	29
4 Rahmenbedingungsstudie – Digitale Arbeitswelt.....	31
4.1 Einleitung	31
4.2 3D-Druck in der digitalen Arbeitswelt und im regulären Fachunterricht der allgemeinbildenden Schulen	32
4.2.1 Theoretischer Rahmen	32
4.2.2 Forschungsfragen.....	34
4.3 Methode.....	34
4.3.1 Stichprobe	34
4.3.2 Instrumente	35
4.4 Ergebnisse	36
4.5 Diskussion und Ausblick.....	39

5	Rahmenbedingungsstudie – Schule	45
5.1	Einleitung.....	45
5.2	Schulische Rahmenbedingungen für eine Nutzung des 3D-Drucks als Lernkontext im Mathematikunterricht der Sekundarstufen I und II.....	46
5.2.1	Theoretischer Rahmen.....	46
5.2.2	Forschungsfragen	47
5.3	Methode	48
5.3.1	Stichprobe.....	48
5.3.2	Instrumente	48
5.4	Ergebnisse.....	50
5.4.1	Limitationen	52
5.5	Diskussion und Ausblick	52
6	Designprozess der Unterrichtskonzepte.....	55
6.1	Elementarmathematischer Gehalt der 3D-Druck-Prozesse und dessen Bezüge zum Schulcurriculum.....	55
6.2	Entwicklung von theoretischen Unterrichtskonzepten und praktischen Unterrichtsideen.....	60
6.3	Evaluierung der theoretischen Unterrichtskonzepte und praktischen Unterrichtsideen.....	60
6.3.1	Erster Evaluierungszyklus (Umsetzbarkeit und Akzeptanz).....	60
6.3.2	Zweiter Evaluierungszyklus (Authentizität).....	62
6.3.3	Dritter Evaluierungszyklus (praktische Umsetzbarkeit im Kontext Schule)	65
6.3.4	Vierter Evaluierungszyklus (Pilotierung der Mehrwertsevaluierung – Laborkontext).....	67
6.3.5	Fünfter Evaluierungszyklus (Mehrwerts-Evaluierung im Feld).....	70
7	Summative Mehrwertsevaluierung im Feld	71
7.1	Einleitung.....	71
7.2	Kurzvorstellung der Unterrichtseinheit	71
7.3	Forschungsfragen.....	72
7.4	Methode	73
7.5	Ergebnisse.....	77
7.6	Diskussion.....	82
8	Einordnung der Disseminationsstudie	85
9	Disseminationsstudie – Lehrkräfte-Fortbildungen	87
9.1	Einleitung.....	87
9.2	Theoretischer Hintergrund.....	90
9.2.1	Gelingsbedingungen für die Nutzung digitaler Technologien im Fachunterricht.....	90
9.2.2	Interne Barrieren von Lehrkräften bei der Nutzung digitaler Technologien im Fachunterricht	91

9.2.3	Projektkontext - Die Nutzung digitaler Medien im Fachunterricht zur Berufsorientierung und -vorbereitung	92
9.2.4	3D-Druck als „neues“ digitales Werkzeug der digitalen Arbeitswelt .	93
9.2.5	Nutzungsmöglichkeiten der 3D-Druck-Technologie in der Schule	94
9.2.6	Forschungsfragen.....	95
9.3	Methode und Design	95
9.3.1	Instrumente	95
9.3.2	Stichprobe	98
9.4	Ergebnisse	99
9.4.1	Forschungsfrage 1: Förderung des Einsatzes der 3D-Druck-Technologie im Mathematikunterricht durch (Kurz-)Fortbildungen	99
9.4.2	Forschungsfrage 2: Angleichung interner Barrieren durch (Kurz-)Fortbildungen	99
9.5	Diskussion und Implikationen.....	101
9.6	Fazit.....	104
10	Diskussion und Implikationen.....	107
10.1	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	107
10.1.1	Rahmenbedingungen von Industrie und Schule	107
10.1.2	Entwicklung der Unterrichtskonzepte	109
10.1.3	Dissemination der Unterrichtskonzepte.....	110
10.2	Implikationen für die Forschung.....	111
10.2.1	Lehrkräftefortbildungen.....	111
10.2.2	Designprinzipien.....	112
10.3	Implikationen für die Praxis.....	117
10.4	Limitationen	118
11	Fazit und Ausblick.....	121
A	Darstellung der konzeptuellen Rahmenbedingungen des Projekts	i
B	Theoretisches Unterrichtskonzept „Zusammengesetzte Körper“.....	xvii
C	Erster Evaluierungszyklus	xxiii
D	Vorstellung des Unterrichtskonzepts für die Industrie-Vertreter:innen	xxvii
E	Praktisches Unterrichtskonzept „Zusammengesetzte Körper“.....	xxix
F	Summative Mehrwertsevaluierung der Interventionsgruppe	xlvi
	Abbildungsverzeichnis.....	lv
	Tabellenverzeichnis	lvii
	Literaturverzeichnis	lxi
	Eidesstattliche Erklärung	lxxv

1 EINLEITUNG

Eine zentrale Konsequenz der voranschreitenden Digitalisierung, die in den letzten Jahrzehnten viele relevante Technologien hervorgebracht hat, ist ihr Einfluss auf die verschiedenen Domänen der Lebenswelt. So nimmt die Digitalisierung nicht nur Einfluss auf den Alltag aller Altersgruppen, sondern vor allem auch auf die Arbeitswelt: Neben Informationstechnologien, wie dem Computer, werden zunehmend Technologien in Produktionsprozessen eingesetzt (u. a. Cammarano et al., 2024) und vormals analoge oder mechanische Produktionsprozesse durch digitale, automatisierte Abläufe ersetzt (z. B. Kaiser et al., 2021; BMAS, 2016). Eine Folge daraus ist, dass die Relevanz digitaler Kompetenzen im Arbeitsleben zunimmt und sich die erwarteten Kompetenzprofile (zukünftiger) Arbeitnehmer:innen mit der fortschreitenden Digitalisierung stetig verändern (z. B. Grundke et al., 2017; Hermeier et al., 2019).

Diese Anpassung der Kompetenzprofile wird unter anderem durch Veränderungen in Ausbildungen oder Studiengängen adressiert (vgl. u. a. Schall & Howe, 2024; Saner, 2022). Frühzeitige Informationen bereits vor Ausbildungs- bzw. Studienbeginn zu Inhalten der digitalen Arbeitswelt können dabei die Entscheidungsprozesse von Schüler:innen zur Berufs- oder Studienwahl unterstützen. Folglich veröffentlichte die Kultusministerkonferenz (KMK) 2017 eine Empfehlung zur Umsetzung von Maßnahmen zur Berufsorientierung und -vorbereitung von Schüler:innen an den allgemeinbildenden Schulen. Die Umsetzung der Maßnahmen gelingt jedoch neben den allseits bekannten Berufspraktika eher unzureichend (Barlovic et al., 2022; Giek & Seifried, 2023). Innerschulische Angebote im regulären Schulunterricht könnten hier eine vielversprechende Alternative zu Maßnahmen mit Projekt- oder außerschulischem Charakter darstellen, da die Schüler:innen in einem solchen Vorgehen im alltäglichen Fachunterricht über ihre Bildungsbiographie hinweg mit Aspekten der digitalen Arbeitswelt in Berührung kommen und dadurch exemplarische Einblicke erhalten, die die individuelle Berufsorientierung und Berufswahl unterstützen können (u. a. Wakefield, 2015; Reißig, 2023). Diese innerschulischen Angebote erfordern entsprechend entwickelte Unterrichtskonzepte, die relevante Aspekte der digitalen Arbeitswelt oder einzelne Berufe authentisch, sinnvoll und zielführend in den bestehenden curricularen Fachunterricht integrieren.

Die vorliegende Arbeit soll die exemplarische Entwicklung und Implementation solcher Unterrichtskonzepte sowie deren anschließende Dissemination aufzeigen. Dazu wurde eine relevante Technologie der digitalen Arbeitswelt (hier: 3D-Druck) für den regulären Unterricht eines Kernfachs, das Schüler:innen über ihre gesamte Bildungsbiographie in erhöhter Stundenzahl besuchen (hier: Mathematik) ausgewählt und mittels eines Design-based-research-Ansatzes (vgl. Educational Design Research,

Einleitung

Plomp & Nieveen, 2013) aufbereitet. Die Grundlage für die Entwicklung der Unterrichtskonzepte bilden dabei zwei Rahmenbedingungsstudien, die einerseits die Rahmenbedingungen der Nutzung des 3D-Drucks in der digitalen Arbeitswelt und andererseits die Gelingensbedingungen für eine Nutzung des 3D-Drucks im regulären Mathematikunterricht aus Sicht der Mathematiklehrkräfte aufzeigen. Dem Entwicklungsprozess wurde der Ansatz des Lernkontextes zugrunde gelegt, durch den die Inhalte als Vehikel für fachliches Lernen in den regulären Fachunterricht integriert werden können. Die entwickelten Unterrichtskonzepte wurden anschließend mithilfe eines prototypischen Unterrichtskonzeptes in fünf Zyklen evaluiert und abschließend jeweils optimiert. Auf Basis der Evaluationszyklen wurden im Einklang mit dem Vorgehen des Educational Design Research Designprinzipien formuliert, die Hinweise für eine Generalisierbarkeit der entwickelten Unterrichtslösungen aufzeigen sollen. Um einen breiten Einsatz an Schulen zu ermöglichen wurden in einem letzten Schritt Fortbildungen für Lehrkräfte angeboten, in denen der Ansatz und die erstellten Unterrichtskonzepte und Zusatzmaterialien vorgestellt wurden. Dabei wurden die Fortbildungen zusätzlich mittels Prä-Post-Follow-up-Befragungen begleitet, die Aufschluss über den Effekt der eher kurzen Auseinandersetzung mit dem 3D-Druck als Lernkontext im Mathematikunterricht und der anschließenden Nachbereitung mit Hilfe der vorliegenden Unterrichtsmaterialien auf interne Barrieren der Lehrkräfte und die Nutzung der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext geben.

Die vorliegende Arbeit nimmt Bezug auf einen binationalen, deutsch-dänischen Kontext, sodass zwei Staaten mit verschiedenen Digitalisierungsgraden betrachtet werden können: So befand sich Dänemark 2022 mit einem Score von 69,3 auf Rang 2 des Digital Economy and Society Index (DESI), der den Grad der Digitalisierung in jedem Land der Europäischen Union anhand verschiedener Kriterien misst. Deutschland (Rang 13) lag mit seinem Score von 52,9 hingegen nur leicht über dem EU-Durchschnitt (52,3) (European Commission, 2022). Wenig überraschend zeigt sich der unterschiedliche Digitalisierungsgrad auch im schulischen Kontext. So weist die Studie ICILS 2018 (Eickelmann et al., 2019) auf einen deutlich höheren Digitalisierungsgrad dänischer Schulen als deutscher Schulen hin. Zwar hat sich der Digitalisierungsgrad deutscher Schulen nicht zuletzt aufgrund der Folgen der Covid19-Pandemie verbessert, jedoch zeigt auch der Länderindikator 2021 (Yotyoding & Lorenz, 2022), dass der digitale Wandel deutscher Schulen u. a. im Hinblick auf Ausstattung, Supportstrukturen und der Fort- und Weiterbildung der Lehrkräfte noch nicht sehr weit fortgeschritten ist.

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit folgt dem kanonischen Schema. So werden zunächst der theoretische Hintergrund sowie die genutzte Methode (Educational Design Research) vorgestellt. Im Anschluss folgt die Darstellung der acht durchgeführten kleineren und größeren Studien und abschließend deren Diskussion. Die Arbeit ist kumulativ aufgebaut und die Artikel sind aus Gründen der besseren Lesbarkeit teilweise eingebettet (Rahmenbedingungsstudien in Kapiteln 4 und 5 sowie Disseminationsstudie in Kapitel 9) beziehungsweise dieser Arbeit im Anhang beigelegt (Darstellung der konzeptuellen Rahmenbedingungen des Projekts und summative Mehrwerte-evaluierung der Interventionsgruppe).

2 THEORETISCHER HINTERGRUND

In diesem Kapitel werden zunächst die theoretischen Grundlagen der durchgeführten Studien sowie das Paradigma des Educational Design Research dargestellt. Dazu werden zum einen die Rahmenbedingungen der digitalen Arbeitswelt und zum anderen die Rahmenbedingungen der Schule für die Einbindung digitaler Technologien in den Fachunterricht dargestellt. Durch die fortschreitende Digitalisierung haben sich die Rahmenbedingungen beider Domänen digital transformiert. Der Abschnitt 2.1 fokussiert daher die Veränderungen in der Arbeitswelt und arbeitet die 3D-Druck-Technologie als relevante exemplarische digitale Technologie heraus. Die 3D-Druck-Technologie, ihre Anwendung und ihre Anwendungsfelder werden hier kurz dargestellt. Insbesondere wird auf die Mathematik hinter den Prozessen der Technologie eingegangen. Im Abschnitt 2.2 werden dann die schulischen Rahmenbedingungen vorgestellt. Dabei werden die Bildungsziele in der digitalisierten Welt sowie die Relevanz der Berufsorientierung und Berufsvorbereitung in der allgemeinbildenden Schule hervorgehoben. Anschließend werden im Sinne des didaktischen Dreiecks zum einen Gelingensbedingungen für den Einsatz digitaler Technologien auf Seiten der Lehrkräfte und zum anderen technologiebezogene Einstellungen der Lernenden beleuchtet. Der Abschnitt 2.3 fasst dann die beiden dargestellten Bereiche zusammen und arbeitet Forschungsdesiderate im Zusammenhang mit der Verknüpfung der digitalen Arbeitswelt und dem regulären Schulunterricht heraus. Im letzten Abschnitt 2.4 wird kurz der zugrunde liegende Ansatz des Education Design Research erläutert, um ausgehend von den Rahmenbedingungen der digitalen Arbeitswelt und den Rahmenbedingungen der Schule geeignete Unterrichtskonzepte zur Förderung fachlicher Kompetenzen und zur Berufsorientierung und -vorbereitung zu entwickeln.

2.1 Rahmenbedingungen der digitalen Arbeitswelt

Um die Rahmenbedingungen der digitalen Arbeitswelt mit besonderem Fokus auf die Bedeutung der 3D-Druck-Technologie zu analysieren, wird in dem folgenden Kapitel kurz auf die digitale Transformation des Arbeitsmarktes sowie die Technologie an sich eingegangen. Der Fokus dieses Abschnitts liegt auf der Begründung der Auswahl der 3D-Druck-Technologie als exemplarische relevante digitale Technologie der (zukünftigen) Arbeitswelt.

2.1.1 Digitalisierung der Arbeitswelt

Die Digitalisierung der Arbeitswelt ist mittlerweile kein neues Phänomen mehr. Der Begriff der Digitalisierung beschreibt dabei in Anlehnung an Deeken und Fuchs (2018) die Ablösung oder Veränderung analoger Prozesse durch den Einsatz von

Theoretischer Hintergrund

Technologie. So ist beispielsweise der Computer bereits seit vielen Jahren fester Bestandteil der meisten Berufsfelder und ist aus dem Arbeitsalltag nicht mehr wegzudenken. Die Integration des Computers in industrielle Prozesse wird allgemein als Industrie 3.0 (Beginn ca. 1960er Jahre) kategorisiert. Diesem Entwicklungsschritt gingen die Industrie 1.0 (Mechanisierung der Produktion mittels Maschinen, die mit Wasser und Dampf betrieben werden, ab ca. 1780) und 2.0 (Einführung der Elektrizität, Akkord- und Fließbandarbeit, ab ca. 1870) voraus (Harwardt & Schmutte, 2020; Demir et al., 2019). Mit dem Übergang zu der Industrie 4.0 (Beginn ca. 2010) rückt mit der stetigen Weiterentwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologie das Internet und die damit verbundenen Möglichkeiten sowie Vor- und Nachteile in den Fokus (BMW, 2019; Demir et al., 2019). Für die Industrie 4.0 sind dabei drei Handlungsfelder zentral: *Souveränität*, *Interoperabilität* und *Nachhaltigkeit*. Das Handlungsfeld *Souveränität* fokussiert die Freiheit der Akteure des Marktes. Damit verbunden sind Entwicklungen hinsichtlich der digitalen Infrastruktur, der IT-Sicherheit und der eingesetzten Technologien. *Interoperabilität* beschreibt die flexible Vernetzung der Akteure und beinhaltet die Schaffung von Standards und regulatorischen Rahmen sowie dezentraler Systeme. Das Handlungsfeld *Nachhaltigkeit* spiegelt eine der zentralen Zukunftsthemen der heutigen Gesellschaft wider. Dazu zählen neben dem Klimaschutz auch die gesellschaftliche Teilhabe sowie die Eckpfeiler des Bildungs- und Beschäftigtenniveaus (BMW, 2019). Eine Folge dieser Entwicklung ist somit die Entstehung einer gewissen Eigendynamik in den verschiedenen Bereichen der Arbeitswelt, in denen digitale Technologien stetig und kontinuierlich weiterentwickelt und Innovationszyklen verkürzt und aktualisiert werden (Harwardt & Schmutte, 2020). Die Veränderung der Nutzungstechnologien und der entstehenden Produkte geht einher mit einer Veränderung von Geschäftsmodellen und insbesondere auch von beruflichen Strukturen, Tätigkeiten und Anforderungsprofile an (zukünftige) Arbeitnehmer:innen über die verschiedenen Branchen hinweg (z. B. Grundke et al., 2017; Hermeier et al., 2019). Durch die Veränderung der Tätigkeitsfelder sowie der einzelnen Tätigkeiten von analogen und/oder mechanischen Prozessen hin zu automatisierten Prozessen (BMAS, 2016), entwickelt sich die Rolle der:des Arbeitnehmer:in hin zur Problemlöser:in, Entscheider:in und Innovator:in (BMAS, 2020; Härtwig & Saponova, 2020). Damit müssen (zukünftige) Arbeitnehmer:innen für die digitale Arbeitswelt anderes Wissen mitbringen oder sich erarbeiten als zuvor. Zu diesen „neuen“ Wissensbereichen gehören neben dem Wissen über digitale Technologien im jeweiligen Arbeitsprozess auch Kompetenzen im Umgang mit diesen Technologien.

Neben den Informations- und Kommunikationstechnologien rücken dabei insbesondere in Produktionsprozessen, aber auch in kreativen, dienstleistungsnahen und administrativen Bereichen der Arbeitswelt spezielle digitale Nutzungstechnologien in den Vordergrund (Calvino et al., 2018). Laut einer Studie des Branchenverbandes der deutschen Informations- und Telekommunikationsbranche (BITKOM) aus dem Jahr 2023 wird insbesondere Big Data, Robotik, dem Internet sowie der fünften Mobilfunkgeneration, autonomen Fahrzeugen, dem 3D-Druck und Künstlicher Intelligenz (KI) eine hohe Bedeutung für die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen in der Zukunft zugeschrieben (BITKOM, 2023).

Die weitere Verbreitung von KI wird derzeit bereits als der Übergang zu der Industrie 5.0 bezeichnet (Becker et al., 2023). Dabei werden die Entwicklungen und Technologien der Industrie 4.0 weitergeführt und optimiert, jedoch mit zusätzlichen Schwerpunkten: Im erweiterten Fokus stehen die Mensch-Maschine-Kollaboration (Mensch-Zentrierung), die KI und die Resilienz. In der Industrie 5.0 steht also nicht Weiterentwicklung der Technik im Vordergrund, sondern der Mensch mit seinen Bedürfnissen und seiner Beziehung zu den Maschinen. Zudem wird der Nachhaltigkeit weiterhin eine hohe Relevanz zugeschrieben (Becker et al., 2023).

2.1.2 Die 3D-Druck-Technologie

Die 3D-Druck-Technologie ist eine der „neueren“ Technologien, die zunehmend auf dem digitalen Arbeitsmarkt eingesetzt werden. Ihr Einsatz beschränkt sich dabei nicht nur auf reine Produktionsprozesse, sondern umfasst u. a. auch Planungs- und Prototypingprozesse. Unter dem Überbegriff „3D-Druck“ werden dabei verschiedene Technologien zusammengefasst, deren Gemeinsamkeit der additive Aufbau von Objekten ist (Fastermann, 2014; Hagl, 2015): Die gesammelten Technologien zeichnen sich durch einen schichtweisen Aufbau des zu erzeugenden Objekts aus, z. B. durch Verkleben oder Versintern von Material mit vorherigen Schichten. Im Gegensatz dazu werden Objekte mittels konventioneller Produktionsverfahren subtraktiv (z. B. Fräsen) oder formativ (z. B. Gießen) hergestellt. Wie bei konventionellen Produktionsprozessen geht dem Druckprozess ein digitaler Entwicklungsprozess voraus. Hierbei wird mit Hilfe eines CAD-Programms (*computer aided design*) ein digitales dreidimensionales Modell erstellt. Diese Konstruktion kann mittels direkter, parametrischer oder skriptbasierter Modellierung erfolgen. Im Zuge der Weiterentwicklung sowie der Verbreitung von 3D-Druck-Technologien gibt es mittlerweile auch 3D-Scanner, die ein reales Objekt in ein dreidimensionales digitales Modell überführen, oder online zugängliche Bibliotheken, die (teilweise kostenlos) vorgefertigte digitale Modelle anbieten. Im Anschluss an den Modellierungsvorgang wird das digitale Modell mittels Tesselierung oder Triangulierung in einen universell verwendbaren Code transformiert, der schließlich in einer Slicer-Software für den Druckprozess final aufbereitet wird (s. u.).

Im Sinne der Handlungsfelder der Industrie 4.0 kann die 3D-Druck-Technologie als relevante Technologie kategorisiert werden: So werden zunehmend neue Märkte durch die Technologie erschlossen (Souveränität), neben den offensichtlichen Einsatzmöglichkeiten im Prototyping wird die 3D-Druck-Technologie mittlerweile auch im Hausbau, für Prothesen und in vielen anderen Bereichen eingesetzt. Hinsichtlich der Interoperabilität leistet die 3D-Druck-Technologie an sich keinen Beitrag. Allerdings können Modelle, die von Unternehmen oder Privatpersonen für die 3D-Druck-Technologie konstruiert wurden im Sinne der Interoperabilität über digitale Plattformen ausgetauscht oder zugänglich gemacht werden. Schließlich fällt bei der 3D-Druck-Technologie im Gegensatz zu herkömmlichen subtraktiven oder formativen Produktionsverfahren weniger Abfall als Nebenprodukt bei der Herstellung eines Objekts an, so dass die Technologie einen wichtigen Beitrag im Sinne der Nachhaltigkeit leisten kann.

Theoretischer Hintergrund

In einer 2018 und 2019 durchgeführten Studie gaben 25 % der 314 befragten dänischen produzierenden Unternehmen an, die 3D-Druck-Technologie zu nutzen (Blickfeldt et al., 2020). Im Jahr 2021 gaben 44 % der 551 befragten deutschen Industrieunternehmen an, dass die 3D-Druck-Technologie in ihrem Unternehmen eingesetzt wird, weitere 42 % gaben an, den Einsatz der Technologie zu diskutieren oder bereits zu planen (BITKOM, 2021). Um den Digitalisierungsgrad der Wirtschaft zu erfassen, wurden im Jahr 2023 zudem 602 Wirtschaftsunternehmen in Deutschland nach der Nutzung verschiedener digitaler Technologien befragt. Hier gaben 23 % der befragten Wirtschaftsunternehmen an, dass die Technologie in ihrem Unternehmen eingesetzt wird (BITKOM, 2023). Diese Ergebnisse deuten insbesondere darauf hin, dass die 3D-Druck-Technologie eher in Industrieunternehmen eingesetzt wird, aber auch weitere Anwendungsfelder in anderen Bereichen der Arbeitswelt findet. Somit kann bereits heute von einer breiten Nutzung der Technologie gesprochen werden, die sich in Zukunft noch ausweiten könnte. Unter anderem wurde die Technologie in den letzten Jahren, dahingehend weiterentwickelt, dass besonders funktionelle (z. B. Prothesen im Bereich der Medizintechnik oder Knorpel mittels Bio-Printing), besonders kleine (z. B. kleinteilige Ersatzschrauben mittels Pulverdruck) aber auch besonders große Objekte (z. B. mehrstöckige Häuser mittels Contour-Crafting) gedruckt werden können (Fastermann, 2014).

Der Einsatz von 3D-Druck-Technologien bietet für die Arbeitswelt eine Reihe von Vorteilen: Durch die verschiedenen Modellierungsmöglichkeiten kann eine Idee relativ schnell in ein gedrucktes Objekt umgesetzt werden, auch wenn der technologiebezogene Kenntnisstand unterschiedlich ist (Fastermann, 2014). Darüber hinaus ist die 3D-Druck-Technologie insbesondere für die Bereiche *customization* und *personalization*¹ relevant, da individuelle, situationsabhängige Änderungen im Gegensatz zu herkömmlichen Produktionsprozessen schnell umgesetzt werden können. Ein weiterer wichtiger Vorteil ist die Möglichkeit der *On-Demand-Produktion*, wodurch Lagerflächen eingespart werden können.

Um die Prozesse des 3D-Drucks zu erläutern, werden im Folgenden die mathematischen Grundlagen des 3D-Drucks dargestellt, nicht jedoch die technischen Verfahren oder andere Aspekte des 3D-Drucks, wie z. B. Druckmaterialien. Die technischen Aspekte des Druckverfahrens werden hier jedoch zur Strukturierung verwendet. So kann der 3D-Druck-Prozess in vier Teilprozesse unterteilt werden, die nacheinander (ggf. mit Iterationen) von Anwender:innen durchlaufen werden: Die Modellierung, die Tessellierung bzw. Triangulierung, das Slicing und der abschließende Druckprozess.

¹ Bei der *Customization* geht es darum, der Anwender:in die Kontrolle über das Erlebnis oder das Endresultat zu geben. Dieser Bereich bezieht sich also auf die explizite individuelle Anpassungsfähigkeit eines Produkts durch die Anwender:in oder die Käufer:in. *Personalization* hingegen ist die Zuschneidung des Erlebnisses oder des Endresultats auf die Anwender:in und umfasst dementsprechend die implizite Anpassung eines Produkts durch ein (dienstleistendes) Unternehmen an die Bedürfnisse der Anwender:in.

Der Modellierungsprozess

Bevor Objekte im 3D-Drucker ausgedruckt werden können, müssen digitale dreidimensionale Modelle der Objekte vorliegen (s. Abb. 2.1). Dazu können reale Objekte mit einem 3D-Scanner in ein digitales Modell des realen Objekts überführt werden. Steht kein reales Modell zur Verfügung, können fertige Modelle im Internet gekauft oder kostenlos heruntergeladen werden (z. B. über thingiverse.com). Eigene Modelle können mit Hilfe von Modellierungssoftware selbst konstruiert werden. Dabei können verschiedene Modellierungsverfahren zum Einsatz kommen. Derzeit wird zwischen direkter, parametrischer und skript-basierter Modellierung unterschieden (Dilling & Witzke, 2019).

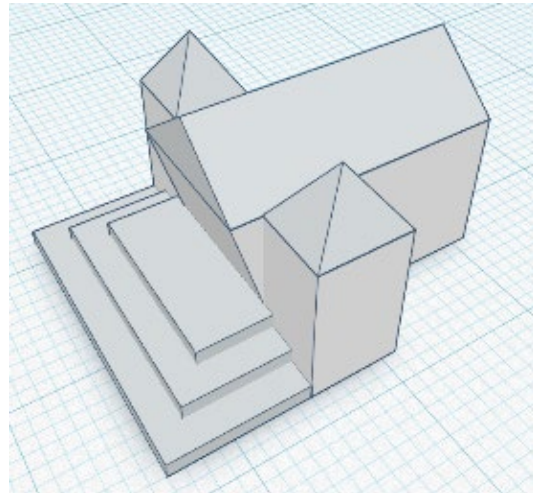


Abbildung 2.1: Modellierung eines Hauses mittels der direkten Modellierungssoftware Tinkercad®.

Diesen drei Modellierungsarten liegen unterschiedliche mathematische Inhalte zugrunde: Während die ersten beiden Modellierungsarten geometrisch sind im Sinne der euklidischen Geometrie, basiert die dritte Art der Modellierung auf informatischen Elementen und soll hier nur kurz beschrieben werden.

Bei der direkten Modellierung werden geometrische Objekte auf einer digitalen Arbeitsfläche platziert und transformiert. Dabei können die Objekte verschoben, skaliert und rotiert werden. Die Verfügbarkeit von verwendbaren geometrischen Objekten und Transformationsmöglichkeiten hängen von der verwendeten Software ab. Eine Software, die auf diese Modellierungsart zurückgreift ist Tinkercad® (Autodesk, 2024). In dieser Software können dreidimensionale Figuren über ein Menü von geometrischen Objekten per *Drag and Drop* auf einer vorhandenen Arbeitsfläche, die der Druckfläche eines 3D-Druckers nachempfunden ist, konstruiert werden. Die Seitenlängen und Höhen der einzelnen Figuren können dabei individuell angepasst werden. Das Verfahren zur Konstruktion komplexerer zusammengesetzter Körper basiert bei dieser Art der Modellierung auf den Booleschen Operatoren (Durchschnitt, Vereinigung, Komplement), die in Tinkercad® über die Befehle *Gruppieren* (Vereinigung) und *Bohren* (Komplement) verwendet werden können.

Bei der parametrischen Modellierung wird ein dreidimensionales Modell durch Extrusion eines zweidimensionalen Objekts konstruiert. Dabei wird zunächst eine zweidimensionale Skizze erstellt, die alle Lagebeziehungen der Einzelteile sowie die Maßangaben enthält. Diese Skizze wird dann in einem zweiten Schritt durch Parallelverschiebung (Prisma) oder durch eine Kombination aus Parallelverschiebung und Skalierung (geometrisches Objekt mit einer Spitze) zu einem dreidimensionalen Volumen extrudiert. Ein anderes Vorgehen dieser Modellierungsart ist das Rotieren einer zuvor erstellten zweidimensionalen Kurve oder Skizze um eine definierte Rotationsachse. Durch die vorherige Definition der Lagebeziehungen und Bemaßungen ist das resultierende dreidimensionale Objekt in beiden Vorgehensweisen bis auf die Rotation

Theoretischer Hintergrund

eindeutig definiert. Eine weitere Bearbeitung des Körpers im Anschluss an die Extrusion ist durch das Hinzufügen weiterer zweidimensionaler Skizzen an den Seitenflächen des erzeugten dreidimensionalen Objekts und der anschließenden Extrusion möglich. Eine Software, die diese Art der Modellierung verwendet und im Schulkontext bereits bekannt ist, ist GeoGebra (2024).

Die dritte Modellierungsart ist das skriptbasierte Modellieren. Hierbei wird das dreidimensionale digitale Modell anhand von Befehlen, wie Variablen, Loops oder logischen Operatoren beschrieben. Der Komplexitätsgrad des genutzten Codes kann hier von Blockprogrammierung bis zu den gängigen Codesprachen variieren. Die grundlegende Mathematik bleibt in dieser Modellierungsart im Sinne einer Blackbox der Anwender:in unzugänglich. Das Resultat der Modellierung ist dann ein digitales dreidimensionales Objekt ohne mathematische Beschreibung.

Trotz der verschiedenen Vorgehensweisen haben die drei Modellierungsarten gemein, dass jeweils ein digitales dreidimensionales Modell durch Vereinigungs- und Differenzmengen konstruiert und transformiert wird, das basierend auf Achsen- oder Punktspiegelung(en) im dreidimensionalen Raum gespiegelt oder gedreht, beziehungsweise basierend auf der zentrischen Streckung maßstabsgetreu vergrößert oder verkleinert werden kann.

Der Tesselierungs-/Triangulierungsprozess

Um die unabhängig von der genutzten Art der Modellierung im Modellierungsschritt konstruierte CAD-Datei weiter verwenden zu können, wird sie in ein anderes, universell verarbeitbares Format konvertiert. Zur Erzeugung einer Codestruktur, die das dreidimensionale Modell eindeutig beschreibt und damit mathematisch handhabbar macht, wird dazu auf die Tesselierung oder Triangulierung zurückgegriffen (vgl. Abb. 2.2 für eine bildliche Darstellung einer Triangulierung). Zur mathematisch eindeutigen Beschreibung des zuvor konstruierten Modells wird dieses in einem virtuellen Druckraum positioniert und die Oberfläche des Objekts durch ein Netz aus ebenen Flächen (Tessellierung) beschrieben. Ein Spezialfall der Tessellierung ist die Beschreibung der Oberfläche mittels ebener Dreiecksflächen (Triangulierung). Da in der Anwendung der 3D-Druck-Technologie fast ausschließlich das STL-Format (*Standard Triangulation Language*), das der Triangulierung zuzuordnen ist, verwendet wird, soll in der vorliegenden Arbeit nur der Begriff Triangulierung verwendet werden. Bei einer Triangulierung² sind die ebenen Dreiecke des Dreiecksnetzes, das die Oberfläche überdeckt, gerade so definiert,

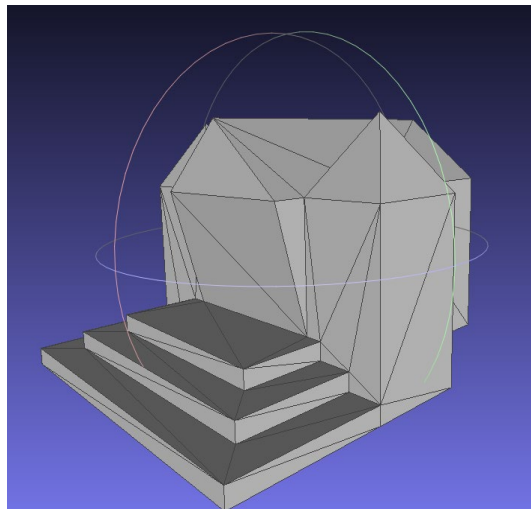


Abbildung 2.2: Darstellung einer Triangulierung des zuvor konstruierten Hauses.

² Nach Edwin Moise (1952) ist jede Mannigfaltigkeit bis zur dritten Dimension stets triangulierbar.

dass (a) kein Eckpunkt eines Dreiecks auf einer Seitenfläche eines anderen Dreiecks liegt, (b) sie sich nicht überlappen und (c) keine Lücken zwischen den Dreiecken bestehen. Im STL-Code wird das Dreiecksnetz im \mathbb{R}^3 mathematisch eindeutig durch die Angabe von vier Parametern aus \mathbb{R}^3 beschrieben. Die Parameter umfassen die drei Eckpunkte sowie die Flächennormale für jedes Dreieck des Dreiecksnetzes, wobei die Flächennormale festlegt, welche Seite der Dreiecksfläche innen oder außen ist. Auch wenn der STL-Code das Objekt im \mathbb{R}^3 mathematisch eindeutig beschreibt, ist eine Triangulierung selbst nicht eindeutig: Der Startpunkt eines Dreiecksnetzes sowie die Form, Größe und Anzahl der zu verwendenden Dreiecke sind nicht vorgegeben, sondern werden bei der Konvertierung in Abhängigkeit von der möglichen Dateigröße sowie dem gewünschten Grad der Druckauflösung beliebig gesetzt. Dadurch gibt es durchaus unterschiedliche Möglichkeiten das triangulierende Dreiecksnetz zu wählen und es können sich zwangsläufig unterschiedliche Triangulierungen ergeben.

Die Triangulierung eines Quaders mit den Seitenlängen $a = 1$, $b = 2$, $c = 3$ kann beispielsweise wie in Abbildung 2.3 dargestellt im STL-Code beschrieben werden. Der Code besteht aus mehreren Blöcken, die durch verschiedene Befehle eingeleitet und abgeschlossen werden. Jeder Block beschreibt eine Dreiecksfläche des Netzes mathematisch eindeutig in einem kartesischen Koordinatensystem und liefert dazu Informationen über die drei Eckpunkte der jeweiligen Dreiecksfläche sowie die Flächennormale.

```

1.    solid STL file
2.
3.    facet normal -1 0 0
4.      outer loop
5.        vertex 0 2 3
6.        vertex 0 2 0
7.        vertex 0 0 0
8.      endloop
9.    endfacet
10.   facet normal -1 0 0
11.     outer loop
12.       vertex 0 0 0
13.       vertex 0 0 3
14.       vertex 0 2 3
15.     endloop
16.   endfacet
17.   facet normal 0 -1 0
18.     outer loop
19.       vertex 0 0 3
20.       vertex 0 0 0
21.       vertex 1 0 0
22.     endloop
23.   endfacet
24.   facet normal 0 -1 0
25.     outer loop
26.       vertex 1 0 0
27.       vertex 1 0 3
28.       vertex 0 0 3
29.     endloop
30.   endfacet
31.
32.   facet normal 1 0 0
33.     outer loop
34.       vertex 1 0 3
35.       vertex 1 0 0
36.       vertex 1 2 0
37.     endloop
38.   endfacet
39.   facet normal 1 0 0
40.     outer loop
41.       vertex 1 2 0
42.       vertex 1 2 3
43.       vertex 1 0 3
44.     endloop
45.   endfacet
46.   facet normal 0 1 0
47.     outer loop
48.       vertex 1 2 3
49.       vertex 1 2 0
50.       vertex 0 2 0
51.     endloop
52.   endfacet
53.   facet normal 0 1 0
54.     outer loop
55.       vertex 0 2 0
56.       vertex 0 2 3
57.       vertex 1 2 3
58.     endloop
59.   endfacet
60.   outer loop
61.     vertex 1 2 3
62.     vertex 0 2 3
63.     vertex 0 0 3
64.   endloop
65. endfacet
66. facet normal 0 0 1
67.   outer loop
68.     vertex 0 0 3
69.     vertex 1 0 3
70.     vertex 1 2 3
71.   endloop
72. endfacet
73. facet normal 0 0 -1
74.   outer loop
75.     vertex 1 0 0
76.     vertex 0 0 0
77.     vertex 0 2 0
78.   endloop
79. endfacet
80. facet normal 0 0 -1
81.   outer loop
82.     vertex 0 2 0
83.     vertex 1 2 0
84.     vertex 1 0 0
85.   endloop
86. endfacet
87.
88. endsolid STL file

```

Abbildung 2.3: STL-Code eines Quaders mit den Seitenlängen $a = 1$, $b = 2$, $c = 3$, das durch den erstellten Code mathematisch eindeutig in einem dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem platziert ist. Die Festlegung eines Eckpunktes auf den Ursprung $(0,0,0)$ ist dabei nicht notwendig.

Aufgrund der ebenen Eigenschaft der Dreiecke des Dreiecksnetzes stellt die Triangulierung gekrümmter Oberflächen eine Schwierigkeit dar, da diese nicht exakt durch ebene Dreiecke beschrieben werden können. Daher wird bei der Triangulierung

Theoretischer Hintergrund

gekrümmter Oberflächen mit Approximationen gearbeitet. Das Approximationsverfahren basiert auf der Leibnizschen Vorstellung, dass jede Kurve aus unendlich vielen unendlich kleinen Strecken zusammengesetzt ist und somit durch einen Polygonzug approximiert werden kann. Das heißt, je größer die Anzahl der Dreiecke, desto genauer wird die Krümmung des Objekts abgebildet. Allerdings steigt mit der Anzahl der Dreiecke auch der Speicherbedarf.

Nach der Triangulierung des Objekts ist in der Regel ein Überprüfungsschritt sinnvoll. Dieser soll hier nur kurz beschrieben werden: Damit ein Objekt gedruckt werden kann, muss es ein geschlossenes Volumen sein (Fastermann, 2014). Darüber hinaus kann die Überprüfung aufzeigen, ob u. a. die formatierte Einheit oder die Orientierung der Außenflächen im Triangulierungscode korrekt angegeben wurde, das heißt, ob die angegebenen Normalenvektoren einheitlich orientiert sind und im Ganzen einheitlich Außen- und Innenflächen beschreiben. Die Folgen von Orientierungsfehlern können bis hin zur Undruckbarkeit des Modells führen (Fastermann, 2014).

Der Slicingprozess

Die STL-Datei kann nun in Computerprogrammen weiterverarbeitet werden, der 3D-Drucker kann diese jedoch noch nicht verarbeiten. Daher muss die Datei für den 3D-Druck weiter aufbereitet werden. Für den Druckprozess benötigt der 3D-Drucker eine Reihe von Befehlen, die angeben, wann der Drucker mit welcher Bewegung, wie viel Material extrudieren soll. Um die STL-Datei in ein solches Format umzuwandeln, wird eine Slicer-Software verwendet, in der das triangulierte Objekt in dünne Scheiben entsprechend dem endgültigen Druckvorgang geschnitten wird (vgl. Abb 2.4 für eine bildliche Darstellung eines gesliceten Objekts).

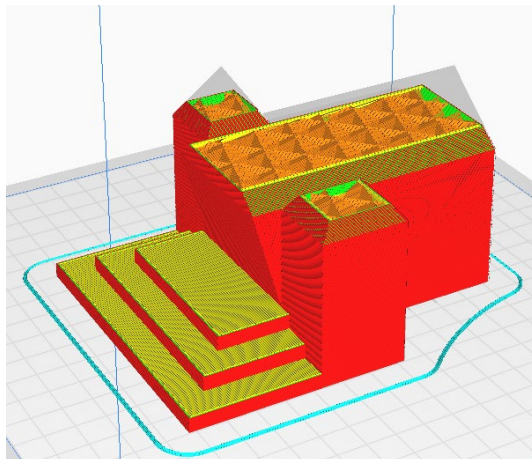


Abbildung 2.4: Darstellung des gesliceten Modells, in dem die Teilung in Scheiben sowie die innere Struktur sichtbar ist.

Der resultierende Code enthält dann unter anderem Steuerungsbefehle wie die Temperatur des Druckkopfes und die Beschreibung des Fahrtweges relativ zum Druckbett. Die Druckqualität kann durch diesen Schritt entscheidend verändert werden: Je dünner die einzelnen Druckschichten sind, desto höher die Auflösung und die Oberflächenqualität des Objekts. Andererseits führen dünne Druckschichten auch zu einem entsprechend höheren Zeitaufwand. Ähnlich wie bei der Triangulierung muss also auch hier eine Abwägung zwischen Oberflächenqualität bzw. Druckgenauigkeit und Druckzeit gefunden werden.

Der Druckprozess

Im abschließenden Druckprozess wird das zu druckende Objekt schrittweise in Schichten durch Verkleben, Versintern oder Verschweißen der vorherigen Schicht (also additiv) aufgebaut. Das Material wird dabei in Voxeln, das heißt dreidi-

mensionalen Bildpunkten (entspricht Pixeln im zweidimensionalen), aufgetragen (Fastermann, 2014).

Entsprechend den unterschiedlichen Anforderungen an die Endprodukte, gibt es mittlerweile verschiedene additive Technologien, die unter dem Oberbegriff 3D-Druck zusammengefasst werden. So wurden verschiedene Technologien entwickelt, die sich an unterschiedliche Faktoren wie z. B. Größe, Feinheits- und Stabilitätsgrad und gewünschte Materialien anpassen lassen. Einige 3D-Druck-Verfahren haben daher einen hohen Spezialisierungsgrad, andere einen geringeren. Typischerweise findet man in Privathaushalten oder Schu-

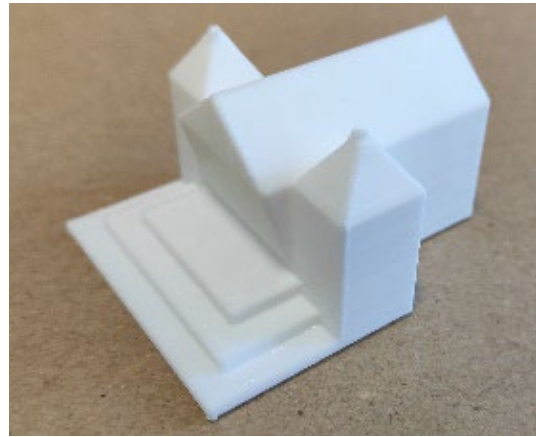


Abbildung 2.5: Mittels Filamentdruck 3D-gedrucktes dreidimensionales Modell des Hauses.

len einen Filamentdrucker (FDM/FFF-Druckverfahren, s. Abb 2.5), der mittels einer Filamentrolle, einer beheizbaren Düse und einem Druckbett ähnlich einer Heißklebepistole ein dreidimensionales Objekt erzeugt. Im industriellen Kontext verbreiteter sind pulverbasierte Druckverfahren und Druckverfahren auf Basis flüssiger Materialien. Bekannte Vertreter dieser Verfahren sind das Selektive Lasersintern (SLS) und die Stereolithografie (STL/SLA). Bei beiden 3D-Druck-Verfahren wird mittels eines in der x-y-Ebene beweglichen Lasers Pulver schichtweise verschmolzen bzw. flüssiges Material ausgehärtet (Fastermann, 2014). Weitere relevante Verfahren sind das Contour-Crafting, bei dem beton-ähnliches, schnell bindendes Material mittels eines großen Portalroboters mit entsprechend großer Extrusionsdüse schichtweise aufgetragen wird, um ein Gebäude zu errichten und das Bio-Printing, bei dem menschliche Zellen verwendet werden, um Gewebekonstruktionen in Hydrogel zu drucken (Fastermann, 2014).

2.2 Rahmenbedingungen der Schule

Nachdem die Relevanz der 3D-Druck-Technologie für die heutige und zukünftige Arbeitswelt aufgezeigt wurde, soll in dem folgenden Kapitel auf die Rahmenbedingungen in der Schule eingegangen werden. Dabei wird sich an dem didaktischen Dreieck orientiert, bei dem die Aspekte (a) institutionelle und curriculare Lernziele, (b) Lehrpersonen und (c) Lernende als Rahmenbedingungen für die Integration digitaler Technologien in den Mathematikunterricht in Beziehung gesetzt werden. Zunächst werden die institutionellen Bildungsziele im Zeitalter der Digitalisierung sowie die digitale Ausgangssituation an Schulen in Deutschland aufgezeigt. Anschließend wird kurz der aktuelle Stand der schulischen Berufsorientierung und -vorbereitung dargestellt, bevor die Gelingensbedingungen für den Einsatz digitaler Technologien im Mathematikunterricht analysiert werden.

2.2.1 Bildungsziele im Zeitalter der Digitalisierung

Der Bildungsauftrag der allgemeinbildenden Schulen ist heute breit gefächert. Das übergreifende Ziel ist es, die Schüler:innen zu mündigen Bürger:innen auszubilden (KMK, 2004). Dabei spielen fachliche, motorische, kreative, emotionale und soziale Kompetenzen ebenso eine Rolle wie die Befähigung zur kulturellen, gesellschaftlichen und beruflichen Teilhabe. Insbesondere sollen die Schüler:innen dazu befähigt werden, nach dem Abschluss ihrer Schulzeit den Übergang in das Arbeitsleben und damit verbundene Berufsausbildungen oder Studiengänge zu bewältigen. Diesem Ziel entsprechend veröffentlichte die Kultusministerkonferenz (KMK) 2017 eine Empfehlung zur Umsetzung von Möglichkeiten der beruflichen Orientierung für Schüler:innen (KMK, 2017a). In dieser Empfehlung wird die Relevanz von Möglichkeiten der beruflichen Orientierung, die sich über die gesamte Schullaufbahn der Lernenden erstrecken, hervorgehoben. Die aufgeführten Umsetzungsmöglichkeiten der Berufsorientierung lassen sich durch einen schulischen oder außerschulischen Projektcharakter vereinigen, der von der Kooperation mit beruflichen Schulen und Unternehmen bis zur Durchführung von Berufspraktika reicht. Ebenso nimmt die berufliche Bildung im Rahmen des Gutachtens der Ständigen Wissenschaftlichen Kommission der KMK (SWK) zur Digitalisierung im Bildungssystem eine wichtige Rolle ein. So empfiehlt die SWK unter anderem die Modernisierung der Bildungsziele und Curricula. Damit rücken neben extracurricularen außerschulischen bzw. innerschulischen Möglichkeiten der Berufsorientierung für eine Verstetigung der beruflichen Bildung von Schüler:innen zusätzlich unterrichtliche Lernsituationen im Rahmen des regulären Fachunterrichts in den Vordergrund. Dafür schlägt die SWK einen Abgleich der curricularen Vorgaben der Sekundarstufe I mit beruflichen Ausbildungscurricula vor (SWK, 2022).

Neben der Berufsorientierung und dem Erwerb von fachlichen Kompetenzen spielen digitale Kompetenzen eine zentrale Rolle in der allgemeinen Schulbildung. Hierfür wurden für die verschiedenen Bildungsphasen (Primar- sowie Sekundarstufe I und II) Handreichungen zur Förderung der Medienkompetenz der Schüler:innen herausgegeben, die zu fördernde mediale Schlüsselkompetenzen benennen (für Schleswig-Holstein vgl. MBWK SH, 2018). Die sechs definierten Kompetenzbereiche umfassen

- (1) das Suchen, Verarbeiten und Aufbewahren,
- (2) das Kommunizieren und Kooperieren,
- (3) das Produzieren und Präsentieren,
- (4) das Schützen und sicher Agieren,
- (5) das Problemlösen und Handeln sowie
- (6) das Analysieren und Reflektieren.

Grundgedanke der Handreichung ist die durchgängige Förderung digitaler Kompetenzen im regulären Fachunterricht. Das Ziel der medialen Bildung soll dabei aus institutioneller Sicht der Erwerb reflektierter medialer Kompetenzen sein, die Schüler:innen eine aktive Teilhabe im digitalen Zeitalter ermöglichen. Im Fachunterricht nehmen die fachlichen Kompetenzen die zentrale Rolle im Unterricht und bei der Überprüfung des Lernerfolgs der Schüler:innen ein. So konzentriert sich der Mathematikunterricht an

weiterführenden allgemeinbildenden Schulen auf die sieben prozessbezogenen mathematischen Kompetenzbereiche (KMK, 2022)

- (1) mathematisch argumentieren,
- (2) mathematisch kommunizieren,
- (3) Probleme mathematisch lösen,
- (4) mathematisch modellieren,
- (5) mathematisch darstellen,
- (6) mit mathematischen Objekten umgehen und
- (7) mit Medien mathematisch arbeiten;

sowie auf die fünf inhaltsbezogenen Kompetenzbereiche (Leitideen):

- (1) Zahl und Operation,
- (2) Größen und Messen,
- (3) Strukturen und funktionaler Zusammenhang,
- (4) Raum und Form und
- (5) Daten und Zufall.

Auf Grundlage des Spiralprinzips werden sowohl die prozessbezogenen als auch die inhaltsbezogenen Kompetenzbereiche durch die von der Fachkonferenz schulintern festgelegten curricularen Fachinhalte kontinuierlich wieder aufgegriffen und auf der Basis von Lernangeboten von den Lernenden weiterentwickelt. Dabei kommt dem Mathematikunterricht und damit den Mathematiklehrkräften ebenso wie den anderen Fachlehrkräften eine zentrale Bedeutung in der Integration von Lerngelegenheiten zur Förderung medialer Kompetenzen und der Auseinandersetzung mit berufsbezogenen Aspekten zu. Es ist insbesondere Aufgabe der Fachlehrkräfte, in ihrem regulären Fachunterricht authentische Kontaktmöglichkeiten zur digitalen Arbeitswelt zu schaffen, sodass die Schüler:innen frühzeitig und kontinuierlich mit einzelnen Berufen oder relevanten Aspekten der digitalen Arbeitswelt in Berührung kommen können (KMK, 2017a; SWK, 2022). Eine solche Implementierung von Lerngelegenheiten zur Berufsorientierung und zur Förderung digitaler Kompetenzen lässt eine höhere Wirksamkeit erwarten als punktuelle Angebote im Rahmen von Projektunterricht oder anderen einmaligen außerschulischen Lerngelegenheiten (vgl. Vergessenskurve oder ebbinghausche Kurve; Ebbinghaus, 1885). Durch die Verknüpfung relevanter Aspekte des digitalen Arbeitsmarktes bzw. einzelner Berufe mit curricularen Fachinhalten kann zudem folglich insbesondere auch die Relevanz der thematisierten Fachinhalte verdeutlicht werden. Dies stellt insbesondere für den Mathematikunterricht eine bedeutsame Chance dar, da das Fach trotz seiner Relevanz als Bezugsdisziplin für verschiedene Bereiche (z. B. Booss & Krickeberg, 1976; Deeken et al., 2020; Rohenroth et al., 2023b; Mulhern & Wylie, 2006) von vielen Personen, insbesondere auch Schüler:innen, subjektiv als kaum relevant wahrgenommen wird (Rohenroth et al., 2023a). Ein Ansatz diesem Relevanzparadox (Niss, 1994) zu begegnen, ist das Aufzeigen der Relevanz curriculärer mathematischer Fachinhalte im regulären Unterricht.

2.2.2 Digitalisierung: Ausgangssituation an deutschen Schulen

In den letzten Jahren wurden mittels der *International Computer and Information Literacy Study* (ICILS 2013, 2018, 2023) und *Schule digital – der Länderindikator* (2015, 2016, 2017, 2021) regelmäßige Bestandsaufnahmen zu dem technologischen Fortschritt an Schulen in Deutschland im internationalen bzw. nationalen Vergleich durchgeführt. Da die Ergebnisse von ICILS 2023 erst nach Abgabe dieser Arbeit im November 2024 veröffentlicht werden, sollen insbesondere die Daten aus ICILS 2018 und des Länderindikators 2021 zur Beschreibung der digitalen Ausgangslage von Schulen in Deutschland herangezogen werden. Bei der Interpretation der Ergebnisse von ICILS 2018 ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Bedeutung der digitalen Ausstattung der Schulen nach 2018 durch den Digital-Pakt Schule (BMBF, 2019) gestärkt wurde. Darüber hinaus gab es beträchtliche Veränderungen in der Nutzung digitaler Technologien aufgrund von Schulschließungen während der Covid19-Pandemie und den damit einhergehenden digitalen Unterrichtsphasen sowie dem verstärkten Einsatz von digitalen Unterstützungsmaterialien im Anschluss an die Pandemie (Reintjes et al., 2021; Maaz & Diedrich, 2020; Lorenz & Eickelmann, 2022). Insgesamt zeigte sich in ICILS 2013 ein sehr heterogenes Bild der digitalen Ausstattung der Schulen in den einzelnen deutschen Bundesländern. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zur Gewährleistung eines nachhaltigen Implementierungsprozesses (zumindest) kurzfristig immer ein ressourcenintensiver Mehraufwand an Kosten, Personal und Arbeitszeit in Schulen notwendig ist, was dazu führt, dass sich der digitale Wandel in den Schulen in unterschiedlichen Geschwindigkeiten vollzieht (Eickelmann et al., 2019).

In ICILS 2013 war der Computerraum an allen befragten Schulen das alternativlos genutzte Ausstattungskonzept, in ICILS 2018 gab es neben dem Computerraum (an 98 % der befragten Schulen) auch andere Konzepte wie transportable Klassensätze von Notebooks, Laptops oder Tablet(-computern) (Bos et al., 2014; Eickelmann et al., 2019). Während in ICILS 2013 zudem das Verhältnis von Schüler:innen zu Computern noch bei 11,5 zu 1 lag (Bos et al., 2014), sank dieses in ICILS 2018 auf 9,7 zu 1 (Eickelmann et al., 2019). Im Vergleich dazu lag das Verhältnis in ICILS 2013 bzw. ICILS 2018 im direkten Nachbarland Dänemark bei 4,2:1 bzw. 4,6:1 (rückläufig, da 90,7 % der in ICILS 2018 befragten Schüler:innen eine Schule besuchten, an der sie selbst mobile Endgeräte zur unterrichtlichen Nutzung mitbringen) und im durchschnittlichen europäischen Verhältnis bei 11,6:1 bzw. 8,7:1 (Eickelmann et al., 2019). Es ist davon auszugehen, dass sich das Verhältnis von Schüler:innen zu Computern in Deutschland bis dato weiter verbessert hat. Im Länderindikator 2021 wurden hierzu leider keine entsprechenden Daten erhoben, aber die Aussage von 56,6 % der befragten Lehrkräfte, dass eine ausreichende IT-Ausstattung, sowohl mit Hard- als auch mit Software, an der Schule vorhanden ist (Yotyodying & Lorenz, 2022), deutet darauf hin, dass die Nutzung flexibler Ausstattungskonzepte weiter zunimmt. Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit ist zudem darauf hinzuweisen, dass 11,8 % der in ICILS 2018 befragten Schüler:innen eine Schule besuchten, an der ein 3D-Drucker zugänglich war. Dies ist im europäischen Vergleich (30,9 %) und im Vergleich zum direkten Nachbarland Dänemark (46 %) stark unterdurchschnittlich.

Zusammenfassend zeigen die Daten der nationalen und internationalen Vergleichsstudien, dass die digitale Ausstattung an allgemeinbildenden Schulen in Deutschland zunimmt. Aufgrund der heterogenen Ausgangslagen und Wege zur Digitalisierung der Schulen zeigt sich aber nach wie vor ein heterogenes Bild, das im europäischen Vergleich unterdurchschnittlich bleibt.

2.2.3 Berufsorientierung an allgemeinbildenden Schulen

Nachdem in Abschnitt 2.2.1 die institutionellen Bildungsziele in Bezug auf die Berufsorientierung und -vorbereitung der Schüler:innen aufgezeigt wurden, fokussiert der folgende Abschnitt die tatsächliche Umsetzung von Berufsorientierungsangeboten an allgemeinbildenden Schulen. Um den Stand der Berufsorientierung an allgemeinbildenden Schulen in Deutschland beschreiben zu können, führte die Bertelsmann Stiftung im Jahr 2022 eine Befragung von $N = 1666$ Jugendlichen und jungen Erwachsenen im Alter zwischen 14 und 20 Jahren durch, die zum Befragungszeitpunkt noch Schüler:in waren oder im Schuljahr 2021/22 ihre Schulzeit bereits abgeschlossen hatten und einen Ausbildungsplatz suchten oder kurz davor standen, eine Ausbildung zu beginnen (Barlovic et al., 2022). Nur ein Viertel der befragten Jugendlichen und jungen Erwachsenen gaben an, dass es genügend Informationen zur Berufswahl gäbe und sie sich gut zurechtfinden. Weitere 53 % gaben an, dass es zwar genügend Informationen gäbe, sie sich aber nur schwer zurechtfinden und 18 % gaben an, dass es insgesamt zu wenig Informationen zur Berufswahl gäbe. Auch Giek und Seifried (2023) weisen auf den Wunsch der Lernenden nach einem größeren Angebot an schulischen Maßnahmen und weiterführenden Informationen zu verschiedenen Berufsfeldern hin. Bei bereits bekanntem Wunschberuf geben hingegen 56 % an, sehr gut oder gut zu wissen, was sie in dem angestrebten Beruf erwartet. Dabei werden den Lehrkräften bzw. Berufsinformationsveranstaltungen in der Schule von den befragten Jugendlichen und jungen Erwachsenen eine hohe Relevanz zugeschrieben. Auf die Frage, wie gut sie sich in der Schule über Berufe informiert fühlten, antworteten 19 %, dass sie sich gar nicht oder eher nicht gut informiert fühlten und 27 %, dass sie sich „teils, teils“ informiert fühlten. Dabei nimmt die Zufriedenheit mit der Informationsdichte mit zunehmendem Bildungsniveau ab („Ich fühle mich sehr gut informiert“: 20 % der Befragten mit niedriger Schulbildung, 12 % der Befragten mit mittlerer Schulbildung, 13 % der Befragten mit hoher Schulbildung). Dies kann damit zusammenhängen, dass Schüler:innen aus Schulen mit höherer Schulbildung eher bezüglich eines Hochschulstudiums informiert werden, während Schüler:innen aus Schulen mit niedriger Schulbildung eher über Ausbildungsberufe informiert werden. Diese Unterteilung findet sich auch in den Daten der Bertelsmann Stiftung: Auf die Frage, wie gut sich die befragten Jugendlichen und jungen Erwachsenen durch die Schule über mögliche Ausbildungsberufe informiert fühlen, gaben 14 % bzw. 40 % der Befragten mit niedriger Schulbildung an, dass sie sich sehr gut bzw. eher gut informiert fühlten. Bei den Befragten mit mittlerer und hoher Schulbildung waren es dabei 10 % bzw. 9 %, die sich sehr gut informiert fühlten und 38 % bzw. 37 % der Befragten, die sich eher gut informiert fühlten. Darüber hinaus gaben 3 % der Befragten mit höherer Schulbildung an, dass keine Berufsorientierung über Ausbildungsberufen stattgefunden habe. Bei der

Theoretischer Hintergrund

Frage nach der Zufriedenheit mit der Information über Studienmöglichkeiten, Studienfächer und Studienrichtungen zeigte sich ein gegensätzliches Bild: Hier gaben 13 % der Befragten mit hoher Schulbildung an, dass sie sich sehr gut informiert fühlten. Bei den Befragten mit mittlerer und niedriger Schulbildung waren es hingegen 4 % bzw. 3 %.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Informationsbedarf von Schüler:innen über alle Bildungsstufen hinweg nicht ausreichend gedeckt wird und ein Angebot an weiteren Orientierungsmöglichkeiten notwendig ist. Diese Orientierungsmöglichkeiten sollten dabei insbesondere auch Berufe umfassen, die durch die Digitalisierung der Arbeitswelt geschaffen wurden, sowie auf Automatisierungsrisiken anderer Berufe hinweisen (Mann et al., 2020). Da den Lehrkräften im Rahmen der schulischen Bildung eine wichtige Rolle bei der Vermittlung von Wissen über Berufe und Studiengänge zukommt, sollte die Verantwortung hierfür nicht ausschließlich auf außerschulische Angebote oder punktuelle Maßnahmen ausgelagert werden. Jedoch ist ein Wissen über berufliche Orientierung bzw. relevante Aspekte der digitalen Arbeitswelt nicht Teil der Lehrkräfteausbildung, die sich auf fachliche, pädagogische und fachdidaktische Inhalte beschränkt. Entsprechend müssen bei einem Einbezug von Lehrkräften in Maßnahmen zur beruflichen Orientierung der Schüler:innen im inner-schulischen Kontext, Materialien oder Unterstützungsangebote für die Nutzung durch Lehrkräfte entwickelt werden.

2.2.4 Gelingensbedingungen für den Einsatz digitaler Technologien im regulären Fachunterricht

Um eine erfolgreiche Integration digitaler Technologien in den regulären Fachunterricht zu ermöglichen, sind verschiedene Bedingungsfaktoren zu berücksichtigen. Diese werden u. a. durch Ertmer (1999) in externe und interne Barrieren unterteilt und gehen von der Lehrkraft als zentralem Akteur bei der Integration aus. Zu den externen Barrieren zählen unter anderem die digitale Ausstattung der Schule und weitere digitale Ressourcen, die Ausbildung der Lehrkräfte sowie der didaktische und technische Support für den Einsatz digitaler Medien im Fachunterricht (vgl. Eickelmann et al., 2019). Die internen Barrieren umfassen die teilweise unbewussten Einstellungen, Kenntnisse und Kompetenzen der Lehrkraft zu dem Lehren und Lernen mit und ohne digitale Technologien im regulären Fachunterricht (Ertmer, 1999). Aufgrund des zunehmenden Digitalisierungsgrades und der damit einhergehenden fortschreitenden digitalen Ausstattung der Schulen (vgl. Abschnitt 2.2.2) sowie der Verankerung digitaler Medien in der Lehrkräftebildung (u. a. Ackeren et al., 2019) wird davon ausgegangen, dass die Bedeutung externer Barrieren für die erfolgreiche Integration digitaler Medien in den regulären Fachunterricht sich immer weiter verringern. Daraus folgt, dass ein Fokus auf die internen Barrieren der Lehrkräfte („biggest enabler“, Ertmer et al., 2012) notwendig ist (Ertmer, 1999; Newhouse, 2001).

Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit neben den Gelingensbedingungen auch das mathematische Lernen der Schüler:innen betrachtet wird, sollen im Folgenden die Gelingensbedingungen für den Einsatz digitaler Technologien im regulären

Fachunterricht aus institutioneller Sicht, sowie in Bezug auf die Lehrkräfte und Schüler:innen näher betrachtet werden.

Institutionelle Ebene (externe Voraussetzungen)

Trotz der Charakterisierung externer Barrieren als ausschließlich temporär relevante Herausforderung für eine erfolgreiche Integration digitaler Medien in den regulären Fachunterricht soll im Folgenden kurz auf relevante Bedingungsfaktoren auf institutioneller Ebene eingegangen werden. Die Ausstattung der Schule mit digitalen Geräten ist eine der in empirischen Studien am häufigsten genannten (externen) Barrieren für den Einsatz digitaler Technologien im Fachunterricht (Hew & Brush, 2007; Eickelmann et al., 2019). Darüber hinaus korreliert die schulische Ausstattung mit medialen Bildungstechnologien sowohl positiv mit der von den Lehrkräften wahrgenommenen Relevanz der Integration digitaler Technologien in den Fachunterricht als auch mit der Bereitschaft der Lehrkräfte, die an der Schule vorhandenen digitalen Technologien in ihrem Unterricht zu nutzen (Petko et al., 2018).

Für eine ausreichende und nutzbare Ausstattung der allgemeinbildenden Schulen mit digitalen Technologien sind sowohl die Verfügbarkeit finanzieller Mittel als auch reibungslose Verwaltungsabläufe bei der Beschaffung der digitalen Technologien notwendig (Stand 2021: Zwei Fünftel der befragten Lehrkräfte sind mit den Abläufen sowie der Verfügbarkeit von finanziellen Mitteln an ihrer Schule zufrieden; vgl. Lorenz & Eickelmann, 2022). Darüber hinaus ist nicht nur die Anzahl und Funktionalität der vorhandenen Geräte von relevanter Bedeutung, sondern auch deren Standorte. So kann beispielsweise eine Ansammlung von Computern in Computerräumen zu einer geringeren Partizipation führen (Eickelmann et al., 2019). Ausstattungskonzepte wie mobile transportable Endgeräte oder Bring-Your-Own-Device-Kulturen rücken daher in den Vordergrund.

Ein weiteres Kriterium auf institutioneller Ebene ist die technische (z. B. Wartung der Geräte) und pädagogische (z. B. explizite Unterstützung der anwendenden Lehrkraft vor der Unterrichtssituation) Unterstützung der Lehrkräfte bei der Integration der vorhandenen digitalen Technologien. Beide Formen der Unterstützung haben an allgemeinbildenden Schulen in den letzten Jahren zugenommen, sind aber noch längst nicht an allen Schulen vorhanden. So gaben 46,7 % bzw. 32,1 % der befragten Lehrkräfte in ICILS 2018 an, dass ausreichend technischer bzw. pädagogischer Support zur Verfügung stehe (Eickelmann et al., 2019). Im Länderindikator 2021 waren es 49,7 % bzw. 44,7 % der befragten Lehrkräfte (Yotyodying & Lorenz, 2022).

Neben der Ausstattung und Nutzbarkeit digitaler Technologien in den Schulen sowie den Unterstützungsangeboten für die Nutzung spielt die Ausbildung der Lehrkräfte in den verschiedenen Phasen der Lehrkräftebildung als externe Voraussetzung eine wichtige Rolle (vgl. Empfehlung KMK, 2017b; Ergänzung KMK, 2021). Dabei wird die Lehrkräftebildung in drei Phasen unterteilt: Die erste Phase umfasst das Studium, die zweite Phase den Vorbereitungsdienst an der Schule und die dritte Phase die Lehrkräftefortbildungen nach Abschluss der ersten beiden Phasen. Da die (im schulischen Kontext) verfügbaren digitalen Medien einer ständigen Weiterentwicklung unterliegen, kommt der dritten Phase eine große Bedeutung zu. So sind die ersten beiden

Theoretischer Hintergrund

Phasen der Lehrkräftebildung für die Vorbereitung der angehenden Lehrkraft auf ihren Beruf essentiell (Aufbau grundlegender und unterrichtspraktisch definierter Kompetenzen, vgl. KMK, 2019), die Weiterentwicklung der Kompetenzen im Umgang mit und des Wissens über digitale Medien obliegt jedoch der einzelnen Lehrkraft nach dem erfolgreichen Abschluss der ersten beiden Phasen ihrer Ausbildung. Dabei soll Ziel der dritten Phase der Lehrkräftebildung die Aktualisierung der individuellen Kompetenzen „mit Blick auf neue Herausforderungen in der Bildung“ (KMK, 2019, S. 3) sein. Die Bedeutung der dritten Ausbildungsphase kann insbesondere deshalb hervorgehoben werden, da Lehramtsstudierende in der ersten Phase der Lehrkräfteausbildung digitalen Medien und deren Einsatz im regulären Fachunterricht eher kritisch und wenig interessiert gegenüberstehen (Schmid et al., 2017). Zudem werden angehende Lehrkräfte in der ersten Phase der Lehrkräftebildung trotz der Empfehlung, die Förderung grundlegender Kompetenzen im Umgang mit digitalen Medien strukturell und curricular zu verankern (Becker et al., 2020; KMK 2017b, 2021), weder fachwissenschaftlich noch fachdidaktisch ausreichend auf den Einsatz und die Reflexion digitaler Medien im regulären Fachunterricht vorbereitet (Vogelsang et al., 2019). Entsprechend kann die Teilnahme an Fortbildungen im Rahmen der dritten Phase der Lehrkräftebildung dazu dienen, dass Lehrkräfte neue digitale Medien bzw. den Unterrichtseinsatz dieser Medien kennenlernen, einüben und reflektieren. So haben laut Länderindikator 2021 50 % der befragten Lehrkräfte in den Jahren 2020/2021 an digitalisierungsbezogenen Fortbildungen teilgenommen (Eickelmann et al., 2022).

Um die Lehrkräfte schließlich im eigentlichen Prozess der Unterrichtsvorbereitung und -durchführung zu unterstützen, kann zudem die Verfügbarkeit von Unterrichts- und Unterstützungsmaterialien von zentraler Bedeutung sein. So kann Lehrkräften der Einsatz eines digitalen Mediums erleichtert werden, wenn eine Passung zu den Unterrichtszielen und -vorgaben besteht und der Einsatz didaktisch und fachlich gut vorbereitet ist. Dabei gewinnen Open Educational Resources (OER) Plattformen zunehmend an Bedeutung. Hier können Lehrkräfte (meist nach Registrierung) vorstrukturierte Unterrichtskonzepte (ggf. inklusive Unterrichtsmaterialien wie Arbeitsblätter und Unterstützungs- sowie Fördermaterialien) von den digital zugänglichen Plattformen herunterladen. Die meisten OER-Plattformen bieten im Sinne der nachhaltigen Weiterentwicklung auch die Möglichkeit adaptierte und kommentierte Unterrichtsmaterialien wieder hochzuladen. Das Konzept der OER-Plattformen wurde im Jahre 2002 initiiert und hat seitdem eine positive Entwicklung bezüglich der Sichtbarkeit und Vernetzung der vielfältigen bestehenden Plattformen durchlaufen (vgl. u. a. Otto, 2022). Die Nutzung durch Lehrkräfte ist zwar noch immer begrenzt (u. a. Schuwer & Janssen, 2018; Baas et al., 2019; Otto, 2022), der effiziente und anwender:innen-freundliche Aufbau der digitalen Plattformen steht jedoch derzeit im Fokus der OER-Forschung (u. a. Gantenbrink & Tibbe, 2024; Otto et al., 2021; Otto, 2024), so dass mit einer zukünftigen positiven Entwicklung der Nutzungshäufigkeit gerechnet werden kann.

Ebene der Lehrkräfte (interne Voraussetzungen)

Als interne Barrieren werden solche kategorisiert, deren individuelle Ausprägung den Einsatz digitaler Technologien im Fachunterricht beeinflusst. Da die Auswahl der im Fachunterricht eingesetzten digitalen Medien den Lehrkräften obliegt, sind die Einstellungen, Überzeugungen und Kompetenzen der Lehrkräfte im Umgang mit den potentiell einsetzbaren digitalen Technologien von relevanter Bedeutung (Hew & Brush, 2007; Ostermann et al., 2022). Ebenso sind die Kompetenzen der Lehrkräfte im Umgang mit digitalen Technologien von hoher Relevanz für deren Integration in den regulären Fachunterricht (vgl. z. B. *Theory of Planned Behavior*; Fishbein & Ajzen, 2010). Eine wesentliche Rolle für das Treffen von Unterrichtsentscheidungen spielt unter anderem das individuelle Wissen der Lehrkraft (Borko & Putnam, 1995). Vor diesem Hintergrund kategorisiert Shulman (1986) im PCK-Modell das Wissen von Lehrkräften über ihr jeweiliges Unterrichtsfach in pädagogisches Wissen (*pedagogical knowledge – PK*), fachliches Wissen (*content knowledge – CK*) und fachdidaktisches Wissen (*pedagogical content knowledge – PCK*). Im Hinblick auf die fortschreitende Digitalisierung der verschiedenen Lebensbereiche und die damit einhergehenden Veränderungen im schulischen Kontext wurde dieses Modell um eine technologische Komponente und deren Überschneidungen mit den bereits definierten Wissensbereichen erweitert (u. a. im TPACK-Modell von Mishra & Koehler, 2006, Abb. 2.6). Durch die Modelerweiterung wird der Interaktion von Technologie, fachlichen Inhalten und Pädagogik eine relevante Bedeutung für die effektive Unterrichtsgestaltung und das Lernen der Schüler:innen zu-

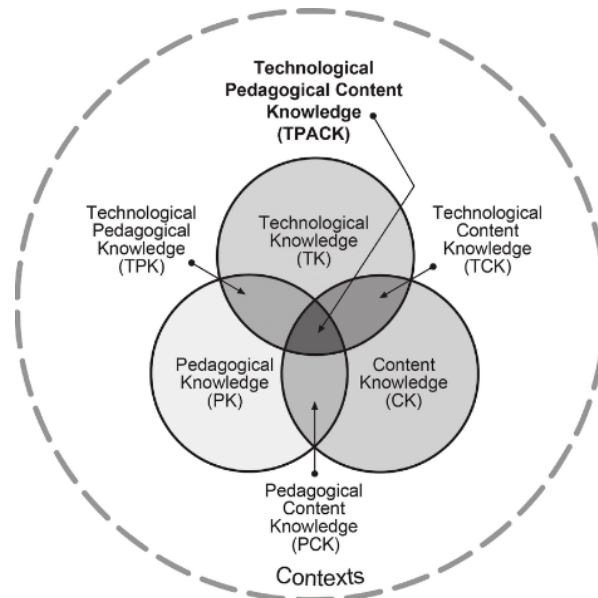


Abbildung 2.6: TPACK-Modell nach Mishra & Koehler (Abb. aus Koehler et al., 2014).

gesprachen (Angeli & Valanidis, 2009). Das individuelle Lehrkräftewissen wird dabei zusätzlich in die Bereiche technologisches Wissen (*technological knowledge – TK*), technologisches pädagogisches Wissen (*technological pedagogical knowledge – TPK*), technologisches fachliches Wissen (*technological content knowledge – TCK*) und technologisches fachdidaktisches Wissen (*technological pedagogical content knowledge – TPACK*) kategorisiert.

Neben den Wissenskonstrukten kann auch der individuellen Einschätzung der Lehrkräfte bezüglich ihrer Handlungsfähigkeit (*Selbstwirksamkeitserwartung*) in Bezug auf die einzelnen Wissenskonstrukte eine bedeutsame Rolle für den Einsatz digitaler Technologien im Fachunterricht zugeschrieben werden (Wozney et al., 2006). Eine Studie von Bauer und Kenton (2005) deutet darauf hin, dass die Rolle der *Selbstwirksamkeitserwartung* bezüglich der technologischen Wissenskonstrukte dabei von größerer Bedeutung ist als die Ausprägung der Wissenskonstrukte oder die

Theoretischer Hintergrund

individuelle Ausprägung der Kompetenz im Umgang mit der jeweiligen digitalen Technologie. Dies kann dahingehend interpretiert werden, dass es für den Einsatz einer digitalen Technologie im Fachunterricht von größerer Bedeutung ist, dass die Lehrkraft glaubt, es zu können, als dass sie es tatsächlich kann. Entsprechend kann die einfach zu erhebende *Selbstwirksamkeitserwartung* in empirischen Studien als geeigneter Prädiktor für die potentielle Nutzung digitaler Technologien im Fachunterricht herangezogen werden.

Damit eine Lehrkraft einen innovativen Unterrichtsansatz, der sich von ihren traditionell verwendeten Ansätzen unterscheidet, in ihrem Unterricht einsetzt, muss dieser mit ihren bestehenden Überzeugungen und Beliefs zum Unterrichten übereinstimmen (Hughes, 2005; Zhao & Frank, 2003). Um eine solche Passung zwischen einem Unterrichtsansatz und den individuellen Überzeugungen und Beliefs einer Lehrkraft zu beschreiben, können die von der Lehrkraft dem Unterrichtsansatz zugeschriebenen *task value beliefs* betrachtet werden. Zusammen mit den Erfolgserwartungen in Bezug auf den Einsatz des Lehransatzes beschreiben die *task value beliefs* dabei die Leistungsmotivation der Lehrkraft (u. a. Wigfield & Eccles, 1992). Um den einem Ansatz zugeschriebenen *task value* zu beschreiben, werden die drei Wertkategorien *Freude* (intrinsic value), *Wichtigkeit* (attainment value) und *Nutzen* (utility value) betrachtet, die das Konstrukt ausmachen (vgl. u. a. Wigfield & Eccles, 1992; Wigfield, 1994). Dabei beschreibt die Kategorie *Freude* die von der Lehrkraft zugeschriebene individuelle Freude an der Auseinandersetzung mit und der Umsetzung des Unterrichtsansatzes. Die Kategorie *Wichtigkeit* beschreibt die durch die Lehrkraft individuell wahrgenommene Relevanz des Unterrichtsansatzes. In diese Kategorie fallen somit insbesondere die individuellen Beliefs der Lehrkraft, den Unterrichtsansatz anzuwenden und die damit verbundenen Herausforderungen zu bewältigen. Die dritte Kategorie *Nutzen* beschreibt den von der Lehrkraft individuell wahrgenommenen Nutzen des Einsatzes des Unterrichtsansatzes in Bezug auf bestehende individuelle und institutionelle (Unterrichts-)Ziele. Aufgrund der gegebenen Definition der *task value beliefs* kann davon ausgegangen werden, dass Lehrkräfte bei der Auswahl von Unterrichtsansätzen für ihren regulären Fachunterricht dann einen Unterrichtsansatz auswählen und einsetzen, wenn sie diesem einen hohen *task value* zuschreiben.

Ebene der Schüler:innen

Nachdem in den vorherigen zwei Abschnitten institutionelle Gelingensbedingungen sowie Gelingensbedingungen bezogen auf die Rolle der Lehrkraft zur Umsetzung von Unterrichtsansätzen dargestellt wurden, befasst sich der folgende Abschnitt mit (a) Bedingungen dafür, dass Schüler:innen das dargelegte Lernangebot wahrnehmen und (b) Indikatoren dafür, ob die Bildungsziele erreicht wurden. Auf die Auswahl von Unterrichtsansätzen für den regulären Fachunterricht haben Schüler:innen je nach Schulkonzept nur einen minimalen Einfluss. Die durch die Lehrkraft getroffene Auswahl des Unterrichtskonzeptes kann jedoch Einfluss auf das fachliche Lernen sowie die Einstellungen der Schüler:innen nehmen (vgl. z. B. „ICAP“-Modell nach Chi & Wylie, 2014). Daher wird in dem folgenden Abschnitt der Fokus auf das computerbezogene

Selbstkonzept der Lernenden gelegt. Die im regulären Fachunterricht anzustrebenden fachlichen und medialen Kompetenzen wurden bereits in Abschnitt 2.2.1 beschrieben.

Die Einstellungen einer Person zu einem Unterrichtsfach oder einem Aspekt der Lebenswelt beschreiben die individuellen Bewertungen des Unterrichtsfachs oder des Aspekts der Lebenswelt sowie das Verhalten gegenüber diesem in Abhängigkeit von den eigenen Überzeugungen (Rosenberg & Hovland, 1960; Zimbardo & Gerrig, 2003; Jonas et al., 2014). Nach Rosenberg und Hovland (1960) haben Einstellungen zu einem Objekt oder Thema drei Komponenten: *Verhalten*, *Affekt* und *Kognition*. In Anlehnung an diese Einteilung definieren unter anderem Janneck et al. (2014) das computerbezogene Selbstkonzept, das sich dementsprechend in eine *verhaltensbezogene*, eine *affektive* und eine *kognitive Komponente* unterteilen lässt. Das computerbezogene Selbstkonzept beschreibt dabei die Einstellungen einer Person in Bezug auf den individuellen Umgang mit einem Computer und soll hier stellvertretend für die Selbstkonzepte von Lernenden in Bezug auf digitale Medien dargestellt werden.

Die *verhaltensbezogene Komponente* des computerbezogenen Selbstkonzepts beschreibt dabei konkrete Handlungserfahrungen mit digitalen Technologien. Die *affektive Komponente* des computerbezogenen Selbstkonzepts umfasst die emotionalen Motive im Umgang mit Computern und gliedert sich in die fünf Teilkomponenten: *positive Gefühle*, *Ängstlichkeit*, *Verständnis*, *Gestaltung* und die *Werkzeugperspektive*. Die *kognitive Komponente* des computerbezogenen Selbstkonzepts bezieht sich auf die subjektiv wahrgenommene Kompetenz und die Selbstwirksamkeit im Umgang mit Computern sowie auf Strategien im Umgang mit Computern und wird ebenfalls in fünf Teilkomponenten aufgeteilt: *subjektiv wahrgenommene computerbezogene Kompetenzen*, *Selbstwirksamkeit*, *internale Attribution*, *externale Kontrollüberzeugungen* und *Strategien*. Bei der Betrachtung des computerbezogenen Selbstkonzepts kann davon ausgegangen werden, dass insbesondere das Sammeln erster Handlungserfahrungen durch die direkte Auseinandersetzung mit dem digitalen Medium, die Steigerung positiver Gefühle und die Reduktion von Ängstlichkeit gegenüber der digitalen Technologie von besonderer Relevanz für die (zukünftige) Auseinandersetzung mit dieser sind (Wakefield, 2015). Darüber hinaus beeinflussen die wahrgenommene individuelle Kompetenz und die Selbstwirksamkeit (beides kognitive Komponenten) das Verhalten (Bandura, 1978). Analog zu dem computerbezogenen Selbstkonzept von Janneck et al. (2014) kann auch das Selbstkonzept der Lernenden in Bezug auf andere digitale Medien betrachtet werden.

In Anlehnung an die Selbstbestimmungstheorie (Deci & Ryan, 2002) kann davon ausgegangen werden, dass Schüler:innen die an sie gestellten externalen Anforderungen in Bezug auf ihre Berufswahl und berufliche Zukunft (z. B. die veränderten erwarteten Kompetenzprofile zukünftiger Arbeitnehmer:innen; vgl. Abschnitt 2.1.1) in ihr individuell bestehendes Wertesystem integrieren müssen. Ein von den Schüler:innen erlebter Lernprozess muss folglich nicht notwendigerweise mit Freude oder Interesse verknüpft sein, um motivierend zu wirken. Bei einer Bedeutungszuschreibung eines Lernvorgangs für die individuelle (berufliche) Zukunft der Lernenden wird von instrumenteller Motivation gesprochen. Neben der intrinsischen Motivation beeinflusst demnach auch die instrumentelle Motivation von Schüler:innen in Bezug auf

einen Lerngegenstand die individuelle Anstrengungsbereitschaft sowie die zukünftige Berufswahl (Taskinen et al., 2008).

Zusammenfassend können die Gelingensbedingungen für die Integration digitaler Medien in den regulären Fachunterricht als ein Zusammenspiel verschiedener Bedingungsfaktoren auf unterschiedlichen Ebenen betrachtet werden. Bei der Entwicklung von Unterrichtsideen und -konzepten, die dem Anspruch folgen, digitale Medien adäquat, zielführend und lernförderlich in den Fachunterricht zu integrieren, müssen daher sowohl Bedingungen auf institutioneller Ebene (z. B. welche Ausstattung ist an der Schule vorhanden) als auch auf der Ebene der Lehrkräfte (z. B. Kompetenz der Lehrkraft im Umgang mit digitalen Technologien oder der zugeschriebene *task value*) und der Ebene der Schüler:innen (z. B. Einstellungen) berücksichtigt werden.

2.3 Zusammenfassung und Forschungsdesiderate

Zum Bildungsauftrag der allgemeinbildenden Schulen gehört es, Jugendliche und junge Erwachsene auf den Übergang in eine Berufsausbildung oder in ein Studium vorzubereiten (vgl. Abschnitt 2.2.1). Für Maßnahmen der Berufsorientierung werden häufig außerschulische Lernorte (z. B. Betriebsbesichtigungen) oder Projektunterricht genutzt, die nur punktuell einsetzbar sind. Eine Verknüpfung der Berufsorientierung mit dem regulären Fachunterricht könnte hier eine regelmäßige und kontinuierliche Möglichkeit der Auseinandersetzung mit der großen Vielfalt möglicher Berufe in der digitalen Arbeitswelt ermöglichen. Diese kontinuierliche und damit potentiell breitere Auseinandersetzung gewinnt insbesondere aufgrund des prognostizierten gravierenden Fachkräftemangels in den nächsten Jahren an Relevanz (vgl. Hellwagner et al., 2023). Als übergreifende Forschungsfrage ergibt sich hieraus, wie und in welchen Unterrichtsfächern Aspekte der digitalen Arbeitswelt thematisiert und genutzt werden können, um fachliche und digitale Kompetenzen sowie eine Berufsorientierung und -vorbereitung zu fördern. Von wichtiger Bedeutung ist dabei, dass der Schwerpunkt im Fachunterricht das fachliche Lernen und der Erwerb fachlicher Kompetenzen ist.

Um diese Frage zu beantworten, wurde im vorliegenden Forschungsprojekt der Ansatz gewählt, *eine* relevante exemplarische digitale Technologie der digitalen Arbeitswelt (hier: 3D-Druck, vgl. Abschnitt 2.1.2) und *ein* Unterrichtsfach (hier: Mathematik, vgl. Abschnitt 2.2.1) zu betrachten. Aufbauend auf den Ergebnissen dieses Ansatzes können in nachfolgenden Forschungsprojekten weitere digitale Technologien bzw. Unterrichtsfächer fokussiert werden. Für die Thematisierung der 3D-Druck-Technologie im regulären Mathematikunterricht lassen sich drei Ansätze identifizieren (vgl. u. a. Figueiredo & Afonso, 2005), die im Folgenden näher erläutert werden.

Die 3D-Druck-Technologie kann als *Lerninhalt* genutzt werden. Bei diesem Ansatz wird die Technologie explizit im Unterricht aufgegriffen und die zugrundeliegenden Prozesse und Anwendungsbereiche thematisiert. So kann beispielsweise im fächerübergreifenden Mathematik- und Technik- bzw. Informatikunterricht die der 3D-Druck-Technologie zugrundeliegende Hard- (z. B. einzelne Komponenten) und Software (z. B. im 3D-Druckprozess verwendete Code-Strukturen) thematisiert werden. Im fächerübergreifenden Mathematik- und Chemieunterricht könnten darüber

hinaus Zusammensetzungen von 3D-druckbaren Materialien (z. B. verwendbares Material im Extrusionsverfahren bzw. im Pulververfahren) betrachtet werden. Der Ansatz, die 3D-Druck-Technologie als Lerninhalt zu thematisieren, würde die Möglichkeit schaffen, sich möglichst intensiv mit der Technologie und ihren Funktionen auseinanderzusetzen, da diese als zentraler fachlicher Inhalt der jeweiligen Unterrichtseinheit fokussiert wird. Allerdings ist die praktische Umsetzungsmöglichkeit als eher gering einzuschätzen, da die Technologie als Lerninhalt insbesondere im Mathematikunterricht einen zusätzlichen Inhalt neben den festgelegten mathematischen Inhalten darstellen würde.

Eine zweite Möglichkeit ist die Nutzung der 3D-Druck-Technologie zur *Lernunterstützung*. In diesem Ansatz wird die Technologie verwendet, um beispielsweise Visualisierungshilfen oder Unterrichtsmaterialien zu drucken, die das Mathematiklernen der Schüler:innen unterstützen. Hierbei ist sowohl ein Einsatz durch die Lehrkraft (z. B. für den Druck von Funktionsgraphen, die zur Veranschaulichung ausgewählter Graphen dient, vgl. Witzke & Heitzer, 2019) als auch durch die Schüler:innen (z. B. für den Druck manipulierter Würfel im Rahmen des Unterrichts zur Leitidee Daten und Zufall, vgl. Dilling et al., 2021) möglich. Die 3D-Druck-Technologie wird in diesem Ansatz zur Veranschaulichung von curricularen mathematischen Fachinhalten genutzt, die Auseinandersetzung mit der Technologie und ihrer Funktionsweisen oder anderen zugrundeliegenden Aspekten bleibt jedoch minimal. Dementsprechend verfolgt dieser Ansatz nicht das Ziel einer Berufsorientierung der Schüler:innen.

Der dritte Ansatz ist die Nutzung der 3D-Druck-Technologie als *Lernkontext* im Mathematikunterricht. Im Gegensatz zu den beiden vorherigen Ansätzen werden bei diesem Ansatz curriculare mathematische Inhalte thematisiert und über den Einsatz der 3D-Druck-Technologie als Vehikel für mathematisches Lernen vermittelt (z. B. für das Operieren mit dreidimensionalen Koordinaten in Klasse 7; vgl. Emmermann et al., 2016). Dabei geht es nicht um einen durchgängigen Fachunterricht mit dem Lernkontext 3D-Druck, sondern um die regelmäßige Schaffung von Lernangeboten über die verschiedenen Schuljahre der Bildungsbiographie der Schüler:innen hinweg, in denen sie im Rahmen des regulären Fachunterrichts mit der 3D-Druck-Technologie in Berührung kommen und anhand einer mathematischen Betrachtung spezieller Aspekte dieser Technologie Mathematik lernen. Um ein solches kontinuierliches und regelmäßiges Lernangebot schaffen zu können, können Verbindungen zwischen curricularen mathematischen Inhalten und den Prozessen der 3D-Druck-Technologie (vgl. Abschnitt 2.1.2) betrachtet werden. Durch den Ansatz, die 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht zu nutzen, können die Schüler:innen nicht nur mathematische Kompetenzen aufbauen, sondern es können auch authentische berufsbezogene Anwendungskontexte dieser Technologie sowie die Relevanz der Mathematik explizit aufgezeigt werden. Ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes ist, dass das Vorhandensein eines 3D-Druckers in der Schule kein notwendiges Kriterium ist, da die Nutzung des 3D-Drucks als Lernkontext nicht davon abhängig ist. Da Handlungserfahrungen aber ein relevanter Aspekt des Selbstkonzepts sind (vgl. Abschnitt 2.2.4), sollten zumindest auch in diesem Ansatz Möglichkeiten geschaffen werden, dass die Schüler:innen in praktischen Kontakt mit einem 3D-Drucker kommen. Dazu

kann auch auf FabLabs oder Makerspaces zurückgegriffen werden, die zunehmend entstehen.

Im Sinne einer kontinuierlichen Auseinandersetzung befasst sich die vorliegende Forschungsarbeit mit der Frage, inwiefern der 3D-Druck über regelmäßig wiederkehrende kontextualisierte Unterrichtseinheiten in verschiedenen Jahrgangsstufen über die gesamte Bildungsbiographie der Schüler:innen hinweg integriert werden kann. Dabei soll die 3D-Druck-Technologie als Lernkontext genutzt werden, da angenommen wird, dass durch die Integration des 3D-Drucks in bestehende mathematische Unterrichtsinhalte die Akzeptanz bei den Mathematiklehrkräften erhöht wird. Die zu Beginn des Abschnitts formulierte übergreifende Forschungsfrage präzisiert sich im vorliegenden Rahmen zu der folgenden zu beantwortenden Forschungsfrage:

(RQ) Unter welchen Bedingungen kann der 3D-Druck als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht genutzt werden, um

- (1) mathematische Kompetenzen zu fördern,
- (2) digitale Kompetenzen zu fördern und
- (3) Schüler:innen im Sinne einer Berufsorientierung auf die digitale Arbeitswelt vorzubereiten?

Das Ziel ist hier nicht, den gesamten Mathematikunterricht im Kontext des 3D-Drucks zu unterrichten, sondern vielmehr gezielt curriculare mathematische Inhalte auszuwählen, die eine Verknüpfung des 3D-Drucks mit dem regulären Mathematikunterricht ermöglichen. Der Beantwortung der Forschungsfrage wird sich mittels des Educational Design Research genähert, da es (a) bisher nur vereinzelt Ansätze gibt, die 3D-Druck-Technologie als Lernkontext in den Mathematikunterricht zu integrieren und (b) als weitere Rahmenbedingung die Untersuchung im realen Mathematikunterricht gewählt wurde, um eine hohe ökologische Validität und eine gute Transferbarkeit in die Schulpraxis sicherzustellen. Entsprechend wurde ein Forschungsansatz benötigt, der (a) Rahmenbedingungen für den Einsatz der 3D-Druck-Technologie identifiziert, (b) eine Entwicklung der Unterrichtskonzepte für die Nutzung im realen Mathematikunterricht auf Basis der identifizierten Rahmenbedingungen verfolgt und (c) die Effekte der Unterrichtskonzepte evaluiert.

2.4 Educational Design Research

Um dem dargestellten Forschungsdesiderat zu begegnen wird auf den Ansatz des Educational Design Research (vgl. Plomp & Nieveen, 2013) zurückgegriffen. Mit diesem Ansatz wird Design-Research mit dem stringenten Ansatz der Konstruktion einer effektiven Lösung für ein bestehendes Problem in einem spezifizierten Kontext durchgeführt. Am Anfang eines solchen Forschungsprozesses steht demnach die Identifikation eines bildungswissenschaftlichen Problems (hier: die Diskrepanz zwischen den erwarteten Kompetenzprofilen der digitalen Arbeitswelt in Bezug auf die 3D-Druck-Technologie und den curricularen Inhalten des Mathematikunterrichts). Für das identifizierte Problem sollen dann in einem definierten Kontext (hier: der reguläre Mathematikunterricht der Sekundarstufe I und II) forschungsbasierte Lösungen entwickelt, evaluiert und optimiert werden. Auf der Basis des identifizierten Problems und des

Kontextes für diese Forschungsarbeit kann das Ziel des vorliegenden Designprozesses festgelegt werden: Die Entwicklung empirisch fundierter Lerntrajektorien (vgl. Simon, 1995) sowie die Ableitung von Designprinzipien aus dem Designprozess der Lerntrajektorien, um beispielsweise eine Variation des Problems unter Festhalten des Kontexts zu ermöglichen. Die zu erstellenden Lerntrajektorien haben dabei einen curricularen Fokus (vgl. Walker, 1990) und enthalten Informationen zu den folgenden zehn Kategorien, wobei die erste Kategorie *Begründung* als zentraler Orientierungspunkt für die weiteren neun Kategorien zu verstehen ist (vgl. van den Akker, 2013):

- (1) *Begründung* (Warum lernen die Schüler:innen?)
- (2) *Inhalt* (Was lernen die Schüler:innen?)
- (3) *Lernaktivitäten* (Wie lernen die Schüler:innen?)
- (4) *Rolle der Lehrkraft* (Wie unterstützt die Lehrkraft das Lernen der Schüler:innen?)
- (5) *Materialien und Ressourcen* (Womit lernen die Schüler:innen?)
- (6) *Gruppierung* (Mit wem lernen die Schüler:innen?)
- (7) *Ort* (Wo lernen die Schüler:innen?)
- (8) *Zeit* (Wann lernen die Schüler:innen?)
- (9) *Bewertung* (Wie wird das Lernen der Schüler:innen bewertet?)
- (10) *Ziele und Vorgaben* (Auf welche Ziele hin lernen die Schüler:innen?)

Der Designprozess kann in vier Phasen unterteilt werden: (1) *die Phase der Problemidentifikation und der Bedarfsanalyse*, (2) *die Phase der Unterrichtskonzeptentwicklung und Implementierung*, (3) *die Phase der formativen und summativen Evaluierung* und (4) *die Herleitung der Designprinzipien* (vgl. Plomp, 2013; Nieveen & Folmer, 2013). In Phase (1) sollte der Fokus auf einer frühzeitigen Einbindung relevanter Akteure aus der Praxis liegen, um für die folgenden Phasen ein an den Bedürfnissen der Akteure ausgerichtetes und lösungsorientiertes Vorgehen zu verfolgen. Die Phasen (2) und (3) werden als Mikroevaluationszyklen iterativ durchlaufen, so dass das entwickelte Unterrichtskonzept in mehreren Schritten evaluiert wird. In Phase (3) werden darüber hinaus je nach konkretisiertem Forschungsziel verschiedene Formen der formativen und ggf. summativen Evaluierung durchlaufen. Diese Evaluierungsformen richten sich jeweils nach dem Entwicklungsstand der Unterrichtskonzepte und haben unterschiedliche Funktionen im Designprozess. Mögliche formative Evaluierungsformen sind Expertenreviews oder die Erprobung der Konzepte im Feld. Nach n-maligem Durchlaufen der Phasen (2) und (3) können dann in Phase (4) Designprinzipien aus dem gesamten Designprozess abgeleitet werden. Diese werden in Form heuristischer Aussagen in dem folgenden Schema festgehalten:

Wenn man eine Intervention X (für den Zweck/die Funktion Y im Kontext Z) entwerfen will, dann ist man am besten beraten, diese Intervention mit den Merkmalen C₁, C₂, ..., C_n (inhaltliche Betonung) zu versehen und diese mit Hilfe der Verfahren P₁, P₂, ..., P_n (methodologische Betonung) aufgrund der theoretischen Argumente

Theoretischer Hintergrund

T₁, T₂, ..., T_n und der empirischen Argumente E₁, E₂, ..., E_n umzusetzen (vgl. van den Akker, 2013, S. 67).

Die heuristischen Designprinzipien dienen dazu, eine Generalisierbarkeit innerhalb vergleichbarer Rahmenbedingungen sicherzustellen. Allein durch die Formalisierung des Designprozesses in Designprinzipien ist eine Generalisierbarkeit jedoch nicht für alle Kontexte gegeben, so dass diese auch in anderen Kontexten überprüft werden sollte. Darüber hinaus ist die Einhaltung der Designprinzipien nicht automatisch mit einem Erfolg verbunden. Sie sind vielmehr so zu verstehen, dass bei einer Übertragung des Designs auf andere Kontexte die Effektivität des Designs – bei vergleichbaren Rahmenbedingungen – sehr wahrscheinlich ist. Bei einer Variation der Rahmenbedingungen ist dementsprechend mit einer Anpassung der Designprinzipien zu rechnen.

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde der Educational Design Research Prozess kanonisch durchgeführt, der in den folgenden Kapiteln dieser Arbeit dargestellt wird. So wurden zunächst in Phase 1 die Rahmenbedingungen erhoben, die die Erwartungen und Bedarfe der zentralen Akteure darstellen (vgl. Kapitel 4 und 5). Anschließend wurde gemäß der Phasen 2 und 3 ein prototypisches Unterrichtskonzept entwickelt, das in mehreren Zyklen evaluiert und optimiert wurde (vgl. Kapitel 6 und 7). Es wurden drei formative Evaluierungszyklen mit den verschiedenen Akteuren (vgl. Abschnitte 6.3.1 bis 6.3.3) und zwei summative Evaluierungszyklen im Laborkontext und im Feld durchgeführt (vgl. Abschnitte 6.3.4, 6.3.5 und Kapitel 7). Dabei war der Anspruch der formativen Evaluierungszyklen nicht die systematische, methodisch anspruchsvolle Erfassung und Auswertung von Daten, sondern ein eher pragmatisches Vorgehen im Rahmen einer formativen Anpassung der unterrichtspraktischen Umsetzung des erstellten prototypischen Unterrichtskonzeptes. Insbesondere ging es hierbei um das Aufdecken von möglichen Hürden auf verschiedenen Ebenen (z. B. materialbedingter Art). Die beiden summativen Evaluierungszyklen hatten im Gegensatz zu den drei vorhergehenden Evaluierungszyklen das Ziel der wissenschaftlichen Evaluation. Auf Basis der Evaluierungszyklen wurden abschließend in Phase 4 Designprinzipien zusammengefasst (vgl. Abschnitt 10.2.2) und weitere Unterrichtskonzepte erstellt.

3 EINLEITUNG ZU DEN RAHMENBEDINGUNGSSTUDIEN

Um Unterrichtskonzepte zu erstellen, die einerseits im regulären Mathematikunterricht implementierbar sind und andererseits die 3D-Druck-Technologie authentisch abbilden, wurden in Phase 1 des Designprozesses Rahmenbedingungsstudien mit relevanten Akteuren aus der Praxis durchgeführt. Dazu wurden einerseits die Erwartungen und Bedarfe der digitalen Arbeitswelt in Bezug auf die 3D-Druck-Technologie mittels Vertreter:innen aus Industrie, Handwerk und Technik erhoben (Rahmenbedingungsstudie – Digitale Arbeitswelt). Andererseits wurden die schulischen Rahmenbedingungen für den Einsatz digitaler Technologien im Allgemeinen und am Beispiel der 3D-Druck-Technologie durch eine Befragung von Mathematiklehrkräften erhoben (Rahmenbedingungsstudie – Schule).

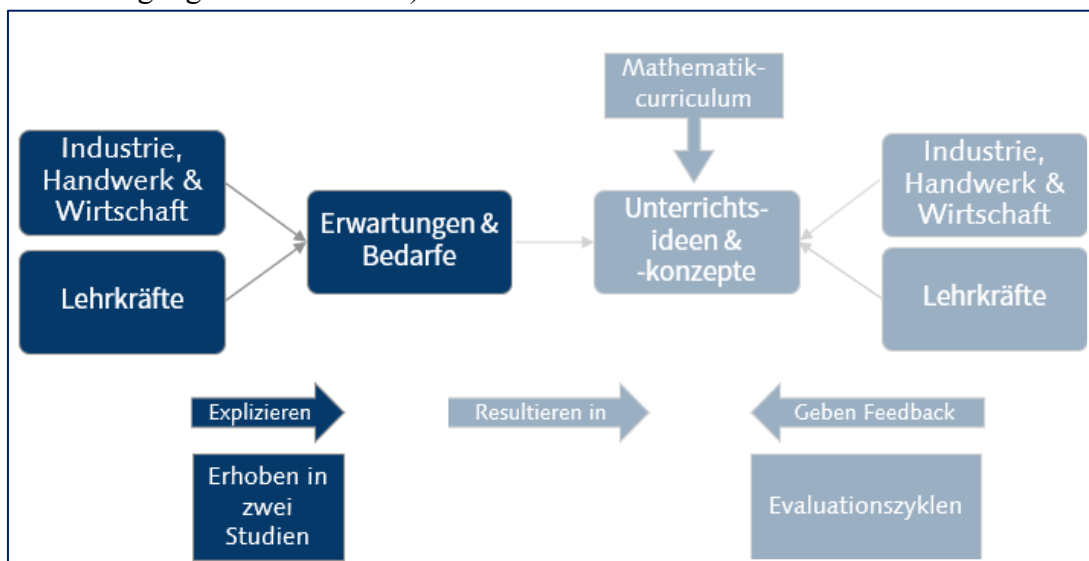


Abbildung 3.1: Abbildung des im Rahmen des Forschungsvorhabens durchlaufenen Designprozesses von Unterrichtskonzepten. Die ausgegrauten Felder werden in den Kapiteln 6 und 7 betrachtet.

Im Folgenden werden die durchgeführten Rahmenbedingungsstudien kurz im Überblick beschrieben, bevor sie in den nachfolgenden Kapiteln 4 und 5 in Form von Artikeln vorgestellt werden.

3.1 Rahmenbedingungen der digitalen Arbeitswelt

Die erste Rahmenbedingungsstudie fokussiert die Rahmenbedingungen der digitalen Arbeitswelt am Beispiel von Unternehmen aus Industrie, Handwerk und Wirtschaft, die die 3D-Druck-Technologie einsetzen. Die Studie adressiert mittels der folgenden

Einleitung zu den Rahmenbedingungsstudien

Forschungsfragen, die grundlegende Frage nach den Erwartungen und Bedarfen der digitalen Arbeitswelt im Umgang mit der 3D-Druck-Technologie.

(RQ1) Welche 3D-Druck-bezogenen Kenntnisse werden von Schulabsolvent:innen beim Übergang in die Ausbildung bzw. bei dem Einstieg in Berufe, die im professionellen Alltag die 3D-Druck-Technologie nutzen, erwartet?

(RQ2) Wie könnten diese Kenntnisse aus Unternehmenssicht bereits an allgemeinbildenden Schulen thematisiert werden?

Als Design dieser Rahmenbedingungsstudie wurden leitfadengestützte Interviews mit 15 Repräsentant:innen verschiedener deutscher und dänischer Unternehmen gewählt, die in ihrem beruflichen Alltag die 3D-Druck-Technologie regelmäßig nutzen. Die Interviews waren so aufgebaut, dass sich ein inhaltlicher Teil mit der Nutzung der 3D-Druck-Technologie im Unternehmen und ein zweiter Teil mit den zu durchlaufenden Ausbildungsschritten für den Umgang mit der Technologie im Unternehmen befasste. Ein dritter Teil des Interviews befasste sich mit den Wünschen an die Bildungsinhalte der allgemeinbildenden Schulen zur Vorbereitung der Schüler:innen auf die Arbeitswelt. Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde anschließend eine qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2015) durchgeführt. Mittels der Inhaltsanalyse wurden für beide Forschungsfragen induktiv Kategoriensysteme gebildet, die abschließend durch eine weitere Person unabhängig doppelkodiert wurden. Die Studie wird in Kapitel 4 ausführlich dargestellt.

3.2 Rahmenbedingungen der Schule

Die zweite Rahmenbedingungsstudie fokussiert die Gelingensbedingungen für eine Integration digitaler Medien (hier: 3D-Druck) in den regulären Mathematikunterricht auf Seiten der Lehrkräfte. Dabei adressiert die Studie mittels folgender Forschungsfragen neben den externen Barrieren (z. B. digitale Ausstattung der Schulen oder vorhandene Supportstrukturen) insbesondere auftretende interne Barrieren (z. B. Lehrkräftewissen, Einstellungen und Überzeugungen zum mathematischen Lehren und Lernen mit digitalen Medien, vgl. Abschnitt 2.2.4) bei Mathematiklehrkräften sowie deren Zusammenhang mit der Intention, die 3D-Druck-Technologie im Mathematikunterricht einzusetzen:

(RQ1) Welche Ausprägung haben bei Mathematiklehrkräften (a) die *Selbstwirksamkeitserwartungen* in den Kompetenzbereichen *TK*, *TPK* und *TPACK* und (b) die *task value beliefs* zur Integration der 3D-Druck-Technologie in den Mathematikunterricht?

(RQ2) Welche Zusammenhänge gibt es zwischen den *Selbstwirksamkeitserwartungen* bzw. *task value beliefs* und der Intention zur Implementierung der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im Mathematikunterricht?

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde eine Online-Befragung von 166 Mathematiklehrkräften in Deutschland und Dänemark zu ihrer Sicht auf die Nutzung des 3D-Drucks als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht durchgeführt. Der Fragebogen bestand aus mehreren inhaltlichen Teilen: Der erste Teil umfasste unter anderem demographische Fragen sowie Items zur digitalen Ausstattung der Schule mit 3D-Druckern und zu der individuellen Nutzung der zugänglichen 3D-Drucker durch die Lehrkraft. Der zweite Teil enthielt bereits validierte Items zum individuellen Verhältnis zu digitalen Medien (basierend auf BITKOM, 2015) sowie zwei Items zur Erhebung der Intention der Lehrkraft, die 3D-Druck-Technologie als Lernkontext in ihrem Mathematikunterricht einzusetzen. Dazu wurden im Fragebogen zwei Anwendungsbeispiele (zusammengesetzte Körper bzw. Ebenendarstellungen als Lerninhalte für die Sekundarstufe I bzw. II) herangezogen. Für den dritten Teil wurden die bereits validierten Skalen zu den *task value beliefs* sowie zur *Selbstwirksamkeitserwartung* in den Kompetenzbereichen *TK*, *TPK*, *TPACK* in Bezug auf die Implementierung der 3D-Druck-Technologie im Mathematikunterricht (Cheng, 2019) übersetzt und an die Rahmenbedingungen der Studie angepasst. Die Daten wurden anschließend deskriptiv und mittels Korrelationen ausgewertet. Die Studie wird in Kapitel 5 ausführlich dargestellt.

3.3 Anmerkung zu den Artikeln

Im Folgenden werden die Rahmenbedingungsstudien sowie die später in Kapitel 9 vorgestellte Disseminationsstudie in Form der veröffentlichten bzw. eingereichten Peer-Review-Artikel dargestellt. Zugunsten der besseren Lesbarkeit wurde die Nummerierung von Überschriften, Verweisen, Fußnoten, Tabellen und Abbildungen an die Gesamtheit der vorliegenden Arbeit angepasst und weicht daher von den veröffentlichten Artikeln ab. Darüber hinaus wurde auf das jeweilige Literaturverzeichnis am Ende des Artikels verzichtet. Die entsprechenden Referenzen sind im Literaturverzeichnis dieser Arbeit enthalten. Abgesehen von den genannten Anpassungen entsprechen die folgenden Kapitel 4 und 5 sowie Kapitel 9 den veröffentlichten bzw. eingereichten Artikeln.

4 RAHMENBEDINGUNGSSTUDIE – DIGITALE ARBEITSWELT

Der folgende Beitrag wurde am 18.03.2024 eingereicht und nach einem Peer-Review-Prozess in der untenstehenden Fassung am 30.07.2024 in **F. Dilling, & I. Witzke (Hrsg.): Digitaler Mathematikunterricht in Forschung und Praxis II** veröffentlicht (DOI: 10.37626/GA9783959872942.0.28).

Vorbereitung auf die digitale Arbeitswelt im regulären Mathematikunterricht? Der 3D-Druck als authentischer Lernkontext aus Sicht von Unternehmen

Mira H. Wulff & Aiso Heinze

Zusammenfassung: Der 3D-Druck gewinnt in der Arbeitswelt zunehmend an Relevanz. Für einen erfolgreichen Übergang in Berufe, die diese Technologie nutzen, sind Informationen über die von Unternehmensseite erwarteten Kenntnisse relevant. In einer Interviewstudie mit 15 Repräsentant:innen verschiedener Branchen wurden Erwartungen zu 3D-Druck-bezogenen Kenntnissen sowie Einbindungsmöglichkeiten in den regulären Fachunterricht herausgearbeitet.

4.1 Einleitung

Laut den Schulgesetzen der Bundesländer ist ein Bestandteil des Bildungsauftrages der allgemeinbildenden Schulen die Ausbildung von Schüler:innen zu mündigen Bürger:innen. Hierzu gehören neben fachlichen, emotionalen und sozialen Kompetenzen unter anderem die Fähigkeit, sich in der stetig wandelnden Welt zurecht zu finden sowie die Vorbereitung auf das spätere Berufsleben. Auftrag der allgemeinbildenden Schulen ist also neben dem generellen Erziehungsauftrag und der Vermittlung von fachlichen Inhalten ebenso die Möglichkeit zur Berufsorientierung sowie der Berufsvorbereitung (KMK, 2017a).

Aufgrund der zunehmenden Digitalisierung der Arbeitswelt hat diese in den letzten Jahrzehnten eine Transformation von mechanischen oder analogen zu digitalen, automatisierten Prozessen durchlaufen (z. B. Kaiser et al., 2021). Als Folge dieses Wandels erlangen zunehmend neue Technologien, wie beispielsweise die 3D-Druck-Technologie, an Relevanz auf dem Arbeitsmarkt. Dies bedingt Veränderungen in den Anforderungen an Kompetenzprofile beim Einstieg in die Arbeitswelt (z. B. Grundke et al., 2017). Es stellt sich die Frage, inwieweit die allgemeinbildende Schule Kompetenzen zu diesen neuen digitalen Technologien vermitteln soll und kann.

Um sich einer Antwort auf diese Frage zu nähern, wurde die hier berichtete Studie als Rahmenbedingungsstudie eines Forschungsprojekts durchgeführt. Die Frage, inwiefern der 3D-Druck in den regulären mathematischen Fachunterricht eingebunden werden kann, um Schüler:innen eine frühzeitige Berufsorientierung sowie die Auseinandersetzung mit einer für den Arbeitsmarkt relevanten digitalen Technologie zu ermöglichen, ist Fokus des Projektes. Die berichtete Studie fokussiert auf Basis durchgeführter Interviews die aus Unternehmenssicht erwarteten Kenntnisse in Berufen, die im professionellen Alltag die 3D-Druck-Technologie nutzen sowie Einbindungsmöglichkeiten im Fachunterricht, die eine Auseinandersetzung mit der Technologie aus Unternehmensperspektive fördern könnten. Hierzu wird zunächst der allgemeine Fachunterricht betrachtet, bevor im Ausblick dann auf den Mathematikunterricht eingegangen wird.

4.2 3D-Druck in der digitalen Arbeitswelt und im regulären Fachunterricht der allgemeinbildenden Schulen

4.2.1 Theoretischer Rahmen

3D-Druck als „neues“ digitales Werkzeug der digitalen Arbeitswelt

In einer im Jahr 2021 durchgeführten Befragung des Branchenverbandes der deutschen Informations- und Telekommunikationsbranche (BITKOM) gaben 44% der 551 befragten Industrieunternehmen an, dass sie bereits den 3D-Druck einsetzen, weitere 42% planen oder diskutieren die Nutzung der Technologie (Rohleder, 2021). Seit den 1980er-Jahren hat der 3D-Druck als „neue“ Produktionsmethode neben den herkömmlichen formgebenden (z. B. Gießen) und subtraktiven Verfahren (z. B. Fräsen) insbesondere in Industrie und Handwerk eine kleine Revolution ausgelöst (Fastermann, 2014; Hagl, 2015; Junk, 2017). Hierfür gibt es vielfältige Gründe: Die 3D-Druck-Technologie kann zwar herkömmliche Produktionsmethoden nicht ersetzen, bietet aber in vielen Aspekten eine wichtige, kosten- und zeitsparende Alternative (Fastermann, 2014). Insbesondere in den Bereichen Customization und Personalization³ wirkt die Technologie vorteilhaft, da auch kleine Stückzahlen oder Einzelstücke ohne Mehrkosten produziert werden können. Weitere Vorteile umfassen u. a. das Einsparen von Abfallprodukten sowie die Flexibilität der Einsatzmöglichkeiten oder die Handhabbarkeit (u. a. Fastermann, 2014; Hagl, 2015). Deswegen ist es auch nicht verwunderlich, dass die 3D-Druck-Technologie in seinen verschiedenen Facetten⁴ bereits in vielen Branchen, wie u. a. der Bauindustrie, der Medizintechnik, der Luft-, Schiff- und Raumfahrttechnik oder im Prototypenbau eingesetzt wird. Durch diesen Einsatz wird die Technologie folglich weiterentwickelt und es kann davon ausgegangen werden, dass die Technologie in den kommenden Jahren auch in weiteren Bereichen zum Einsatz kommt.

³ Customization bezieht sich auf die explizite individuelle Anpassungsfähigkeit eines Produkts durch die Anwender:in oder die Käufer:in. Personalization hingegen ist die implizite Anpassung eines Produkts durch ein (dienstleistendes) Unternehmen an die Bedürfnisse der Anwender:in.

⁴ Für einen Überblick über die verschiedenen Produktionsmethoden, die unter dem Überbegriff „3D-Druck“ oder „Additive Manufacturing“ gesammelt werden, siehe u. a. Fastermann (2014)

Institutionelle Bildungsziele der allgemeinbildenden Schulen

Der generelle Bildungsauftrag der allgemeinbildenden Schulen umfasst neben der fachlichen Förderung und Ausbildung, dem allgemeinen Erziehungsauftrag, der Entwicklung kognitiver, emotionaler, sozialer, kreativer und körperlicher Fähigkeiten sowie der kulturellen und gesellschaftlichen Orientierung u. a. auch die Ermöglichung von beruflicher Teilhabe. So besagt beispielsweise das Schulgesetz Schleswig-Holstein:

Die Schule soll dem jungen Menschen zu der Fähigkeit verhelfen, in einer ständig sich wandelnden und dabei zunehmend digitalen Welt ein erfülltes Leben zu führen [...]. Es gehört zum Auftrag der Schule, die jungen Menschen zur Teilnahme am Arbeitsleben und zur Aufnahme einer hierfür erforderlichen Berufsausbildung zu befähigen. (SchulG SH, 2007, §4)

Die Kultusministerkonferenz (KMK) veröffentlichte 2017 eine Empfehlung zur Umsetzung der Ermöglichung beruflicher Teilhabe in der allgemeinbildenden Schule. Diese zeigt neben Zielen (u. a. Persönlichkeitsentwicklung, Kennenlernen verschiedener Berufsbereiche) auch Maßnahmen und konkrete Umsetzungsmöglichkeiten auf (KMK, 2017a): Die KMK empfiehlt die Verknüpfung von Angeboten zur Berufsorientierung mit dem Schulalltag, u. a. in einer möglichen Zusammenarbeit zwischen beruflichen Schulen, aber auch durch Praktika. Es ist hervorzuheben, dass die aufgeführten Umsetzungsmöglichkeiten sowohl an schulischen als auch an außerschulischen Lernorten durch ihren Projektcharakter vereint werden. Einer 2022 durchgeführten Untersuchung der Bertelsmann Stiftung zufolge empfinden nur ein Viertel der befragten 14- bis 20-jährigen, dass es genügend Informationen zur Berufswahl gibt und sie sich gut zurechtfinden, 53% hingegen geben an, dass es zwar genügend Informationen gibt, sie sich aber schwer zurechtfinden. Darüber hinaus geben 18% der Befragten an, dass es insgesamt zu wenig Informationen zur richtigen Berufswahl gibt (Barlovic et al., 2022). Dies lässt vermuten, dass die von der KMK vorgeschlagenen Maßnahmen, abgesehen von den Berufspraktika, nur wenig oder unzureichend umgesetzt werden.

An dieser Stelle bleibt die Frage, inwiefern neben den Berufspraktika, bei denen Schüler:innen eigenständig Berufsbranchen wählen, insbesondere in der Schule authentische Kontaktmöglichkeiten zur digitalen Arbeitswelt geschaffen werden können, sodass Schüler:innen mit verschiedenen Branchen, einzelnen Berufen oder relevanten Aspekten der Arbeitswelt in Berührung kommen. Dabei ist vor allem der reguläre Fachunterricht von Interesse, in dem diese Thematik im Verlauf der Sekundarstufe kontinuierlich betrachtet werden kann. Dies dürfte nicht nur eine höhere Effektivität haben als punktuelle Angebote im Rahmen einer Projektwoche, sondern durch die Verknüpfung mit den curricularen Fachinhalten auch deren Relevanz für die Arbeitswelt aufzeigen. Der zuletzt genannte Punkt ist insbesondere für den Mathematikunterricht interessant, da das Relevanzparadox (Niss, 1994) für das Fach Mathematik eine besondere Herausforderung darstellt.

4.2.2 Forschungsfragen

Aus mathematikdidaktischer Perspektive werfen die oben genannten Aspekte die Frage auf, inwiefern es möglich ist, dass der Mathematikunterricht sinnvoll zu einer Berufsorientierung und -vorbereitung der Schüler:innen beiträgt. Aufgrund der Relevanz der 3D-Druck-Technologie für den derzeitigen und zukünftigen Arbeitsmarkt soll diese für die Beantwortung der Frage exemplarisch herangezogen werden. In unserer Studie sollen einerseits die Rahmenbedingungen der digitalen Arbeitswelt insbesondere in Bezug auf die aus Unternehmenssicht erwarteten Kenntnisse zukünftiger Arbeitnehmer:innen hinsichtlich der 3D-Druck-Technologie sowie andererseits die Möglichkeiten für die Integration der 3D-Druck-Technologie in den regulären (Mathematik-)Unterricht als Lerngelegenheit untersucht werden. Leitend sind dabei die folgenden zwei Forschungsfragen:

1. Welche 3D-Druck-bezogenen Kenntnisse werden von Schulabsolvent:innen beim Übergang in die Ausbildung bzw. bei dem Einstieg in Berufe, die im professionellen Alltag die 3D-Druck-Technologie nutzen, erwartet?
2. Wie könnten diese Kenntnisse aus Unternehmenssicht bereits an allgemeinbildenden Schulen thematisiert werden?

4.3 Methode

Als Design der Studie wurde ein leitfadengestütztes Interview gewählt. Dies begründet sich aus dem explorativen Charakter der Studie und der Tatsache, dass die befragten Personen keinen bildungswissenschaftlichen Hintergrund haben und damit keine entsprechenden Modelle und fachsprachlichen Begriffe in ihren Äußerungen verwenden. Das gewählte Format der Datenerhebung musste demnach sicherstellen, dass sich die Befragten in ihrer eigenen Ausdrucksweise äußern können und dass die Äußerungen der befragten Personen in dem gemeinten Sinne weitgehend verstanden werden (ggf. durch Nachfragen im Interview).

4.3.1 Stichprobe

Repräsentant:innen dänischer und deutscher Unternehmen verschiedener Branchen⁵, die in ihrem beruflichen Alltag die 3D-Druck-Technologie nutzen, wurden per E-Mail kontaktiert und um ein Interview gebeten. Die Entscheidung für eine binationale Stichprobe ergab sich einerseits aus dem Kontext des deutsch-dänischen Forschungsprojekts. Andererseits bietet die deutsch-dänische Stichprobe aufgrund der deutlich stärkeren digitalen Ausrichtung des Schulunterrichts in Dänemark (Eickelmann et al., 2019) die Chance, dass von den dänischen Unternehmen ein größeres Potenzial in den Schulen gesehen wird als es bei deutschen Unternehmen der Fall ist. Dies lässt einen reichhaltigeren Datensatz erwarten.

⁵ Es wurde eine Stichprobe mit vielen verschiedenen existierenden Branchen angefragt, die im professionellen Alltag die 3D-Druck-Technologie nutzen. Die angefragten Branchen umfassen u. a. Forschungsinstitute, Bauindustrie, Prototypenbau, Luft- und Schifffahrt, Automobilindustrie, 3D-Druckerfertigung, Gießformendruck, Spritzguss-Maschinenbau, Automatisierungs- und Produktionsindustrie sowie Medizintechnik.

Es beteiligten sich 15 Repräsentant:innen von Unternehmen aus Deutschland und Dänemark (9 resp. 6 Teilnehmende; 2 weiblich, 13 männlich). Bei der Altersverteilung⁶ war die Kategorie zwischen 41-50 Jahren mit 6 Personen am stärksten vertreten, gefolgt von den Kategorien „31-40“ (3 Personen), „51-60“ und „61+“ (je 2 Personen). Zudem war zum Erhebungszeitpunkt eine Person jünger als 31 Jahre. 10 der befragten Expert:innen hatten mehr als 7 Jahre Erfahrung im beruflichen Umgang mit sowie der professionellen Nutzung der 3D-Druck-Technologie (davon hatten 6 Personen 7-18 Jahre und 4 Personen 19-30 Jahre Erfahrung). Zudem gaben jeweils 2 der Expert:innen an, 4-6 Jahre oder 1-3 Jahre Erfahrung im Umgang mit der Technologie im beruflichen Alltag zu haben.

4.3.2 Instrumente

Die Datenerhebung erfolgte mittels 20- bis 40-minütiger leitfragengestützter Einzelinterviews in einer Videokonferenz⁷. Die Leitfragen waren dabei in drei Fragenblöcke aufgeteilt. Der erste Block umfasste vier demographische Fragen (vgl. Abschnitt 4.3.1), der zweite Block behandelte die Nutzung der 3D-Druck-Technologie im Unternehmen und beinhaltete folgende Fragen:

- *In welcher Branche ist Ihr Unternehmen tätig?*
- *Wofür wird die 3D-Druck-Technologie bereits konkret in Ihrem Unternehmen eingesetzt und welche 3D-Druck-Technologie(n) nutzen Sie?*
- *Was sind aus Ihrer Sicht die wichtigsten Vorteile der 3D-Druck-Technologie?*

Der dritte Fragenblock diskutierte abschließend die zu durchlaufenden Ausbildungsschritte für den Umgang mit der Technologie mittels der folgenden Fragen:

- *Wie erkennt man jemanden, der sehr gut mit der 3D-Druck-Technologie umgehen kann?*
- *Was muss jemand lernen/gelernt haben, der bei Ihnen im Unternehmen einen a) Modellierungsprozess, b) Tesselierungs-/Triangulierungsprozess, c) Slicingprozess und/oder d) Druckprozess durchführt?*
- *Was von dem zuvor Genannten lernen zukünftige Arbeitnehmende in der Ausbildung? Was wird nicht in der Ausbildung, sondern nach Beendigung dieser im Unternehmen gelernt?*
- *Inwiefern denken Sie, dass die genannten Fähigkeiten bereits in der Sekundarstufe der allgemeinbildenden Schule (Klasse 5 – 13) aufgegriffen werden könnten? Was wäre sinnvoll, was nicht?*

⁶ Die Aufnahmequalität eines Interviews ließ nicht zu, Altersgruppe oder Erfahrung mit der 3D-Druck-Technologie im beruflichen Kontext der befragten Person zu transkribieren, weshalb diese beiden demographischen Angaben nur mit $n = 14$ dargestellt werden.

⁷ Alle Interviews wurden durch die zweisprachige Erstautorin durchgeführt. Das Studiendesign und die Fragen wurden zuvor vom Datenschutzbeauftragten und der Ethikkommission des IPN Kiel genehmigt.

4.4 Ergebnisse

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde eine qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2015) durchgeführt. Hierfür wurden zunächst die Audioaufnahmen der geführten Interviews transkribiert. Anschließend wurden induktiv zwei Kategoriensysteme entsprechend den Forschungsfragen gebildet. Diese wurden abschließend deduktiv durch eine zweite Person doppelkodiert (60% der Interviews wurden doppelkodiert, was 63,16% der Codes entspricht, davon 64 Codes (64,65%) im Kategoriensystem zur Forschungsfrage 1 und 20 Codes (54,05%) im Kategoriensystem zur Forschungsfrage 2). Die Intercoder-Reliabilität war sehr gut (Krippendorff's $\alpha = .87$ für das erste Kategoriensystem und $\alpha = .86$ für das zweite Kategoriensystem nach Konsensverfahren).

Bezüglich Forschungsfrage 1 zeigen die Daten, dass von zukünftigen Arbeitnehmer:innen, die mit der 3D-Druck-Technologie in ihrem professionellen Alltag umgehen, Kenntnisse aus verschiedenen Bereichen erwartet werden. Eine dezidierte Trennung von erwarteten Kenntnissen zu Beginn der Ausbildung und Beginn des Arbeitsverhältnisses war dabei nicht möglich, da alle befragten Unternehmensrepräsentant:innen auf einen Mangel an Ausbildungsmöglichkeiten zur 3D-Druck-Technologie hinwiesen⁸. Die genannten Kenntnisse wurden mittels Kategorisierung in sieben Bereiche aufgeteilt: Programmier- und Softwarekenntnisse, Wissen über Möglichkeiten und Limitationen, Umgang mit dem Drucker und Hardwarekenntnisse, Mathematisches Vorwissen, (Technische) Affinität, Branchenspezifisches Wissen⁹ und Materialkenntnisse (s. Tab. 4.1).

Zur Beantwortung der Forschungsfrage 2 ist in Tabelle 4.2 das Kategoriensystem aufgeführt, welches aus Unternehmenssicht sinnvolle Möglichkeiten zur frühzeitigen Thematisierung der in Tabelle 4.1 genannten Kenntnisse im Schulkontext aufzeigt. Hierbei ist zu beachten, dass es sich bei diesen Kategorien um Wünsche und Hinweise von Unternehmen handelt, die hier zunächst noch nicht mit dem realen Schulalltag in Verbindung gebracht sind. Die interviewten Unternehmensrepräsentant:innen schlugen zur Förderung der erwarteten Kenntnisse vor, dass die 3D-Druck-Technologie in den Regelunterricht (sowohl im alltäglichen Unterricht als auch im Projektkontext) eingeht. Zudem sehen sie das Aufzeigen der Alltagsrelevanz der Technologie und das damit einhergehende Stärken von Interesse an selbiger als förderlich für den Erwerb der von ihnen erwarteten Kenntnisse an. Darüber hinaus wurde auch das Schaffen erster Druckerfahrungen und das Darlegen verschiedener Drucktechnologien als relevant erachtet.

⁸ Mittlerweile werden Weiterbildungskurse zur 3D-Druck-Technologie von verschiedenen IHK's in Deutschland angeboten. Zudem sollte hier auch angemerkt werden, dass FabLabs/Makerspaces, d. h. offene Werkstätten, in denen auch Privatpersonen Zugang zu u. a. der 3D-Druck-Technologie haben, verbreiteter und oft an Universitäten oder auch Schulen angebunden sind.

⁹ Unter Branchenspezifischem Wissen wurde all diejenigen Aussagen kategorisiert, die Wissen umfassen, die nur auf die jeweilige Branche, nicht aber branchenübergreifend als relevant genannt wurden.

Tabelle 4.1: Kategoriensystem zur Forschungsfrage 1 mit Beispielaussagen aus den Interviews, der absoluten Anzahl der zugeordneten Aussagen sowie der Anzahl der Interviews, die Aussagen der jeweiligen Kategorie vorweisen. Beispielaussagen aus Interviews mit dänischen Repräsentant:innen wurden durch die Erstautorin übersetzt.

Kategorie	Anzahl der Aussagen	Anzahl der Interviews	Anzahl der Beispielaussage
Programmier- und Software-kenntnisse	24	14 von 15	„Es ist ein klarer Vorteil, wenn du mit 3D-Druck arbeitest, dass du Wissen von [CAD-Programmen] mitbringst [...]. Das ist eines der grundlegenden Dinge, in denen man gut sein muss.“ (<i>Automatisierungsindustrie (übersetzt)</i>)
Wissen über Möglichkeiten und Limitationen	16	9 von 15	„[Man muss] verstehen, welche Vorteile habe ich, und einen Vorteil habe ich, wenn ich Gewichtsersparnisse herkrige. Also müsste ich das anders konstruieren [...], vielleicht möchte ich eine Funktion reinbauen, die ich eben nur durch 3D-Druck oder additiv herstellen kann, weil ich das nicht gießen und auch nicht fräsen kann.“ (<i>Drucker-Fertigung</i>)
Umgang mit dem Drucker & Hardwarekenntnisse	14	10 von 15	„[...] wenn ich jetzt an unsere [Drucker] denke muss man natürlich ein bisschen anpassen mit den Dämpfen, man muss ein bisschen anpassen mit heißen Oberflächen, mit Flüssigkeiten, also das muss schon jemand [sein], der ruhig und sorgfältig ist.“ (<i>Prototypenbau</i>)
Mathematisches Vorwissen	13	8 von 15	„Und später kommt es natürlich ganz einfach auf Volumenberechnung, auf Zeitberechnung, auch auf Materialberechnung hinsichtlich der Gewichte an. Mathematik ist eine absolute Basic-Grundlage.“ (<i>Luft- & Schifffahrt</i>)
(Technische) Affinität	12	9 von 15	„Die Person muss natürlich irgendwie eine Affinität zu Technik haben.“ (<i>Drucker-Fertigung</i>)
Branchenspezifisches Wissen	11	6 von 15	„Der Mix aus: Wir verstehen die Maschine, wir wissen, wie man 3D druckt als solches, und wir wissen, wie eine Baustelle abzulaufen hat. Also welche Gewerke muss man wann integrieren, wann kommt der Beton, wann kommt die Isolierung, wie hoch drücken wir.“ (<i>Bauindustrie</i>)
Materialkenntnisse	9	6 von 15	„[...] vor allem mit welchen Materialien man arbeiten kann [...], soll das Produkt z. B. aus Plastik oder Metall sein, und wenn es aus Plastik sein soll, aus welchem Plastik und wenn es aus Metall sein soll, aus welchem Metall.“ (<i>Produktionsindustrie (übersetzt)</i>)

Tabelle 4.2: Kategoriensystem zur Forschungsfrage 2 mit Beispielaussagen aus den Interviews, der absoluten Anzahl der zugeordneten Aussagen sowie der Anzahl der Interviews, die Aussagen der jeweiligen Kategorie vorweisen. Beispielaussagen aus Interviews mit dänischen Repräsentant:innen wurden durch die Erstautorin übersetzt.

Kategorie	Anzahl der Aussagen	Anzahl der Interviews	Beispielaussage
Eingang in den regulären Fachunterricht	16	10 von 15	„Wir würden uns natürlich wünschen, dass auch schon in der Schule das Thema digitale Modelle auftaucht, da reden wir dann eben über ein digitales Modell in 3D, was dann ja die Basis für die anderen Prozesse [ist].“ (<i>Drucker-Fertigung</i>)
Alltagsrelevanz aufzeigen & Interesse stärken	10	7 von 15	„Die gehen alle nach Hause und sagen, hey Papa, hey Mama, ich brauche einen 3D-Drucker [...] und das ist glaube ich ganz cool, weil man es irgendwo mit der Digitalisierung zu tun hat, sprich mit Computern, mit Computerprogrammen [...] und ich dann wirklich auch was bauen kann. Diese Kombination ist spannend.“ (<i>Spritzguss</i>)
Erste Druckerfahrungen	9	6 von 15	„Ich glaube, ganz generell sollte es darum gehen, die 3D-Druck- oder Additive-Manufacturing-Technologie den SuS vorzustellen, [...] dass sie damit arbeiten.“ (<i>Automatisierung (übersetzt)</i>)
Aufzeigen verschiedener Drucktechnologien & Möglichkeiten	2	2 von 15	„Was ich mir noch wünschen würde, wenn man auf unterschiedliche Druck-Technologien eingeht. Weil sich da ganz viel tut und auch sich der Markt teilweise ganz schnell bereinigt, ist das natürlich immer gut, dass man da ein bisschen über den Tellerrand schauen kann.“ (<i>Prototypenbau</i>)

4.5 Diskussion und Ausblick

Aufgrund des wachsenden Fachkräftemangels kommen Berufsorientierungsmöglichkeiten in der schulischen Bildungsphase eine zentrale Rolle zu. Neben verschiedenen außerschulischen Möglichkeiten zur Berufsorientierung, wie Unternehmensbesuche oder Praktika, bieten auch innerschulische Angebote eine Möglichkeit, Schüler:innen einen authentischen Einblick in verschiedene Branchen des digitalen Arbeitsmarktes zu geben. Da Praktika und andere außerschulische Berührungspunkte mit der Arbeitswelt meist auf Basis individueller Vorstellungen und Interessen ausgewählt werden, können innerschulische Aspekte im Rahmen des regulären Unterrichts dazu dienen, dass Schüler:innen Einblicke in zuvor nicht von ihnen bedachte Branchen erhalten. Folglich kann erwartet werden, dass Schüler:innen für später anstehende Entscheidungsprozesse ein breiteres Überblickswissen zu den verschiedenen Bereichen und Möglichkeiten der Arbeitswelt aufbauen.

Die in der Interviewstudie mit Unternehmensrepräsentant:innen erarbeiteten Kategoriensysteme (Tab. 4.1 und 4.2) zeigen exemplarisch Anknüpfungspunkte auf, wie Schüler:innen erste Einblicke in solche Berufe gegeben werden können, die in ihrem professionellen Alltag die 3D-Druck-Technologie nutzen. Dabei können aus dem ersten Kategoriensystem (Tab. 4.1) Anhaltspunkte abgeleitet werden, welches Wissen und welche Fertigkeiten aus Unternehmenssicht von Schulabsolvent:innen beim Übergang in diese Berufe erwartet werden:

- *Programmier- und Softwarekenntnisse:* (Zukünftige) Arbeitnehmende müssen sich mit der notwendigen Begleitsoftware auseinandersetzen. Dies umfasst sowohl die Modellierungsarten (direkt, parametrisch, skriptbasiert, vgl. Fastermann, 2014) als auch den Umgang mit Modellierungs- und Triangulationssoftware und das Verständnis für die zugrundeliegenden Prozesse.
- *Wissen über Möglichkeiten und Limitationen:* Dieser Bereich umfasst das Wissen darüber, wofür die verschiedenen Technologien, die unter dem Überbegriff „3D-Druck“ gesammelt werden, genutzt werden können und wofür sie hingegen nicht eingesetzt werden können oder sollten.
- *Umgang mit dem Drucker & Hardwarekenntnisse:* Neben dem Wissen über die Begleitsoftware müssen (zukünftige) Arbeitnehmende auch ausreichendes Wissen über den tatsächlichen Druckvorgang sowie der Bedienung und Instandhaltung eines 3D-Druckers besitzen. Unter diesen Wissensbereich fallen zudem auch die Nachbehandlung von gedruckten Objekten.
- *Mathematisches Vorwissen:* Jegliche Technologie basiert in ihren Grundzügen auf mathematischen Elementen, sodass auch zur professionellen Nutzung der 3D-Druck-Technologie ein mathematisches Verständnis der Technologie erwartet wird. Unter diesen Wissensbereich fallen u. a. logisches Verständnis (z. B. für Codestrukturen) oder das räumliche Vorstellungsvermögen.
- *(Technische) Affinität:* Von (zukünftigen) Arbeitnehmenden wird zudem Affinität und Offenheit bezüglich sowie Interesse an technischen Elementen erwartet. Dieser Bereich deckt weniger einen Wissensbereich als eine Haltung ab, die in der Schule entwickelt werden kann.

- *Branchenspezifisches Wissen:* Neben Wissen zur 3D-Druck-Technologie gibt es auch immer branchenspezifisches Wissen, das nicht über verschiedene Branchen hinweg relevant ist. Ein Beispiel hierfür ist architektonisches Wissen für die Nutzung des 3D-Drucks im Hausbau. Beim branchenspezifischen Wissen ist ein schulisches Angebot aufgrund der Spezialisierung vermutlich am schwierigsten umzusetzen.
- *Materialkenntnisse:* Neben den Hardware- und Softwarekenntnissen ist ein letzter relevanter Bereich das Wissen über Material, das für den 3D-Druck-Prozess genutzt werden kann sowie der Umgang mit Druckmaterialien.

Es ist nicht die Frage, ob Schüler:innen während ihrer Schulbiografie mit verschiedenen Branchen der Arbeitswelt in Kontakt kommen können sollen (u. a. ist es Ziel der gymnasialen Oberstufe, vgl. KMK, 2023), sondern wie dies sinnvoll mit dem regulären Schulunterricht verknüpft werden kann. Neben der Nutzung außerschulischer Lernorte sollten dementsprechend auch innerschulische Lernangebote zur Berufsorientierung und -vorbereitung in den verschiedenen Schularten angeboten werden. Für das betrachtete Exempel einer relevanten digitalen Technologie des digitalen Arbeitsmarktes, das für derzeitige und zukünftige Arbeitsprozesse von Relevanz ist (hier: 3D-Druck), können drei Ansätze der Schaffung von unterrichtlichen Lernangeboten aufgezeigt werden: die Nutzung von 3D-Druck zur Lernunterstützung, als Lerninhalt oder als Lernkontext (vgl. u. a. Figueiredo & Alfonso, 2005). Diese sollen hier mit Bezug zum Mathematikunterricht vorgestellt werden.

3D-Druck zur Lernunterstützung

Die Technologie wird verwendet, um Visualisierungshilfen zu drucken, die das Mathematiklernen unterstützen. Dabei kann die 3D-Druck-Technologie sowohl von den Lehrkräften (z. B. für den Vergleich eines Kegels und Pyramiden mit verschiedenen n -Ecken als Grundseite) als auch von den Schüler:innen (z. B. der Druck von manipulierten Würfeln, vgl. Dilling et al., 2021) eingesetzt werden. Die 3D-Druck-Technologie wird hier also genutzt, um Lerninhalte zu veranschaulichen. Bei der Nutzung der 3D-Druck-Technologie als Lernunterstützung könnten zwei der vier Kategorien des zweiten Systems (Tab. 4.2) abgedeckt werden, indem die Schüler:innen *erste Druckerfahrungen* erlangen, dadurch dass sie eigene Modelle zur Visualisierung drucken, die anschließend im *regulären Fachunterricht* verwendet werden können. Neben den bereits angeführten Beispielen der Kegel bzw. Pyramiden mit n -eckiger Grundseite oder der manipulierten Würfel, kann der 3D-Druck für jegliche druckbare Objekte genutzt werden, die differenzierend oder enaktiv wirkend den Mathematikunterricht unterstützen. Hierbei verbleibt die 3D-Druck-Technologie aber implizit, da sie nicht weiter thematisiert bzw. analysiert wird. Folglich werden weder die *Alltagsrelevanz* der Technologie noch die *verschiedenen Drucktechnologien* und die damit verbundenen *Möglichkeiten* aufgezeigt.

3D-Druck als Lerninhalt

In diesem Ansatz wird die 3D-Druck-Technologie explizit im regulären Unterricht oder im Projektkontext aufgegriffen. Im fächerübergreifenden Mathematik-,

Informatik- oder Technikunterricht kann z. B. thematisiert werden, wie die Hardware des 3D-Drucks funktioniert oder welche Code-Strukturen im 3D-Druck-Prozess genutzt werden. Zudem können auch Materialzusammensetzungen zum 3D-drucken im Chemieunterricht betrachtet werden (z. B.: Welches Material kann potenziell verwendet werden, beispielsweise bei der Nutzung des Extrusionsverfahrens?). Bei einem Einsatz der 3D-Druck-Technologie als Lerninhalt im Mathematikunterricht würde die größtmögliche Thematisierung der Technologie erreicht werden. Innerhalb dieses Ansatzes würde die Technologie im Mathematikunterricht explizit aufgegriffen und analysiert werden (u. a. können die Schüler:innen einen gesamten Druckprozess durchlaufen und so *erste Druckerfahrungen* erlangen, *verschiedene Drucktechnologien und Möglichkeiten kennenlernen*, um die Kategorisierung „3D-Druck“ zu verstehen und *Alltagsbereiche kennenlernen*, in denen der 3D-Druck relevant ist). Da jedoch die curricularen Inhalte des regulären Fachunterrichts eine zentrale Bedeutung haben, ist hierbei mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Projektkontext (statt einer Thematisierung im *regulären Mathematikunterricht*) notwendig. Dieser Kontext könnte aber ggf. mit fachlichen Inhalten in Konkurrenz stehen und insbesondere in Post-Corona-Zeiten aus Zeitgründen nicht umsetzbar sein. Zudem kann in Frage gestellt werden, inwiefern eine Auseinandersetzung in einem Projektkontext nachhaltig für die Berufsorientierung und -vorbereitung wirken kann, wenn diese nur sehr selten oder sogar nur einmalig stattfindet.

3D-Druck als Lernkontext

Im Gegensatz zur vorhergehenden Möglichkeit fokussiert dieser Ansatz die curricularen Lerninhalte des Mathematikunterrichts, die mittels des *Kontextes* 3D-Druck thematisiert und unterrichtet werden. Hierfür können innerhalb des Mathematikunterrichts Verknüpfungen von curricularen mathematischen Lerninhalten mit der 3D-Druck-Technologie gewählt werden. Hervorzuheben ist hierbei, dass der Fachunterricht nicht durchgehend mittels des Technologiekontextes unterrichtet wird, sondern dass Lernangebote, die die 3D-Druck-Technologie nutzen, im Verlauf der Bildungsbiografie regelmäßig in verschiedenen Schuljahren wiederkehren. Für die Kategorie *regulärer Mathematikunterricht* (Tab. 4.2) würde dies bedeuten, dass curriculare Lerninhalte im Lernkontext des 3D-Drucks unterrichtet werden. So könnte u. a. der Lerninhalt „Zusammengesetzte Körper“, der Teil des Geometrieunterrichts der Sekundarstufe I ist, im Kontext des 3D-Drucks mithilfe von Modellierungssoftware thematisiert werden. Hierdurch lernen die Schüler:innen die Zusammensetzung von geometrischen Grundkörpern als eine Boolesche Operation kennen, die Grundlage für den direkten Modellierungsprozess ist (vgl. Wulff et al., 2023b). Durch die Verwendung authentischer Aufgabenkontexte können die Schüler:innen zudem *verschiedene Drucktechnologien und Möglichkeiten der Technologie* in professionellen Nutzungsbereichen kennenlernen. Durch die Verknüpfung des außermathematischen Kontextes des 3D-Drucks mit curricularen Lerninhalten sowie mittels der authentischen Aufgabenkontexte kann zudem *die Alltagsrelevanz des 3D-Drucks* sowie der Lebensweltbezug des Mathematikunterrichts aufgezeigt werden. Ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes ist, dass ein 3D-Drucker nicht notwendigerweise an der Schule vorhanden sein

muss. Auch wenn die Nutzung der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext von dem Vorhandensein eines 3D-Druckers nicht abhängig ist, so können die Schüler:innen im Unterricht nur *erste Druckerfahrungen* machen, wenn ein 3D-Drucker vorhanden ist¹⁰ oder andere Möglichkeiten wie z. B. FabLabs oder Makerspaces genutzt werden.

Implikationen

Vor dem Hintergrund der Unternehmenssicht decken also die Nutzung der 3D-Druck-Technologie als Lerninhalt oder zur Lernunterstützung zwar relevante, aber nicht alle Möglichkeiten zur frühzeitigen Berufsorientierung und zielgerichteten Berufsvorbereitung ab. Die Nutzung des 3D-Drucks als Lernkontext kann hingegen neben den aus Unternehmenssicht relevanten Punkten auch einen für Akteure der Schulbildung zentralen Aspekt erfüllen: Mittels diesem Aspekt werden curriculare Inhalte aufgegriffen, es entsteht also keine allein implizite Nutzung des 3D-Drucks (3D-Druck als Lernunterstützung) und es ist kein Projektkontext notwendig (3D-Druck als Lerninhalt), der ggf. auf Kosten einer Auseinandersetzung mit fachlichen Inhalten durchgeführt wird. Neben den Rahmenbedingungen aus Unternehmenssicht, die in der berichteten Studie identifiziert wurden, spielen für das Gelingen der Verknüpfung von Anforderungen des digitalen Arbeitsmarktes mit dem Mathematikunterricht aber auch schulische Rahmenbedingungen eine zentrale Rolle. Neben den institutionellen Vorgaben, die eine Ermöglichung beruflicher Teilhabe vorsehen (SchulG SH §4; KMK 2017a, 2023), sind die Einstellungen von Lehrkräften zentral für eine Implementation im regulären Fachunterricht. Eine weitere innerhalb des Forschungsprojektes durchgeführte Rahmenbedingungsstudie bezogen auf schulische Rahmenbedingungen weist auf eine Offenheit der Mathematik-Lehrkräfte hin, die mit dem erwarteten Nutzen des 3D-Druck-Kontextes und der *Selbstwirksamkeitserwartung* der Lehrkräfte zusammenhängt (Wulff et al., 2023a). Eine weitere wesentliche Frage ist die Sicherung des Lernzuwachses der Schüler:innen bei der Nutzung der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im Mathematikunterricht. So sollte die Berufsvorbereitung nicht zulasten der fachlichen Lerninhalte implementiert werden. In folgenden Schritten soll deswegen in einem quasi-experimentellen Forschungsdesign die Frage beantwortet werden, ob sich Schüler:innen durch die Nutzung von 3D-Druck als Lernkontext nicht nur mit der Technologie auseinandersetzen und diese Auseinandersetzung im Sinne der Berufsorientierung unterstützend wirkt, sondern auch ob die Lernziele zu den curricularen mathematischen Fachinhalten (z. B. zusammengesetzte Körper oder Ebenendarstellungen) erreicht werden.

Limitationen der Studie

Die Interviews mit den Unternehmensrepräsentant:innen geben Einblicke in den Arbeitsalltag und die Voraussetzungen für verschiedene Branchen der digitalen Arbeitswelt, jedoch kann kein Anspruch auf Vollständigkeit oder Allgemeingültigkeit für alle

¹⁰ Im Rahmen von ICILS 2018 gaben 11,8% der befragten Schüler:innen an, eine Schule zu besuchen, in der mindestens ein 3D-Drucker sowohl für Lehrkräfte als auch für Schüler:innen nutzbar ist (Eickelmann et al., 2019). In einer im vorliegenden Forschungsprojekt durchgeführten Befragung gaben 34,8% der befragten Lehrkräfte von Gemeinschaftsschulen und Gymnasien in Schleswig-Holstein an, in ihrer Schule Zugriff auf einen 3D-Drucker zu haben (vgl. Wulff et al., 2023a).

Branchen, die mit der 3D-Druck-Technologie arbeiten, erhoben werden. Wir gehen jedoch davon aus, dass durch die Auswahl der Branchen eine große Breite erreicht wurde. Zudem wurde der 3D-Druck in dieser Studie als exemplarisches relevantes digitales Werkzeug der digitalen Arbeitswelt betrachtet. Dementsprechend können aus den Ergebnissen keine Schlüsse für eine allumfassende Berufsorientierung und -vorbereitung der Schüler:innen gezogen werden. Des Weiteren kann trotz der angegebenen Anzahl der codierten Elemente der Interviews keine Aussage über die Relevanz der verschiedenen Wissensbereiche im Sinne eines Rankings getroffen werden. Die Ergebnisse zeigen jedoch exemplarisch für eine Technologie auf, welches Wissen und welche Fertigkeiten erwartet werden, sowie wie diese aus Unternehmenssicht sinnvoll Eingang in die reguläre Schulbildung erhalten könnte.

5 RAHMENBEDINGUNGSSTUDIE – SCHULE

Der folgende Beitrag wurde am 30.11.2022 eingereicht und nach einem Peer-Review-Prozess in der untenstehenden Fassung am 14.04.2023 in **F. Dilling, D. Thurm, I. Witzke (Hrsg.): Digitaler Mathematikunterricht in Forschung und Praxis** veröffentlicht (DOI: 10.37626/GA9783959872041.0.26).

Wie sehen Lehrkräfte die Nutzung des 3D-Drucks als Lernkontext im Mathematikunterricht der Sekundarstufe?

Mira H. Wulff, Anika Radkowitzsch, Marc Wilken & Aiso Heinze

Zusammenfassung: Aufgrund der Digitalisierung der Arbeitswelt werden zunehmend digitale Kompetenzen von Schulabsolvent:innen erwartet. Im Beitrag wird eine Studie mit 166 Lehrkräften zu deren Sichtweise auf die Nutzung des 3D-Drucks als Lernkontext im Mathematikunterricht vorgestellt. Die Ergebnisse deuten auf eine Offenheit der Lehrkräfte hin, die mit dem erwarteten Nutzen des 3D-Druck-Kontexts und der Selbstwirksamkeitserwartung der Lehrkräfte zusammenhängt.

5.1 Einleitung

Eine der zentralen gesellschaftlichen Herausforderungen ist die zunehmende Digitalisierung der Arbeitswelt. Als Folge der Transformation von mechanischen oder analogen zu digitalen, automatisierten Prozessen (z. B. Kaiser et al., 2021) verändern sich die Anforderungen an die Kompetenzprofile von (zukünftigen) Arbeitnehmer:innen (z. B. Grundke et al., 2017). Dementsprechend werden innovative Unterrichtskonzepte an allgemeinbildenden Schulen benötigt, die die Schüler:innen auf die geforderten Kompetenzprofile der digitalen Arbeitswelt vorbereiten. Hierbei sind die Lehrkräfte der allgemeinbildenden Schulen einer der zentralen Faktoren: Entscheidungen bezüglich des Unterrichtsgeschehens werden unter anderem basierend auf curricularen Vorgaben verschiedener Ebenen (Bildungsstandards, Fachanforderungen und schulinterne Fachcurricula) sowie weiteren Rahmenbedingungen (Ausstattungsaspekte wie Schulbuch oder Digitalisierungsgrad) getroffen.

Ein Ansatz für Unterrichtskonzepte, die Schüler:innen auf die digitale Arbeitswelt vorbereiten, ist die Nutzung von Aspekten der digitalen Arbeitswelt als Lernkontexte im Fachunterricht. Eine Implementierung solcher Unterrichtskonzepte kann aber nur dann gelingen, wenn geeignete schulische Rahmenbedingungen gegeben sind und Lehrkräfte bereit sind, diese Unterrichtskonzepte in ihrem regulären Unterricht einzusetzen. Ziel der vorliegenden Befragung ist es, individuelle Begünstigungsfaktoren für

die Nutzung von Aspekten der digitalen Arbeitswelt als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht zu erfassen. Als Beispiel einer relevanten Technologie der digitalen Arbeitswelt wird die 3D-Druck-Technologie betrachtet. Entscheidend für Technologien, die unter diesem Oberbegriff gesammelt werden, ist die durch den additiven Aufbau eines Objekts entstehende Unterscheidung zu bestehenden formativen und subtraktiven Produktionsverfahren (vgl. Fastermann, 2014). Vorteile dieser Produktionstechnologie für Industrie sowie Branchen wie etwa der Luft- und Raumfahrt und der Medizintechnik sind unter anderem die schnellen iterativen Anpassungsmöglichkeiten und die dadurch ermöglichte Individualisierung von Teilen.

Die berichtete Studie ist Teil eines Forschungsprojekts, das der Frage nachgeht, inwiefern der 3D-Druck in den regulären Fachunterricht eingebunden werden kann, um die frühzeitige Auseinandersetzung mit einer für den Arbeitsmarkt relevanten digitalen Technologie sowie die Orientierung in der digitalisierten Arbeitswelt zu fördern. Im Hinblick auf den prognostizierten Fachkräftemangel ist zudem der Erwerb berufsrelevanter Kompetenzen ein Fokus des Projekts.

5.2 Schulische Rahmenbedingungen für eine Nutzung des 3D-Drucks als Lernkontext im Mathematikunterricht der Sekundarstufen I und II

5.2.1 Theoretischer Rahmen

Bedingungsfaktoren, die Einfluss auf die Einbindung digitaler Technologien im Schulkontext haben, werden in der Literatur u. a. als interne und externe Barrieren kategorisiert (Ertmer, 1999). Externe Barrieren sind beispielsweise schulinterne Ressourcen wie Hard- oder Software, die Ausbildung der Lehrkräfte oder der didaktische und technische Support (vgl. Eickelmann et al., 2019). Unter interne Barrieren fallen u. a. teilweise unbewusste Einstellungen der Lehrkraft über das Lehren und Lernen. Die drei in empirischen Studien am häufigsten genannten Barrieren für die Nutzung digitaler Technologien im regulären Fachunterricht sind nach Hew und Brush (2007) die Ausstattung (externe Barriere), Wissen und Fertigkeiten der Lehrkräfte sowie deren Einstellungen und Überzeugungen (jeweils interne Barrieren). Es kann davon ausgegangen werden, dass externe Barrieren durch den zunehmenden Digitalisierungsgrad der Schulen schrittweise abgebaut werden. Sie sind damit zwar temporär relevante Herausforderungen für die Integration von digitalen Technologien in den regulären Schulunterricht, jedoch können die internen Barrieren als umfassender und relevanter („biggest enablers“, Ertmer et al., 2012) im Implementationsprozess angesehen werden (vgl. Ertmer, 1999; Newhouse, 2001) und werden im Folgenden genauer betrachtet.

Nach Borko und Putnam (1995) hat das individuelle Wissen von Lehrkräften einen signifikanten Einfluss auf ihre Unterrichtsentscheidungen. Lehrkräftewissen wurde nach Shulman (1986) im PCK-Modell kategorisiert. Dieses Framework wurde u.a. durch Mishra und Koehler (2006) um eine technologische Komponente erweitert, indem u. a. die Bereiche des *technological knowledge (TK)*, *technological pedagogical knowledge (TPK)* und *technological pedagogical content knowledge (TPACK)* ergänzt wurden. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die effektive Integration von

Technologie im Unterricht auf der Interaktion von Technologie, Inhalt und Pädagogik basiert (Angeli & Valanidis, 2009). Neben dem Lehrkräftewissen hat die Einschätzung der Lehrkräfte der eigenen Handlungsfähigkeit (*Selbstwirksamkeitserwartung*) in Bezug auf die genannten Wissenskonstrukte eine relevante Bedeutung. *Selbstwirksamkeitserwartungen* haben einen signifikanten Einfluss auf die Nutzung von digitalen Technologien im Unterricht (Wozney et al., 2006). Eine Studie von Bauer und Kenton (2005) weist darauf hin, dass *Selbstwirksamkeitserwartungen* dabei wichtiger sein könnten als das Wissen und die Fertigkeiten der Lehrkräfte.

Neben den *Selbstwirksamkeitserwartungen* können weitere psychologische Konstrukte von Lehrkräften als relevant angesehen werden, wie etwa die Motivation sowie Überzeugungen zur Einbindung digitaler Technologien im Unterricht. Damit neue Unterrichtsansätze in den Unterricht eingebunden werden, müssen diese mit bestehenden Überzeugungen der Lehrkraft in Einklang gebracht werden können (Hughes, 2005; Zhao & Frank, 2003). Als bedeutsam werden in der Literatur die *task value beliefs* genannt, die gemeinsam mit dem Zuschreiben einer Erfolgserwartung zu einer Tätigkeit die Leistungsmotivation einer Person beschreiben (u. a. Wigfield & Eccles, 1992). So kann angenommen werden, dass ein neuer pädagogischer Ansatz dann eingesetzt wird, wenn Lehrkräfte diesem einen hohen *task value* zuschreiben. Dabei wird das Konstrukt *task value* in drei Wertkategorien unterteilt (vgl. u. a. Wigfield & Eccles, 1992; Wigfield, 1994):

1. *Intrinsic value (Freude)*: die individuelle Freude an dem Ansatz,
2. *Attainment value (Wichtigkeit)*: die individuell wahrgenommene Relevanz, den gegebenen Ansatz und damit verknüpfte Herausforderungen zu meistern,
3. *Utility value (Nutzen)*: der individuell wahrgenommene Nutzen des Ansatzes in Relation zu (Unterrichts-)Zielen.

5.2.2 Forschungsfragen

In unserer Studie sollen die schulischen Rahmenbedingungen insbesondere in Bezug auf die Einstellungen von Mathematiklehrkräften und deren Zusammenhang zur Intention zur Integration der 3D-Druck-Technologie für Lerngelegenheiten in ihrem Fachunterricht untersucht werden. Leitend sind dabei die folgenden zwei Forschungsfragen:

1. Welche Ausprägung haben bei Mathematiklehrkräften a) die *Selbstwirksamkeitserwartungen* in den Kompetenzbereichen *TK*, *TPK* und *TPACK* und b) die *task value beliefs* zur Integration der 3D-Druck-Technologie in den Mathematikunterricht?
2. Welche Zusammenhänge gibt es zwischen den *Selbstwirksamkeitserwartungen* bzw. *task value beliefs* und der Intention zur Implementation der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im Mathematikunterricht?

5.3 Methode

5.3.1 Stichprobe

Der Zugang zu dem Online-Fragebogen wurde per E-Mail an die Schulleitungen aller weiterführenden allgemeinbildenden Schulen in Schleswig-Holstein und Süddänemark versendet, mit der Bitte, diesen an die zuständigen Mathematik-Lehrkräfte der Sekundarstufe I und II weiterzugeben. Die Entscheidung für eine binationale Stichprobe wurde getroffen, um die Varianz zu erhöhen, da dänische Schulen laut ICILS (2018) eine deutlich höhere Digitalisierungsrate haben als deutsche Schulen.

Es beteiligten sich 166 Lehrkräfte an der Befragung (72 weiblich, 81 männlich, 13 keine Angabe). Bei der Altersverteilung war die Kategorie zwischen 31-40 Jahren mit 30,7% am stärksten vertreten, gefolgt von den Kategorien „41-50“ (28,9%) und „51-60“ (20,5%). Zudem waren zum Erhebungszeitpunkt 12 (7,23%) der befragten Lehrkräfte jünger als 31 Jahre, sowie 10 (6,02%) älter als 60 Jahre. Von den 166 Lehrkräften unterrichteten 112 (67,5%) an einer deutschen Schule in Deutschland, 32 (19,2%) an einer dänischen Schule in Dänemark, 10 (6%) an einer dänischen Schule in Deutschland und 1 (0,6%) an einer deutschen Schule in Dänemark (keine Angabe $n = 11$ (6,6%)). Insbesondere wurde in der Studie auch um die Beteiligung der Minderheitenschulen gebeten, da diese sich im Spannungsfeld beider (Schul-)Kulturen befinden. Die meisten der befragten Lehrkräfte unterrichteten an einem Gymnasium (47,0%), gefolgt von Gemeinschaftsschulen ohne gymnasiale Oberstufe (38,0%) und Gemeinschaftsschulen mit gymnasialer Oberstufe (8,4%).

Die teilnehmenden Lehrkräfte wurden zu Beginn befragt, ob sie bereits den 3D-Druck für Lerngelegenheiten in ihrem Mathematikunterricht nutzen. Innerhalb der Stichprobe hatten nur 12 Lehrkräfte¹¹ (7,2%) bereits die Technologie in ihrem Mathematikunterricht verwendet, hiervon 5 gelegentlich und 7 selten. Diese Lehrkräfte werden im Folgenden als Gruppe 1 bezeichnet. 154 der 166 befragten Lehrkräfte (92,8%) gaben an, dass sie die Technologie noch nicht für Lerngelegenheiten in ihrem Mathematikunterricht einsetzten (Gruppe 2¹²).

5.3.2 Instrumente

Die Studie wurde online als querschnittliche Fragebogenstudie durchgeführt. Der verwendete Fragebogen bestand aus drei Teilen. Der erste Teil umfasste demographische Fragen sowie jeweils ein Item zur digitalen Ausstattung der Schule mit¹³ und der individuellen Nutzung der zugänglichen 3D-Druckern.

¹¹ Von den 12 Lehrkräften unterrichteten 7 an einer deutschen Schule und 5 an einer dänischen Schule. Dies entspricht respektive 5,7% bzw. 15,2% der befragten Lehrkräfte an deutschen bzw. dänischen Schulen.

¹² Die Lehrkräfte aus Gruppen 1 und 2 erhielten in den Skalen *task value beliefs* (Freude), *task value beliefs* (Nutzen) sowie den drei Skalen zur *Selbstwirksamkeitserwartung* jeweils an ihre Vorkenntnisse angepasste Items (im Optativ bzw. im Konjunktiv formuliert). Zum Beispiel: Gruppe 1: „*Ich bin überzeugt, dass ich technische Probleme bei der Nutzung der 3D-Druck-Technologie lösen kann.*“; Gruppe 2: „*Ich bin überzeugt, dass ich technische Probleme bei der Nutzung der 3D-Druck-Technologie lösen könnte.*“

¹³ Antwortmöglichkeiten: 0 = Kein 3D-Drucker in der Schule zugänglich, 1 = 3D-Drucker in der Schule zugänglich

Der zweite Teil enthielt vierstufige Likert-Skalen¹⁴ zur Erfassung der psychologischen Konstrukte. Zunächst wurden die Lehrkräfte um eine Einschätzung ihres *Verhältnisses zu digitalen Medien* (im Allgemeinen bzw. im Mathematikunterricht) gebeten (Items basierend auf BITKOM, 2015). Anschließend gaben die Lehrkräfte ihre *Intention, die 3D-Druck-Technologie in ihrem Mathematikunterricht als Lernkontext zu verwenden*, an. Hierfür wurden Lehrkräften angepasst an ihre Schulform jeweils ein Beispielkontext für einen mathematischen Inhalt der beiden Sekundarstufen kurz erläutert: Für die Sekundarstufe I wurde der mathematische Inhalt „Zusammengesetzte Körper“ des Geometrieunterrichts herangezogen, der in direkten Modellierungsprozessen betrachtet werden kann. Für die Sekundarstufe II wurde der mathematische Inhalt „Ebenendarstellungen“ des Unterrichts zur analytischen Geometrie verwendet, da das STL-Format – ein wichtiges Triangulationsformat – als kontextualisierte Verknüpfung der Drei-Punkte-Form sowie des Normalenvektors betrachtet werden kann. Um die Einstellungen von Lehrkräften in Bezug auf die Implementierung der 3D-Druck-Technologie als Beispiel einer relevanten digitalen Technologie zu erheben, wurden Items zu den *task value beliefs* sowie zur *Selbstwirksamkeitserwartungen* in den Kompetenzbereichen *TK*, *TPK* und *TPACK* in Bezug auf die Implementation der 3D-Druck-Technologie im Mathematikunterricht verwendet. In der Fragebogengenerierung wurden die von Cheng (2019) genutzten Skalen übersetzt und für die Rahmenbedingungen der Studie adaptiert.

Der dritte Teil des Fragebogens bestand aus offenen Fragen, die insbesondere auf Chancen und Herausforderungen der Implementierung der 3D-Druck-Technologie im Mathematikunterricht eingehen. Ergebnisse dazu werden hier nicht berichtet.

Tabelle 5.1: Reliabilitätskoeffizienten Cronbachs Alpha (Skalen mit 3-4 Items) und Spearman Brown (Skalen mit 2 Items) der Skalen aus der Online-Lehrkräftebefragung.

Variable und Beispielitem	Gruppe	Anzahl Items	Reliabilität
Digitale Ausstattung, Medienkonzept & Nutzung (Haben Sie Zugang zu einem 3D-Drucker?)	1+2	2 (+2) ¹⁵	
Verhältnisses zu digitalen Medien (im Allgemeinen bzw. im Mathematikunterricht) (Wie stehen Sie dem Einsatz digitaler Medien im Mathematikunterricht gegenüber?)	1+2	2	0,82
Task value beliefs (Freude) (Aus Lehrkraftperspektive finde ich das Integrieren der 3D-Druck-Technologie in meinem Mathematikunterricht interessant.)	1 2	3 3	0,66 0,82
Task value beliefs (Wichtigkeit) (Mir ist es wichtig gut darin zu sein, die 3D-Druck-Technologie in meinen Mathematikunterricht zu integrieren.)	1+2	2	0,84

¹⁴ Antwortmöglichkeiten: 1 = stimme nicht zu, 2 = stimme eher nicht zu, 3 = stimme eher zu, 4 = stimme zu

¹⁵ Mithilfe zweier offener Fragen wurde abhängig von der Antwort im Ausstattungssitem erhoben, wie häufig die befragten Lehrkräfte den/die ihnen zugänglichen 3D-Drucker in dem letzten Monat genutzt haben.

Task value beliefs (Nutzen) <i>(Die 3D-Druck-Technologie ist nützlich/hilfreich im Mathematikunterricht, um Lerngelegenheiten für Schüler:innen zu verbessern.)</i>	1	2	0,66
	2	2	0,76
Selbstwirksamkeitserwartung TK <i>(Ich bin überzeugt, dass ich technische Probleme bei der Nutzung der 3D-Druck-Technologie lösen kann.)</i>	1	4	0,86
	2	4	0,88
Selbstwirksamkeitserwartung TPK <i>(Ich bin überzeugt, dass ich die 3D-Druck-Technologie verwenden kann, um das Lernen der Schüler:innen in einer Mathematikstunde zu fördern.)</i>	1	4	0,81
	2	4	0,83
Selbstwirksamkeitserwartung TPACK <i>(Ich bin überzeugt, dass ich die 3D-Druck-Technologie passend in den Mathematikunterricht und den zugehörigen Methoden integrieren kann.)</i>	1	4	0,82
	2	4	0,80

Die Reliabilitäten sind als gut einzuschätzen und liegen bis auf zwei Ausnahmen über 0,75. Die zwei geringeren Werte (0,66) sind aufgrund der geringen Größe von Gruppe 1 auch als akzeptabel einzustufen.

5.4 Ergebnisse

Bezüglich Forschungsfrage 1 zeigen die Daten, dass Lehrkräfte in Schleswig-Holstein und Süddänemark generell ein positives (59,6%) oder eher positives (29,5%) Verhältnis zu digitalen Medien im Allgemeinen haben (s. Tab.5.2). Ein ähnlich hoher Anteil der befragten Lehrkräfte steht ebenfalls dem Einsatz digitaler Medien im Mathematikunterricht grundsätzlich positiv (53,6%) oder eher positiv (30,1%) gegenüber.

Basierend auf der in 2018 durchgeführten ICILS Studie wurde angenommen, dass dänische Schulen besser mit 3D-Druckern ausgestattet sind als deutsche Schulen (vgl. Eickelmann et al., 2019). Unsere Stichprobe bildet dies ebenfalls ab. Von den 112 Lehrkräften an deutschen Schulen in Deutschland hatten 34,8% Zugriff auf einen 3D-Drucker an ihrer Schule, während von den 32 befragten dänischen Lehrkräften an dänischen Schulen 78,1% Zugang zu einem 3D-Drucker in ihren Schulen hatten¹⁶. Weiter gaben nur 9,6% der befragten Lehrkräfte an, dass das an ihrer Schule existierende Medienkonzept die 3D-Druck-Technologie beinhaltet.

Basierend auf den gegebenen Beispielen für eine Implementation der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im Mathematikunterricht (vgl. Abschnitt 3.2) gaben 78,5% der 149 Lehrkräfte, die (auch) in der Sekundarstufe I Mathematik unterrichten, an, dass sie sich die Nutzung der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext für den Unterrichtsinhalt „Zusammengesetzte Körper“ vorstellen können. Von den 92 befragten Mathematiklehrkräften, die in der Sekundarstufe II unterrichten, konnten sich 76,1% vorstellen, den Lernkontext 3D-Druck für den Unterrichtsinhalt „Ebenendarstellungen“ zu verwenden.

¹⁶ Die einzige Lehrkraft der Stichprobe einer deutschen Schule in Dänemark gab den Zugang zu einem 3D-Drucker im Schulkontext an, während 2 von 10 Lehrkräften von dänischen Schulen in Deutschland Zugriff auf einen 3D-Drucker hatten. Die Aussagekraft ist aufgrund der Stichprobengröße gering.

Tabelle 5.2: Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe sowie der vier Teildatensätze über die Lehrkräfte a) an deutschen Schulen (in Deutschland und Dänemark), b) an dänischen Schulen (in Deutschland und Dänemark) sowie c) die Lehrkräfte, die Zugang zu einem 3D-Drucker haben und d) die Lehrkräfte, denen kein 3D-Drucker zugänglich ist (tvb = task value beliefs, SWE = Selbstwirksamkeitserwartung).

		Ausstattung	Verhältnis zu digitalen Medien	tvb (Freude)	tvb (Wichtigkeit)	tvb (Nutzen)	SWE TK	SWE TPK	SWE TPACK
Gesamtstichprobe	MW	0,46	3,56	3,32	2,83	3,10	3,03	3,06	2,87
	SD	0,50	0,55	0,67	0,98	0,73	0,70	0,63	0,67
Lehrkräfte an deutschen Schulen	MW	0,39	3,61	3,39	2,96	3,18	3,02	3,10	2,91
	SD	0,49	0,51	0,60	0,90	0,64	0,72	0,62	0,65
Lehrkräfte an dänischen Schulen	MW	0,66	3,40	3,10	2,49	2,89	3,09	2,94	2,75
	SD	0,48	0,64	0,79	1,11	0,90	0,64	0,65	0,72
3D-Drucker zugänglich	MW	-	3,54	3,25	2,76	2,97	3,18	2,97	2,78
	SD	-	0,55	0,70	1,01	0,78	0,68	0,65	0,70
3D-Drucker nicht zugänglich	MW	-	3,57	3,40	2,89	3,25	2,88	3,15	2,97
	SD	-	0,56	0,62	0,94	0,64	0,70	0,61	0,63

Zur Beantwortung der Forschungsfrage 2 sind in Tabelle 5.3 die Korrelationswerte sowie Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Variablen aufgeführt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass positive Zusammenhänge zwischen der *Intention* und den *task value beliefs* bzw. den *Selbstwirksamkeitserwartungen* bzgl. *TPK* und *TPACK* bestehen. Dabei deuten sich Unterschiede zwischen den Lehrkräften mit und ohne erste Erfahrungen beim Einsatz des 3D-Drucks an (Gruppe 1 vs. Gruppe 2). Insbesondere bei den *task values beliefs* zur Wichtigkeit und zum Nutzen zeigen sich Tendenzen zur Verstärkung des jeweiligen Zusammenhangs zur Intention, den 3D-Druck im Mathematikunterricht einzusetzen, wenn erste Erfahrungen gemacht wurden (stärkere Korrelationen bei Gruppe 1 als bei Gruppe 2). Gleichzeitig zeigt sich bei bestehenden Erfahrungen zum Einsatz des 3D-Drucks (Gruppe 1) kein signifikanter Zusammenhang zwischen den *Selbstwirksamkeitserwartungen* und der Intention zur Nutzung der Technologie im Mathematikunterricht. Aufgrund der geringen Größe der Gruppe 1 sollten diese Ergebnisse in Folgestudien bestätigt werden.

Tabelle 5.3: Korrelationstabelle verschiedener Variablen (*tvb* = task value beliefs, *SWE* = Selbstwirksamkeitserwartung) mit der Intention, den 3D-Druck im Mathematikunterricht der Sek. I bzw. II einzusetzen. Korrelationswerte mit * sind signifikant mit $p < 0,05$.

Gruppe	Ausstattung	Verhältnis zu digitalen Medien	tvb (Freude)		tvb (Wichtigkeit)		tvb (Nutzen)		SWE TK		SWE TPK		SWE TPACK	
	1+2		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Intention Sek I	-0,18*	0,26*	0,64*	0,66*	0,76*	0,43*	0,79*	0,56*	0,57	-0,08	0,49	0,52*	0,51	0,42*
Intention Sek II	-0,08	0,38*	0,70*	0,71*	0,97*	0,42*	0,93	0,59*	0,63	-0,13	0,62	0,60*	0,87	0,38*

5.4.1 Limitationen

Die Lehrkräftebefragung wurde während der Covid19-Pandemie durchgeführt, als die Schulen noch von den Nachwirkungen der Schulschließungen in den Jahren 2021 und 2022 betroffen waren. Da der Link zu der Online-Befragung an die Schulleitung per E-Mail verschickt wurde, gab es hier bereits eine erste Selektion, da einige Schulleitungen die Rückmeldung gaben, dass sie die Lehrkräfte in der für sie als herausfordernd empfundenen Zeit nicht weiter strapazieren wollen. Da die Schulleitungen grob über den Inhalt der Befragung informiert wurden, ist zudem eine weitere Selektion möglich, nach der eher Schulen teilgenommen haben, deren Kollegium oder Schulleitung technikaffin sind. Da nur Schulleitungen aus dem Bundesland Schleswig-Holstein in Deutschland und den Regionen Syddanmark (Süddänemark) und Sjælland (Seeland) in Dänemark angeschrieben wurden, beschränkt sich die Reichweite der Ergebnisse auf diese Gebiete. Zudem ist anzumerken, dass an der Befragung im Vergleich eher wenige dänische Lehrkräfte teilgenommen haben. Schließlich beschränkte sich der Fragebogen auf die Erhebung von Überzeugungen und Einstellungen (*task value belief* und *Selbstwirksamkeitserwartung*). Auf eine direkte Erfassung von Wissen wurde in dieser Studie aufgrund des zu großen Zeitbedarfs und der Pandemiesituation verzichtet.

5.5 Diskussion und Ausblick

In Zeiten von wachsendem Fachkräftemangel ist die Vorbereitung auf die digitale Arbeitswelt im Sinne von orientierenden Einblicken ein zentraler Aspekt, der auch bereits innerhalb der Schulbildung berücksichtigt werden sollte. Die Auseinandersetzung mit der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im Mathematikunterricht könnte eine frühe und im Sinne des Spiralcurriculums wiederkehrende Lerngelegenheit für Schüler:innen bieten, um eine relevante digitale Technologie der heutigen und zukünftigen digitalen Arbeitswelt kennenzulernen. Für eine erfolgreiche Implementation im Unterricht können sowohl externe als auch interne Barrieren (Ertmer, 1999) von zentraler Bedeutung sein. Es kann davon ausgegangen werden, dass Schulen durch den zunehmenden Digitalisierungsgrad digital besser ausgestattet und externe Barrieren folglich

reduziert werden. Relevant zur Einschätzung interner Barrieren sind die festgestellten positiven Zusammenhänge zwischen der Intention der Lehrkräfte zur Nutzung des 3D-Drucks im Mathematikunterricht und den *Selbstwirksamkeitserwartungen* bzgl. *TPK* und *TPACK* bzw. ihren *task value beliefs*. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen von Wozney et al. (2006) sowie Bauer und Kenton (2005), nach denen adäquate *Selbstwirksamkeitserwartungen* bedeutsam für den Einsatz von Technologien im Unterricht sind. Ebenso entsprechen die Ergebnisse bzgl. der *task value beliefs* den Vorhersagen des Erwartungs-Wert-Modells (Wigfield & Eccles, 1992).

Die Ergebnisse liefern insbesondere Ansatzpunkte für geplante Lehrkräftefortbildungen, die Gelegenheiten für eine Auseinandersetzung von Lehrkräften mit dem Lernkontext 3D-Druck bieten. Diese könnten die Lehrkräfte dazu ermächtigen, eigenständig mit der 3D-Druck-Technologie zu arbeiten und diese auf verschiedene Arten in ihren Unterricht einzubinden (beispielsweise auch als Visualisierungshilfe oder als Lerninhalt, vgl. Dilling et al., 2021). Dies könnte zur Steigerung der *task value beliefs* (u. a. in Bezug auf die Wichtigkeit und den Nutzen des Lernkontexts) und dem *Selbstwirksamkeitserleben* beitragen, was die Intention der Nutzung des 3D-Drucks im Unterricht stärken könnte. Die vorliegende Studie ist Teil eines Forschungsprojekts, in dem Designprinzipien sowie Unterrichtskonzepte und -materialien für die Verknüpfung curricularer Inhalte des Mathematikunterrichts mit dem 3D-Druck als Lernkontext erstellt und anschließend als Open Educational Resources veröffentlicht werden, sodass Lehrkräfte kostenfrei Zugriff darauf haben und diese nutzen und weiterentwickeln können.

6 DESIGNPROZESS DER UNTERRICHTSKONZEPTE

Dieses Kapitel basiert auf einem Artikel, der nach einem Peer-Review-Prozess in 2023 in **F. Dilling, F. Pielsticker, I. Witzke (Hrsg.): Learning mathematics in the context of 3D printing: Proceedings of the International Symposium on 3D Printing in Mathematics Education** (DOI: 10.1007/978-3-658-38867-6_3) veröffentlicht worden ist (siehe Anhang A).

Dem Ansatz des Education-Design-Research folgend (vgl. Abschnitt 2.4) wurden in der Entwicklung und Evaluierung der erstellten Unterrichtszyklen verschiedene Phasen durchlaufen, die hier mittels durchgeführter (Kurz-)Studien erläutert werden:

6.1 Elementarmathematischer Gehalt der 3D-Druck-Prozesse und dessen Bezüge zum Schulcurriculum

Um Verknüpfungen zwischen den curricularen mathematischen Lerninhalten der Sekundarstufen I und II und den mathematischen Hintergründen des 3D-Druck-Prozesses zu schaffen, wurde zunächst der mathematische Gehalt des 3D-Druck-Prozesses analysiert. Dabei wurde die zuvor in Abschnitt 2.1.2 vorgestellte Aufteilung der technischen Prozesse des 3D-Druck-Verfahrens als Grundlage gewählt. Im Folgenden sollen die mathematischen Hintergründe des 3D-Druck-Prozesses tabellarisch und stichwortartig dargestellt werden. Da in Abschnitt 2.1.2 bereits auf einige mathematische und technische Hintergründe des 3D-Druck-Prozesses eingegangen wurde, soll Tabelle 6.1 nur einen Ausschnitt über relevante elementarmathematische Elemente aufzeigen:

***Tabelle 6.1:** Übersicht über mathematische Inhalte in den einzelnen Schritten des 3D-Druck-Prozesses.*

Prozess	Mathematischer Inhalt
Modellierungsprozess	Übertragung eines realen Modells in ein digitales Modell Perspektiven Räumliches Vorstellungsvermögen Volumenkörper Boolesche Operationen (Vereinigung, Differenz, Schnittmenge) Achsen- und Punktspiegelung Drehungen Translationen Zentrische Streckung Rotationsfiguren

Designprozess der Unterrichtskonzepte

Tesselierung-/ Triangulations- prozess	Ebenendarstellungen Simplex ¹⁷ /Eckpunktmodelle Grenzwertprozesse
Slicingprozess	Funktionale Beschreibung des Fahrtweges Geometrische Abstandsberechnungen
Druckprozess	Prinzip von Cavalieri Ober- und Untersumme

Damit die zu entwickelnden Unterrichtskonzepte sich in den bestehenden Mathematikunterricht eingliedern lassen können und eine Passung zu den Zielen des Mathematikcurriculums besteht, wurde ein Abgleich der analysierten mathematischen Elemente im 3D-Druck-Prozess mit den inhaltsbezogenen Kompetenzen des Fachcurriculums durchgeführt. Zusammen mit den Ergebnissen der Rahmenbedingungsstudien sind damit die relevanten Rahmenbedingungen identifiziert (vgl. Abb. 6.1).

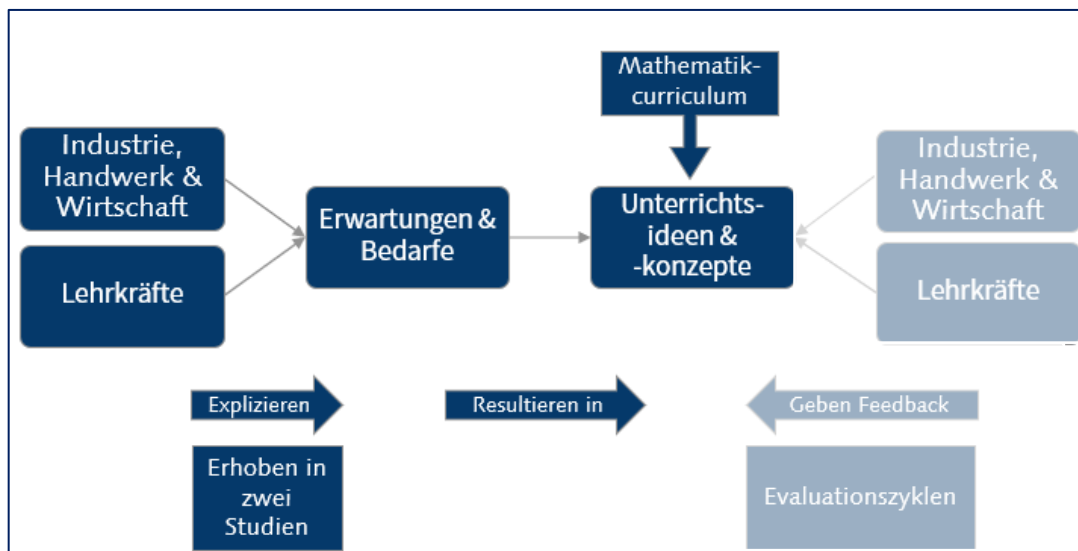


Abbildung 6.1: Weiterführung des in Kapitel 3 definierten Designprozesses der Unterrichtskonzepte, in dem die Einbindung der zu erstellenden Unterrichtsideen und -konzepte in das bestehende mathematische Fachcurriculum von zentraler Bedeutung ist.

Aufgrund des binationalen Charakters des Projekts wurden in dieser Phase sowohl die dänischen als auch die deutschen Mathematikcurricula betrachtet. Exemplarisch wird im Folgenden die obige Tabelle 6.1 aufgegriffen und durch Hinweise auf Inhalte des Mathematikcurriculums ergänzt. Da sich die Curricula der beiden Länder nur geringfügig bzgl. der curricularen Inhalte unterscheiden, wird zur übersichtlichen Darstellung hier exemplarisch nur auf Inhalte der Fachanforderungen des Landes Schleswig-Holstein (angegebene Seitenzahlen aus MBWK SH, 2014) verwiesen (Tab 6.2).

¹⁷ Als Simplex bezeichnet man in der Geometrie den Spezialfall eines n-dimensionalen Polytop. Jedes n-dimensionale Simplex besitzt n+1 Ecken.

Tabelle 6.2: Übersicht über die Verknüpfungspunkte zwischen der Mathematik hinter den 3D-Druck-Prozessen und mathematischen curricularen Inhalten der Sekundarstufe I und II. Die angegebenen Seitenzahlen beziehen sich auf die Fachanforderungen Mathematik des Landes Schleswig-Holstein (MBWK SH, 2014).

Mathematischer Inhalt	Verknüpfung zum Mathematikcurriculum
MODELLIERUNGSPROZESS	
Übertragung eines realen Modells in ein digitales Modell (Sek. I + II)	Die Übertragung eines realen Modells in ein Mathematisches ist Teil des mathematischen Modellierens, das eine allgemeine mathematische prozessbezogene Kompetenz ist (S. 18). Grundlage für diesen Prozess ist das Verstehen einer realen Situation, die in einem anschließenden mentalen Prozess vereinfacht oder idealisiert wird, damit sie mathematisiert werden kann (Kaiser et al., 2023). Dieser Modellierungsvorgang kann auch auf den Konstruktionsvorgang des 3D-Drucks übertragen werden.
Perspektiven (Sek. I)	Um den Modellierungsprozess zu entlasten, ist es sinnvoll, das Anfertigen, Verstehen und Interpretieren verschiedener geometrischer Perspektiven vorzuentlasten, sodass die Schüler:innen „[...] das Konstruieren [...] mit geometrischen Überlegungen [...]“ (S. 29) durchführen können.
Räumliches Vorstellungsvermögen (Sek. I)	Durch die Modellierung im kartesischen Koordinatensystem bei der direkten Modellierungsart, kann ein „[...] Aufbau des räumlichen Vorstellungsvermögens [...]“ (S. 29) fokussiert werden.
Volumenkörper (Sek. I)	Beim direkten Modellieren greifen Schüler:innen auf bereits bekannte Grundkörper zu, die sie laut Fachanforderungen „[...] benennen, beschreiben und charakterisieren“ (S. 29) können sollen.
Boolesche Operationen (Vereinigung, Differenz, Schnittmenge) (Sek. I + II)	Die Boolesche Operation <i>Vereinigung</i> kann bereits in einer didaktisch angepassten Weise als die Zusammensetzung disjunkter Körper thematisiert werden. So sollen die Schüler:innen sich laut Fachanforderungen mit dem „Volumen [und Oberflächeninhalt] von zusammengesetzten Körpern“ (S. 27) auseinandersetzen. Die Boolesche Operation <i>Differenz</i> spielt in den Fachanforderungen keine Rolle. Didaktisch unterstützt könnte sie durch den Einsatz einer direkten Modellierungssoftware (z. B. als „Bohrung“ bei Tinkercad®) trotzdem thematisiert werden. Die Boolesche Operation <i>Schnittmenge</i> wird in der Sekundarstufe I nur im Bereich des funktionalen Zusammenhangs mittels der besonderen Schnittpunkte von Funktionen, nicht aber in der Geometrie behandelt. Die

	geometrische Betrachtung von und mathematische Auseinandersetzung mit Schnittmengen von Geraden und Ebenen im Gebiet der Analytischen Geometrie sind Teil der Sekundarstufe II. Hier „untersuchen [die Schüler:innen] Geraden und Ebenen und [...] die zugehörigen Schnittmengen“ (S. 58).
Achsen- und Punktspiegelung (Sek. I)	Für die optimale Ausrichtung des konstruierten Objekts kann es notwendig sein, ein Objekt zu spiegeln, zu drehen oder parallel zu verschieben. Die aufgelisteten mathematischen Inhalte sind verbindlich bei einer Entscheidung der Fachkonferenz für den Ansatz der Abbildungsgeometrie in der Sekundarstufe I (vgl. S. 29).
Drehungen (Sek. I)	
Translationen (Sek. I)	
Zentrische Streckung (Sek. I)	Für die (optimale) Druckbarkeit des Objekts kann es notwendig sein, das konstruierte Modell zu vergrößern oder zu verkleinern, wobei das Verhältnis der Parameter zu einander gleichbleibend sein soll. Dies geschieht mittels eines Streckfaktors (vgl. S. 28).
Rotationsfiguren (Sek. II)	Auf Basis des parametrischen Modellierens können Rotationsfiguren konstruiert und betrachtet werden, anhand derer die Schüler:innen lernen können, „den Rauminhalt von Rotationskörpern“ (S. 56) zu bestimmen.
TRIANGULIERUNGSPROZESS	
Ebenendarstellungen (Sek. II)	Das STL-Format kann als eine, für die digitale Arbeitswelt relevante, kontextualisierte Verknüpfung einer bekannten Ebenendarstellung (Parameterform) und des Normalenvektors aufgefasst werden. Beides sind mathematische Inhalte, die in der Analytischen Geometrie der Sekundarstufe II thematisiert werden (S. 58).
Simplex/ Eckpunktmodelle (Sek. I)	Weniger umfangreiche Tesselierungscodes, wie beispielsweise der OFF-Code ¹⁸ , können genutzt werden, um die Definition von Simplexen und Polygonen über deren Eckpunkte zu betrachten. So nutzt der OFF-Code bspw. nur die Koordinaten der Eckpunkte und kann damit den Schüler:innen eine einfache mathematische Darstellung von Polygonen ermöglichen (vgl. S. 29).
Grenzwertprozesse (Sek. II)	Je feiner das Dreiecksnetz, desto genauer ist die Darstellung digitaler gekrümmter Oberflächen und dementsprechend desto höher die Druckauflösung realer gekrümmter Oberflächen (S. 55).

¹⁸ Der OFF-Code (Object File Format) lässt sich insbesondere für die Beschreibung von Polygonen oder Polyedern nutzen. Er besteht aus drei Blöcken: Der erste Block gibt das Format sowie die Anzahl der Ecken, Flächen und Kanten des Objekts an. Im zweiten Block werden die Eckpunkte des Objekts nacheinander angegeben. Der dritte Block gibt Informationen bezüglich der Seitenflächen des Objekts (Angabe des n-Ecks sowie der entsprechenden Eckpunkte aus Block 2).

SLICINGPROZESS	
Funktionale Beschreibung des Fahrtweges (Sek. I + II)	Dem Fahrtweg des Extruders liegt (vereinfacht und mathematisch optimiert) eine stetige Kurve zugrunde, die sich auf die Fläche der zu druckenden Schicht beschränkt. Bei einem gleichmäßigen Abfahren von Druckbögen kann der Fahrtweg als Verknüpfung trigonometrischer Funktionen (S. 37) dargestellt werden. Bei einer Anpassung der Parameter kann hierdurch der Fahrtweg approximiert werden. Möglich ist auch eine Betrachtung eines mathematisch optimierten Fahrtweges mittels fixer Parameter im Sinne von Steckbriefaufgaben (S. 59).
Geometrische Abstandsberechnungen (Sek. II)	Während des Slicingprozesses wird die Schichtdicke festgehalten. Hierfür muss der konstante Abstand des Extruders zur vorher aufgetragenen Materialschicht betrachtet werden, um Einstellungen bezüglich der Druckkopfbewegung vorzunehmen. Abstandsberechnungen (insbesondere zwischen Punkten und Ebenen) sind Teil der Analytischen Geometrie der Sekundarstufe II (S. 57).
DRUCKPROZESS	
Prinzip von Cavalieri (Sek. I)	Über das Druckverfahren kann durch den schichtweisen Aufbau eines Objekts ein enaktiver Zugang zum Prinzip des Cavalieri verfolgt werden, der anschließend in weiteren Schritten formalisiert werden müsste (S. 27).
Ober- und Untersumme (Sek. II)	Der Druck des gleichen Objekts mit verschiedenen Durchmessern der Druckköpfe eröffnet die Möglichkeit, die Obersumme anhand dreidimensionaler Objekte zu thematisieren (S. 56). Bei dieser Verknüpfung wird genutzt, dass die Oberflächendarstellung im 3D-Druckprozess genauer wird, je geringer der Drüsendurchmesser ist. Die Thematisierung der Untersumme müsste entsprechend mithilfe anderer Verfahren substituiert werden.

Darüber hinaus kann der 3D-Druck als Gesamtprozess betrachtet auch als Lernkontext im Mathematikunterricht implementiert werden. Beispielsweise zum mathematischen Lerninhalt „Prozentrechnung“: Hier können die Schüler:innen dazu aufgefordert werden, begründete Produktionsentscheidungen zum Beispiel mit dem Ziel der Materialersparnis zu treffen. Darüber hinaus bietet der 3D-Druck auch Möglichkeiten für fächerübergreifenden Unterricht, unter anderem mit den Unterrichtsfächern Chemie (Materialzusammensetzungen) und Kunst (dreidimensionale Kunst). Diese beiden weiteren Anwendungsmöglichkeiten sollen in dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet werden.

6.2 Entwicklung von theoretischen Unterrichtskonzepten und praktischen Unterrichtsideen

Auf Basis der zuvor erstellten Liste über Verknüpfungspunkte der 3D-Druck-Technologie und dem Mathematikcurriculum wurde zunächst ein prototypisches theoretisches Unterrichtskonzept zu dem curricularen Inhalt „Zusammengesetzte Körper“ (vgl. Tab. 6.2, *Boolesche Operationen*) erstellt (siehe Anhang B). Dieses adressiert Lehrkräfte und informiert über die Unterrichtseinheit. Das theoretische Konzeptpapier setzt sich aus einem informativen Teil zu der Unterrichtseinheit sowie einem Überblicksteil über mögliche Aufgabenformate zusammen. Der erste Teil enthält Informationen zu Formalitäten (u. a. Klassenstufe, Länge der Unterrichtseinheit), zu dem Inhalt der Unterrichtseinheit und stellt die Verknüpfung zum curricularen Inhalt auf Basis der Fachanforderungen des Landes Schleswig-Holstein für das Fach Mathematik her. Darüber hinaus sind Lernvoraussetzungen der Schüler:innen sowie Lernziele der Unterrichtseinheit aufgeführt. Der letzte Abschnitt des ersten Teils informiert über den Vorteil des Vorgehens im Gegensatz zum herkömmlichen Vorgehen bei diesem Unterrichtsinhalt.

Der zweite Teil enthält mögliche Aufgaben der Unterrichtseinheit, sodass beim Lesen des theoretischen Unterrichtskonzepts bereits ein grober Überblick über den Verlauf, die Ausrichtung und die Inhalte der Unterrichtseinheit entsteht. Dabei wird sowohl ein Überblick über die Aufgabenstellungen als auch über die erwarteten Schüler:innen-Tätigkeiten sowie die geförderten Kompetenzbereiche (prozessbezogene, inhaltsbezogene und digitale Kompetenzen) gegeben.

6.3 Evaluierung der theoretischen Unterrichtskonzepte und praktischen Unterrichtsideen

Im Anschluss an die Erstellung des prototypischen Unterrichtskonzeptes wurde es gemäß dem Educational Design Research (vgl. Abschnitt 2.4) in Mikroevaluierungszyklen formativ und summativ evaluiert und optimiert. Da die Unterrichtskonzepte zum Ziel haben, die 3D-Druck-Technologie *authentisch* in den *regulären* Unterricht einzubinden, wurden die Evaluierungszyklen sowohl mit Akteuren aus der Industrie als auch aus der Schule durchgeführt. Die formativen und summativen Evaluierungszyklen sollen im Folgenden jeweils mittels ihres Vorgehens, beteiligter Akteure, ihrer Resultate und der entsprechenden Konsequenzen für das prototypische Unterrichtskonzept vorgestellt werden.

6.3.1 Erster Evaluierungszyklus (Umsetzbarkeit und Akzeptanz)

Vorgehen & beteiligte Akteure:

In dem ersten Evaluierungszyklus wurde die theoretische Umsetzbarkeit im schulischen Kontext sowie die Akzeptanz des Unterrichtskonzepts unter den befragten Lehrkräften mittels eines fragenbasierten Feedbacks formativ evaluiert (Abb. 6.2). Hierzu wurden $N = 10$ Lehrkräfte als Expert:innen des regulären Mathematikunterrichts verschiedener Gymnasien und Gemeinschaftsschulen ohne gymnasiale Oberstufe befragt. Mittels der folgenden Fragen wurde per Mail Feedback u. a. zur Verständlichkeit des Konzepts sowie zu Unterstützungswünschen erbeten.

- Ist das Konzept verständlich formuliert? (Kann ich als Lehrkraft, die kein umfangreiches Wissen zum 3D-Druck hat, dieses Konzept verstehen? Müssten Aspekte deutlicher hervorgehoben oder besser erklärt werden?)
- Sind die Aufgaben vom Anforderungsniveau passend oder werden größere Differenzierungsmöglichkeiten benötigt?
- Wenn ich mir vorstelle, dass ich als Lehrkraft diese Aufgabenblöcke mit meiner Lerngruppe durchführe: Wo benötige ich ggf. weitere Hilfe und Unterstützung? Wie kann diese Hilfe/Unterstützung aussehen?
- Wird in dem Konzept der Bezug zum 3D-Druck deutlich?

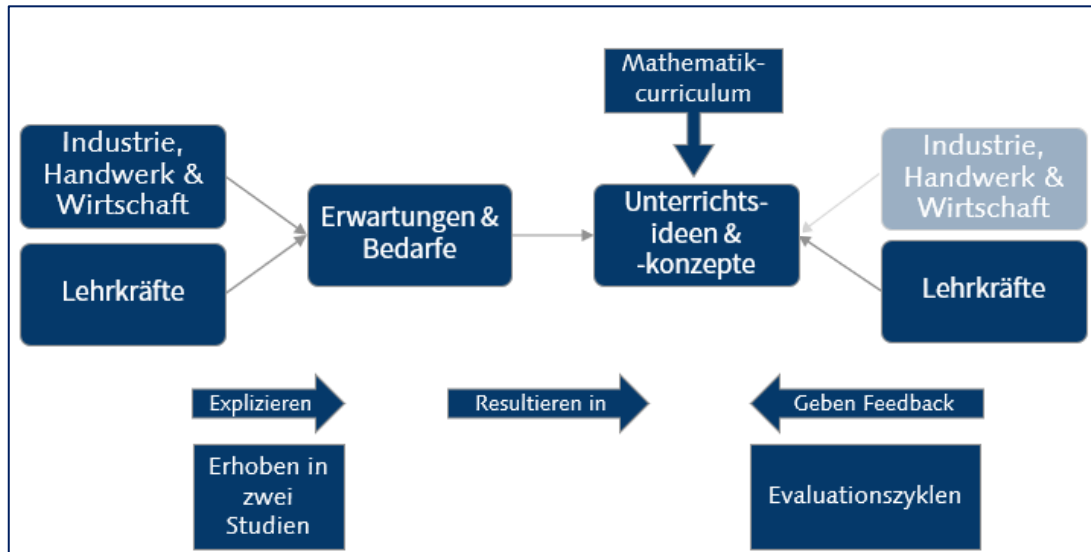


Abbildung 6.2: Weiterführung des in Abschnitt 6.1 definierten Designprozesses der Unterrichtskonzepte, in dem die praktische Unterrichtsexpertise der Lehrkräfte genutzt wird, um die erstellten Unterrichtskonzepte hinsichtlich ihrer theoretischen Einsetzbarkeit zu evaluieren.

Resultate:

Die Antworten der befragten Lehrkräfte sollen im folgenden Abschnitt kurz dargestellt werden (für eine Übersicht der Antworten siehe Anhang C). Bezüglich der Frage, ob das Konzept auch für Lehrkräfte, die kein umfangreiches Vorwissen bezüglich der 3D-Druck-Technologie haben, verständlich formuliert ist, gaben die befragten Lehrkräfte an, dass das Konzept an sich schlüssig und verständlich sei sowie dass der Inhalt der Unterrichtseinheit und die mit ihr verknüpften Lernziele nachvollziehbar seien. Auf die Frage der Passung des Anforderungsniveaus gaben die befragten Lehrkräfte an, dass die Aufgabenschwierigkeit für eine „Durchschnittsklasse“ angemessen sei und dass einige Aufgaben an sich binnendifferenzierend seien und somit auch in heterogenen Lerngruppen eingesetzt werden können. Die Lehrkräfte merkten an, dass eine ausführliche Einführung in die genutzte Modellierungssoftware (hier: Tinkercad®) von zentraler Bedeutung für den Erfolg der Unterrichtseinheit sei. Da die Unterrichtseinheit sowohl das Zusammensetzen von Körpern, die Identifikation von Grundkörpern in zusammengesetzten Körpern als auch die Berechnung ihres Oberflächeninhalts und Volumens thematisiert, gaben einige Lehrkräfte der Gemeinschaftsschulen ohne

Designprozess der Unterrichtskonzepte

gymnasiale Oberstufe an, dass sie für ihre Lerngruppen hier notwendigerweise Streichungen oder Differenzierungsmöglichkeiten hinzufügen müssten.

Bezüglich pädagogischer Unterstützungswünsche in dem Einsatz des Unterrichtskonzeptes gaben die befragten Lehrkräfte an, dass eine detaillierte Anleitung zum Umgang mit der genutzten Modellierungssoftware sowohl in der Vorbereitung auf die Unterrichtseinheit als auch in der Durchführung der einzelnen Unterrichtsstunden (z. B. bei Rückfragen von Schüler:innen im Modellierungsprozess) hilfreich sein könnte. Auf die letzte Frage, ob in dem theoretischen Unterrichtskonzept der Bezug zum 3D-Druck deutlich wird, gaben die Lehrkräfte an, dass der Bezug zur Technologie deutlich ist, aber in den Aufgaben teilweise noch stärker hervorgehoben werden könnte. So könnte beispielsweise die Lehrkraft ausgedruckte dreidimensionale Modelle mitbringen und mittels dieser haptischen Komponente durch die jeweilige Unterrichtsstunde leiten.

Zudem gaben die befragten Lehrkräfte weitere Anmerkungen zur Farbgebung, der Darstellung und dem Aufbau der Arbeitsblätter, Begrifflichkeiten sowie zu weiteren möglichen Aufgaben, mögliche nutzbare Sozialformen und dem angesetzten Zeitrahmen.

Konsequenzen für das Unterrichtskonzept:

Um die Wünsche der Lehrkräfte nach einer geleiteten Einführung in die genutzte Modellierungssoftware aufzugreifen, wurden sowohl ein Leitfaden als auch verschiedene Videos zur Nutzung der Software Tinkercad® (Einrichten von Schüler:innen-Accounts in einer Klassenoberfläche, Modellieren, Exportieren) angefertigt. Da die befragten Lehrkräfte eine generelle Zufriedenheit mit dem Aufbau, der Passung der Aufgabenschwierigkeit und dem Verständnis der Unterrichtseinheit ausdrückten, wurden einzelne Kleinigkeiten (z. B. Operatorenutzung, Darstellung von Grafiken) innerhalb der Aufgabenstellungen und Arbeitsblätter angepasst. Darüber hinaus wurden für einige Aufgaben Differenzierungsmöglichkeiten in Form von Kommentaren festgehalten.

6.3.2 Zweiter Evaluierungszyklus (Authentizität)

Vorgehen & beteiligte Akteure:

Im Anschluss an den ersten Evaluierungszyklus wurden drei Industrievertreter:innen verschiedener Branchen, die in ihrem beruflichen Alltag die 3D-Druck-Technologie nutzen, als Expert:innen der Nutzung dieser Technologie in der digitalen Arbeitswelt ebenfalls um ein fragenbasiertes Feedback gebeten. Die drei Industrievertreter:innen kamen aus den Branchen Vision Technology, Prototyping und Medizintechnik und wirken in der Ausbildung zukünftiger Arbeitnehmer:innen in ihrem jeweiligen Unternehmen mit. In diesem formativen Evaluierungszyklus lag der Fokus auf der authentischen Einbindung der 3D-Druck-Technologie im Unterrichtskonzept. Es wurde dementsprechend Feedback dazu erbeten, ob der 3D-Druck in den Aufgabenkontexten realitätsgetreu als digitales Werkzeug eingesetzt wird und ob die angesprochenen und geförderten Handlungskompetenzen und Wissenskomponenten relevant für zukünftige Arbeitnehmer:innen sind. Da die Industrievertreter:innen keinen pädagogischen

Hintergrund haben, wurde das theoretische Unterrichtskonzept (vgl. Anhang B) derart verdichtet und angepasst, dass ein Fokus auf den zu erwerbenden Handlungskompetenzen sowie der Auseinandersetzung mit der 3D-Druck-Technologie lag (vgl. Anhang D). Das Feedback in diesem Evaluierungszyklus wurde mittels der folgenden Fragen erbeten:

- Sind die Handlungskompetenzen, die im Konzeptpapier angesprochen werden relevant für (zukünftige) Arbeitnehmer:innen der digitalen Arbeitswelt, die mit dem 3D-Druck und weiteren digitalen Produktionsverfahren agieren?
- Wird ein authentisches Bild der Nutzung der 3D-Druck-Technologie gezeichnet?

Die Fragen wurden den Industrievertreter:innen zur Vorbereitung gemeinsam mit dem verdichteten Unterrichtskonzept per Mail zugesendet. Das Feedback erfolgte schließlich in einem digital durchgeführten Interview.

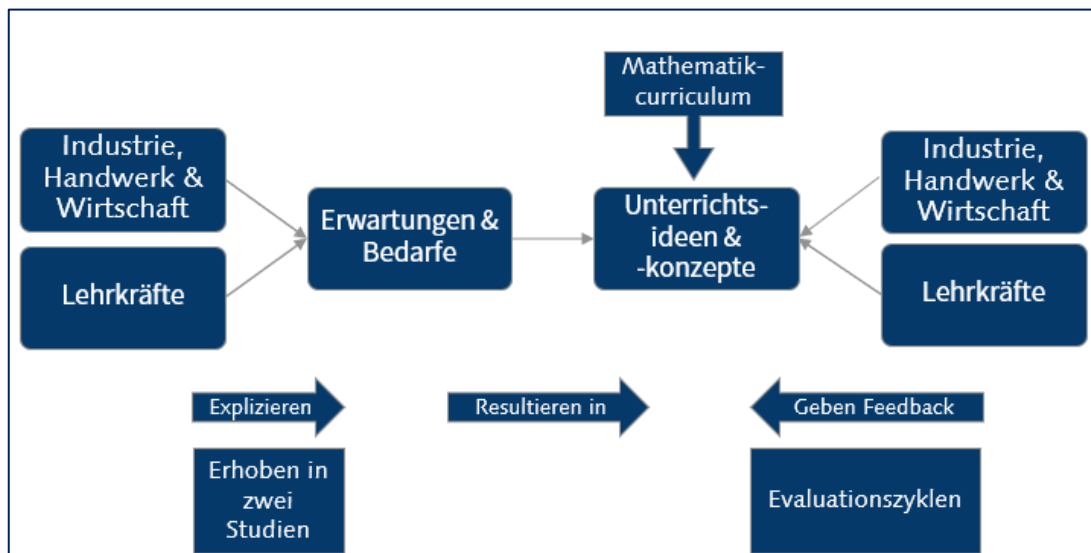


Abbildung 6.3: Weiterführung des in Abschnitt 6.3.1 definierten Designprozesses der Unterrichtskonzepte, in dem Akteure der Industrie, Handwerk und Wirtschaft in die Evaluierung des erstellten prototypischen Unterrichtskonzeptes eingebunden wurden, um die Authentizität der Einbindung der 3D-Druck-Technologie zu gewährleisten.

Resultate:

Die zusammengetragenen Antworten aus den drei Gesprächen werden hier kurz dargestellt. Bezüglich der Frage, ob die im Unterrichtskonzept angesprochenen Handlungskompetenzen für (zukünftige) Arbeitnehmer:innen im Umgang mit der 3D-Druck-Technologie und weiteren digitalen Produktionsverfahren relevant ist, gaben alle drei Industrievertreter:innen an, dass eine Auseinandersetzung mit der Technologie als Lernkontext dazu dienen kann, dass die Schüler:innen erste Einblicke in relevante Aspekte der Technologienutzung erhalten. Die Thematisierung als Lernkontext könne nicht spätere Ausbildungsschritte ersetzen, sie könne sie jedoch auf einer basalen Ebene vorbereiten. So brachte einer der Industrieverteter:innen die anekdotische Evidenz ein, dass bei vorheriger Auseinandersetzung von Auszubildenden mit einer Art der 3D-Druck-Technologie (z. B. dem Filamentdruck) die weiterführende

Auseinandersetzung mit und das Verständnis von anderen 3D-Druck-Technologien einfacher falle. Zudem sei hier der Modellierungsprozess einzeln zu betrachten, da der Umgang mit der Hardware an sich meist schnell gelernt sei. Der Modellierungsprozess hingegen spiele, laut der drei befragten Industrievertreter:innen, selbst in Ausbildungs- und Studiengängen eher eine untergeordnete Rolle und die Auseinandersetzung mit verschiedener Modellierungssoftware obliege dem Einzelnen. Im späteren Arbeitsalltag ist dann jedoch die Beherrschung und variable Einsatzmöglichkeit von Modellierungssoftware von relevanter Bedeutung. Frühzeitig das Interesse an digitaler dreidimensionaler Modellierung zu stärken, könne folglich die entsprechende Lernkurve im späteren Berufsalltag bei einer beruflichen Nutzung der 3D-Druck-Technologie vorantreiben. In den Gesprächen wurde weiter darauf verwiesen, dass aus Industriesicht insbesondere der Modellierungs-, Slicing- und Druckprozess wichtig für (zukünftige) Arbeitnehmer:innen seien, da die Triangulierung rein computerbasiert vorgeht. Zudem werde im Sinne der Anwenderfreundlichkeit erwartet, dass zukünftig Modellierungs- und Slicingschritte vereint werden, sodass sich der Komplexitätsgrad potentiell zukünftig weiter verringert. Nichtsdestotrotz betonten die Industrievertreter:innen, dass ein Verständnis für die im Hintergrund laufenden (und teilweise nicht sichtbaren) Prozesse für die Auseinandersetzung mit der 3D-Druck-Technologie und weiteren Produktionstechnologien von Vorteil sein könne, insbesondere wenn es um Fragen der Weiterentwicklung oder dem Finden neuer Einsatzmöglichkeiten gehe.

Bezüglich der Authentizität wurde von zwei der drei befragten Industrievertreter:innen darauf hingewiesen, dass die in den Aufgaben verwendeten Kontexte (Architektur, Robotik) für die 3D-Druck-Technologie im beruflichen Alltag zwar eine Rolle spielen, ihr praktischer Einsatz aber nur oberflächlich im Unterrichtskonzept widergespiegelt werde. Im Gespräch mit den Industrievertreter:innen wurde zusätzlich auf andere potentielle Unterrichtskonzepte und Kontexte eingegangen, die nicht durch das prototypische Unterrichtskonzept abgedeckt waren. Hier wurde darauf aufmerksam gemacht, dass es sinnvoll sein könnte, eine nicht inhaltsgebundene Einführung in den 3D-Druck mit den Schüler:innen durchzuführen, sodass im anschließenden Unterricht, der die Technologie als Lernkontext nutzt, auf vorhergehendes grundlegendes Wissen Bezug genommen werden kann.

Konsequenzen für das Unterrichtskonzept:

Um den Hinweisen der Industrievertreter:innen zur Erhöhung des authentischen Einbindungsgrades der 3D-Druck-Technologie nachzukommen, wurden zwei Änderungen vorgenommen: Einerseits wurde der zweite Aufgabenblock, der den Oberflächeninhalt von zusammengesetzten Körpern fokussiert, so kontextualisiert, dass der Roboterkontext in ein theoretisches Schulprojekt eingebunden wird. Ohne eine Anpassung des fokussierten mathematischen Lerninhalts wurde damit die 3D-Druck-Technologie in einen authentischeren nicht-industriellen Aufgabenkontext eingebunden, der jedoch Aspekte der industriellen Nutzung der Technologie widerspiegelt und keine Fehlvorstellungen aufbaut. Darüber hinaus wurde andererseits die Idee der Industrievertreter:innen, zusätzliches Unterrichtsmaterial zu entwickeln, aufgegriffen, mittels dessen eine nicht inhaltsgebundene Einleitung in die 3D-Druck-Technologie sowie ihre

Anwendungsmöglichkeiten in der digitalen Arbeitswelt gegeben werden kann. Es wurde im Verlauf des Forschungsprojekts sowohl ein Video als auch eine Präsentation entwickelt, die Lehrkräften ermöglichen, ihren Schüler:innen einen kurzen Einblick über relevante Aspekte der 3D-Druck-Technologie in der Arbeitswelt zu geben.

6.3.3 Dritter Evaluierungszyklus (praktische Umsetzbarkeit im Kontext Schule)

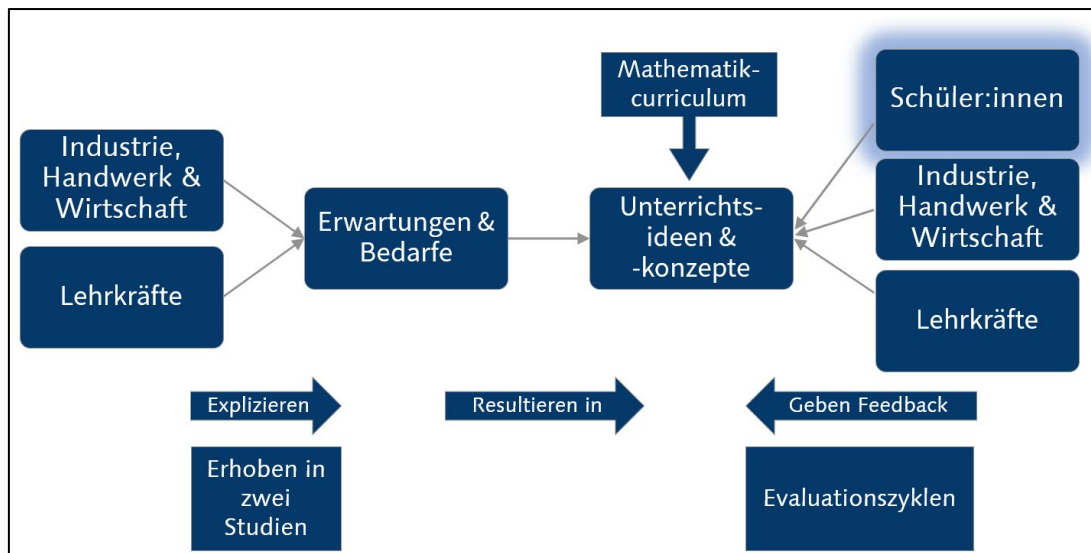


Abbildung 6.4: Ergänzung des in Abschnitt 6.3.2 definierten Designprozesses der Unterrichtskonzepte um den Akteur „Schüler:innen“, die in diesem Evaluierungszyklus als relevanter Akteur des Designprozesses betrachtet werden, da sie mittels der entwickelten Unterrichtskonzepte im Kontext Schule Mathematik lernen und erste Erfahrungen mit der 3D-Druck-Technologie sammeln können sollen.

Vorgehen & beteiligte Akteure:

Im Anschluss an die beiden formativen Evaluierungen und Anpassungen des theoretischen Unterrichtskonzepts mithilfe der zentralen Akteure aus Industrie und Schule, erfolgte eine erste formative Evaluierung der praktischen Umsetzbarkeit des Unterrichtskonzepts im Kontext Schule. Hierfür wurde ein praktisches Unterrichtskonzept (siehe Anhang E) erstellt. Dieses orientiert sich an dem herkömmlichen Aufbau der Stundenvorbereitung und besteht aus Stundenrastern für alle Unterrichtsstunden der Unterrichtseinheit zu den zusammengesetzten Körpern sowie Arbeitsblättern. Die Stundenraster enthalten dabei Angaben zu den einzelnen Phasen der Unterrichtsstunde und ihre vorgesehenen Länge sowie Impulse, die von der Lehrkraft gegeben werden können, um die geplante Schüler:innen-Aktivität zu erreichen. Ebenso sind Informationen zu möglichen umsetzbaren Sozialformen und einzusetzenden Medien (inkl. der Verweise auf die Arbeitsblätter) enthalten.

Die Unterrichtseinheit wurde anschließend durch eine Mathematiklehrkraft einer Kieler Gemeinschaftsschule in einer Klasse mit 15 Schüler:innen im regulären Mathematikunterricht umgesetzt. Die Evaluierung erfolgte innerhalb dieses Zyklus durch eine systematische Unterrichtsbeobachtung. Beobachtungsschwerpunkte waren

Designprozess der Unterrichtskonzepte

hierbei zum Beispiel der Umgang der Schüler:innen mit den entwickelten Aufgabenblöcken sowie die Passung der Stundenraster.

Resultate:

Die Unterrichtseinheit war zunächst auf drei Doppelstunden ausgelegt und wurde aufgrund zeitlicher Anpassungen in vier Doppelstunden durchgeführt, wobei die zweite Hälfte der letzten Doppelstunde zur freien Konstruktion von weiteren dreidimensionalen Modellen den Schüler:innen zur Verfügung gestellt wurde. Die gesamte Unterrichtseinheit wurde in der Schule im Computerraum durchgeführt, sodass jede:r Schüler:in in jeder Phase einen eigenen Zugang zu einem Computer hatte und ein Beamer von der Lehrkraft verwendet werden konnte, um der gesamten Lerngruppe Aufgabenstellungen, Bilder oder konstruierte Modelle zu zeigen. Im Großen und Ganzen beteiligten sich die Schüler:innen am Unterricht und wirkten interessiert am Lernkontext. Die Lehrkraft klassifizierte die Lerngruppe im Vorfeld als sehr heterogen bzgl. ihrer Beteiligung im herkömmlichen Unterricht und ihres Leistungsniveaus. Dennoch äußerte sich die Lehrkraft positiv zur Beteiligung der Lerngruppe innerhalb der zu evaluierenden Unterrichtseinheit zu den zusammengesetzten Körpern.

In der Klasse, die es gewohnt war in Kleingruppen und Partnerarbeit zu arbeiten, waren die kollaborativ geplanten Phasen unproblematisch. Darüber hinaus unterstützten sich die Schüler:innen gegenseitig im Verständnis der Aufgabenstellungen. Trotzdem stellte die Operatorenutzung auf den Arbeitsblättern für die Schüler:innen teilweise eine Herausforderung dar. Darüber hinaus war die Lerngruppe noch nicht mit der genutzten Modellierungssoftware Tinkercad® bekannt, konnte jedoch zügig relativ zielführend mit dieser umgehen. Ein Aspekt, der hier zu beachten ist, ist, dass Tinkercad® die Möglichkeit bietet, auf bereits vorkonstruierte Teile (z. B. Körperstrukturen, Bäume oder Fahrzeuge) zurückzugreifen. Die Nutzung dieser Teile kann nicht innerhalb der Software unterbunden werden und sollte folglich im Unterrichtsgespräch aufgegriffen werden. Da das Thema der Unterrichtseinheit zusammengesetzte Körper ist, könnten durch die Nutzung bereits zusammengesetzter Körper Lernmöglichkeiten vermindert werden. Bei einem kritischen Aufgreifen dieser Elemente kann den Schüler:innen aber verdeutlicht werden, dass auch diese Objekte in der Software mittels der Booleschen Operationen konstruiert werden können, auch wenn die Erstellung solcher Konstruktionen für sie möglicherweise aufwendiger und zeitintensiver ist.

Konsequenzen für das Unterrichtskonzept:

Aufgrund der Heterogenität der Lerngruppe, konnten verschiedene Möglichkeiten zur Differenzierung aufgenommen werden. Beispielsweise wurde eine differenzierte Version des Arbeitsblatts AB2: Roboterprojekt (vgl. Anhang E) erstellt, bei dem die Schüler:innen nicht einzeln den Oberflächeninhalt bestimmen, sondern in Kooperation mit der gesamten Klasse. Dies ermöglicht ebenfalls leistungsstärkeren Schüler:innen ein Berechnen von Teilen oder des gesamten Oberflächeninhalts in Einzelarbeit, während leistungsschwächere Schüler:innen sich in Partner- oder Kleingruppenarbeit

gegenseitig unterstützen können. Zusätzlich wurden weitere didaktische Reserven eingebaut und der Stundenumfang auf sieben Einzelstunden à 45 Minuten ausgeweitet.

Darüber hinaus wurden an den Arbeitsblättern weitere kleinere Änderungen vorgenommen: Auf dem Arbeitsblatt AB1: Geometrische Häuser (vgl. Anhang E) wurde ein expliziter Vergleich der zweidimensionalen Ansicht des Schrägbildes und der zweidimensionalen Ansicht des Modells in der Software aufgegriffen. Ebenso wurde das Arbeitsblatt AB1: Badeschale für Schildkröten überarbeitet, sodass die Aufgaben einem stringenteren Aufbau folgen. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, stellte die Operatorennutzung teilweise eine Herausforderung für die Schüler:innen dar. Im Sinne der Vorbereitung der Schüler:innen auf ihre Abschlussprüfungen sowie einer einheitlichen Nutzung von (Fach-)Sprache wurde jedoch auf eine Anpassung der Operatoren verzichtet (mehr zu den Operatoren im Fach Mathematik in den Fachanforderungen Mathematik; MBWK SH, 2014).

Über die berichteten Anpassungen am praktischen Unterrichtskonzept hinaus wurden zwei weitere Aspekte nach der Durchführung des dritten formativen Evaluierungsschrittes aufgenommen: Zur Unterstützung der unterrichtenden Lehrkraft wurden Modelle in Tinkercad® erstellt, auf die Lehrkräfte via einem Link zugreifen können. Zudem bieten sich einige Aufgabenkontexte für den Ansatz des Flipped Classroom (Lage et al., 2000) an. Hierfür wurden in weiteren, für den Forschungskontext nicht relevanten Schritten, zwei Aufgabenvideos zum Roboterkontext und der Badeschalenaufgabe (vgl. Anhang E, G) erstellt, die ebenfalls auf der Projekthomepage und der OER-Plattform für Lehrkräfte abrufbar sind.

6.3.4 Vierter Evaluierungszyklus (Pilotierung der Mehrwertevaluierung – Laborkontext)

Vorgehen & beteiligte Akteure:

Der vierte Evaluierungszyklus hatte den Fokus der Pilotierung einer summativen Mehrwertevaluierung des praktischen Unterrichtskonzepts. Diese Pilotierung wurde in einem Laborkontext durchgeführt. Hierfür nahmen im Frühjahr 2022 $N = 16$ Schüler:innen der 6. und 7. Klasse (6 weiblich, 10 männlich; 10 aus der 6. Klasse, 6 aus der 7. Klasse) aus der Region Kiel an einem dreitägigen Workshop am IPN in Kiel teil. Innerhalb des Workshops wurden die entwickelten Aufgabenblöcke (vgl. Anhang E) von den Schüler:innen bearbeitet sowie weitere Modellierungsprozesse in Tinkercad® durchgeführt und Informationen zur 3D-Druck-Technologie besprochen. Der Workshop wurde dabei durch eine Prä-Post-Erhebung begleitet, in der psychologische Konstrukte wie das Selbstkonzept bezogen auf Mathematik und die 3D-Druck-Technologie (konative und motivationale Komponenten), das Interesse an ICT sowie die subjektiv wahrgenommene ICT-Kompetenz, die subjektive Einschätzung der Medienkompetenz bezogen auf die Kompetenzbereiche K1.2, K3.1 und K.5.2 (vgl. Handreichung Medienkompetenz; MBWK SH, 2018) und das Berufsinteresse sowie instrumentelle Motivation mittels vierstufiger Likert-Skalen erhoben wurden (vgl. Tab. 7.1 für Beispielitems sowie Abschnitt 7.4 für die Referenz der Variablen). Für den Vergleich der Prä- und Post-Daten wurde der Wilcoxon Rank Test als nicht-parametrisches Testverfahren verwendet, da bei einer Stichprobe von $N = 16$ keine

Normalverteilung angenommen werden kann. Aufgrund der geringen Stichprobengröße sollen im Rahmen der Auswertung zudem ausschließlich Tendenzen aufgezeigt werden.

Resultate:

Alle Teilnehmer:innen hatten vor der Teilnahme an dem Workshop keine oder nur wenige Berührungspunkte mit der 3D-Druck-Technologie, aber ein hohes Interesse an der Auseinandersetzung mit der Technologie (konative Handlungserfahrungen in der Prä-Befragung: 12 bzw. 4 Teilnehmende gaben an, noch nie bzw. selten mit einem 3D-Drucker gearbeitet zu haben; 9 bzw. 6 Teilnehmende gaben an, sich sehr gerne bzw. gerne in ihrer Freizeit mehr mit 3D-Druckern auseinandersetzen zu wollen, vgl. Tab 6.3). Aufgrund dessen wurden die kognitiven Komponenten des 3D-Druck-bezogenen Selbstkonzepts (vgl. Abschnitt 2.2.4), die sich in der Auseinandersetzung mit der Technologie entwickeln, ausschließlich zum Post-Erhebungszeitpunkt erhoben und werden hier nicht berichtet.

Vor Beginn des Workshops waren alle Teilnehmenden bereits interessiert an der 3D-Druck-Technologie bzw. empfanden der Technologie gegenüber motivational-positive Gefühle. Dies zeigt Deckeneffekte der Teilnehmenden auf. Folglich wird innerhalb dieses Evaluierungszyklus eine selektive Stichprobe betrachtet und die Tendenzen die im Folgenden aufgezeigt werden, können entsprechend auch nur unter dieser Vorannahme weiter betrachtet werden.

Tabelle 6.3: Mittelwerte, Standardabweichungen, Wilcoxon-Rang sowie Effektstärke (mittels Cohens *d*) der Konstrukte der Stichprobe im vierten Evaluierungszyklus. Fett hinterlegte Konstrukte weisen eine signifikante Veränderung auf (Likert-Skala: 1 = „stimme gar nicht zu“, 4 = „stimme voll zu“; (***) $p < .001$, (**) $p < .01$, (*) $p < .05$, # $p < .10$).

Variable		<i>M</i>	<i>SD</i>	
MATHEMATISCHES SELBSTKONZEPT				
Globales mathematisches Selbstkonzept	Prä	3,34	0,51	$W(16) = 25,0;$
	Post	3,27	0,55	$p = .873$
Mathematisches Selbstkonzept bezogen auf Raumgeometrie	Prä	3,17	0,47	$W(16) = 68,5*;$
	Post	3,50	0,40	$p = .011; d = .76$
3D-DRUCK BEZOGENES SELBSTKONZEPT: KONATIVE KOMPONENTEN				
Handlungserfahrungen	Prä	2,82	0,66	$W(14) = 37,5;$
	Post	2,61	0,45	$p = .725$
3D-DRUCK BEZOGENES SELBSTKONZEPT: MOTIVATIONALE KOMPONENTEN				
Positive Gefühle	Prä	3,63	0,50	$W(16) = 19,5*;$
	Post	3,88	0,29	$p = .033; d = .86$
Ängstlichkeit	Prä	2,18	1,02	$W(16) = 21,5;$
	Post	2,10	0,96	$p = .287$
Verstehen	Prä	3,59	0,58	$W(16) = 19,0;$
	Post	3,75	0,41	$p = .215$

Gestalten	Prä	3,75	0,41	$W(16) = 21,0;$
	Post	3,81	0,30	$p = .362$
Werkzeugperspektive	Prä	1,72	1,90	$W(16) = 39,0;$
	Post	1,94	1,05	$p = .516$
WEITERE PSYCHOLOGISCHE KONSTRUKTE				
Interesse an ICT	Prä	3,32	0,43	$W(16) = 28,0;$
	Post	3,29	0,50	$p = .500$
Subjektiv wahrgenommene ICT-Kompetenz	Prä	3,04	0,58	$W(16) = 64,5^#;$
	Post	3,15	0,57	$p = .095; d = .42$
Instrumentelle Motivation	Prä	2,89	0,59	$W(14) = 28,0;$
	Post	2,91	0,78	$p = .500$
Selbsteinschätzung digitaler Kompetenzen K1.2 (Auswerten und Bewerten)	Prä	2,62	0,63	$W(16) = 113,5^{**};$
	Post	3,14	0,47	$p = .010; d = .67$
Selbsteinschätzung digitaler Kompetenzen K3.1 (Entwickeln und Produzieren)	Prä	1,91	0,80	$W(15) = 120,0^{***};$
	Post	3,44	0,52	$p < .001; d = 1$
Selbsteinschätzung digitaler Kompetenzen K5.2 (Werkzeuge bedarfsgerecht einsetzen)	Prä	2,14	0,78	$W(16) = 134,5^{***};$
	Post	3,27	0,42	$p < .001; d = .98$

Die Selektivität der Stichprobe entspricht jedoch auch den Erwartungen für die Anmeldung zu einem mehrtätigen außerschulischen Workshop, der sich mit schulischen (mathematischen) und 3D-Druck-relatierten Inhalten befasst. Innerhalb der vorliegenden Stichprobe nahmen die positiven Gefühle nach Durchführung des Workshops trotz der hohen Ausgangswerte signifikant zu. Darüber hinaus nahm auch das mathematische Selbstkonzept der Teilnehmer:innen bezogen auf die Raumgeometrie (basierend auf den Fachanforderungen – Leitidee Raum und Form; MBWK SH, 2014) signifikant zu. Das globale mathematische Selbstkonzept verblieb beinahe gleichbleibend im positiven Bereich. Im Mittel schätzten die teilnehmenden Schüler:innen ihre ICT-Kompetenz nach der Durchführung des Workshops tendenziell und ihre digitalen Kompetenzen signifikant besser ein.

Weiter ist darauf zu verweisen, dass im Mittel die deskriptiven Werte bezüglich der motivationalen Komponenten Verstehen und Gestalten sowie die Werkzeugperspektive auf die 3D-Druck-Technologie nach Durchführung des Workshops weiter deutlich im positiven bzw. negativen Bereich verbleiben.

Konsequenzen für das Unterrichtskonzept:

Der Fokus dieses Evaluierungszyklus lag nicht mehr ausschließlich auf der formativen Evaluierung des Unterrichtskonzeptes, sondern vor allem auf der Pilotierung der summativen Evaluierung des fünften Evaluierungszyklus im Laborkontext. Für den

Workshop wurde jedoch ein Booklet erstellt, in dem die Teilnehmenden die mathematischen Aufgaben schriftlich lösten und zum Abschluss eines jeden Workshop-Tages kurz notierten, was sie vom Tag mitnahmen, was sie am spannendsten fanden, was sie noch einmal ausprobieren möchten und was sie noch nicht gänzlich verstanden haben. Mittels dieser Retrospektive der Workshop-Teilnehmer:innen konnte die Schüler:innen-Anleitung zur Nutzung der Modellierungssoftware (hier: Tinkercad®) weiter optimiert werden, da viele der Teilnehmenden zuvor nicht mit der Software gearbeitet hatten und Lücken in der Anleitung identifizieren konnten.

6.3.5 Fünfter Evaluierungszyklus (Mehrwerts-Evaluierung im Feld)

Der letzte summative Evaluierungszyklus begann im Juni 2022. Innerhalb dieses Zyklus wurde das praktische Unterrichtskonzept auf seinen didaktischen Mehrwert hin im Feld evaluiert. Dafür wurde mit Mathematiklehrkräften verschiedener Schulen zusammengearbeitet und die Unterrichtsmaterialien (Stundenraster und Aufgabenblätter) jeweils für die einzelne Lerngruppe nach den Wünschen der Lehrkraft angepasst. Die Unterrichtseinheit selber wurde anschließend von der Lehrkraft unterrichtet und analog zum vierten Evaluierungszyklus mittels einer Prä-Post-Erhebung begleitet. Hierbei wurde der zuvor eingesetzte Fragebogen noch um drei bzw. vier Kompetenzaufgaben in der Prä- bzw. Post-Erhebung erweitert. Im Anschluss an die unterrichtete Einheit erfolgte mittels eines Online-Fragebogens zudem eine kurze Evaluierung durch die Lehrkraft¹⁹. Die summative Mehrwertsevaluierung des fünften Evaluierungszyklus wird in dem folgenden Kapitel berichtet.

¹⁹ Auf die Evaluierung durch die unterrichtende Lehrkraft wird in der vorliegenden Arbeit nicht eingegangen, da keine substanziellen Verbesserungsvorschläge gegeben wurden.

7 SUMMATIVE MEHRWERTSEVALUIERUNG IM FELD

Teile dieses Kapitels sind 2023 in **M. Ayalon, B. Koichu, R. Leikin, L. Rubel., & M. Tabach (Eds.). Proceedings of the 46th Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education, Vol. 4). PME 46** veröffentlicht (siehe Anhang F). Die Peer-Review-Publikation umfasst jedoch ausschließlich die Interventionsgruppe, während in diesem Kapitel auch Vergleiche mit der später erhobenen Kontrollgruppe dargestellt werden.

7.1 Einleitung

Im folgenden Kapitel soll die abschließende summative Evaluierung des erstellten Konzepts für eine Unterrichtseinheit dargestellt werden, die den Lerninhalt zusammengesetzte Körper durch den Einsatz der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext thematisiert. Diese abschließende Evaluierung diene dazu, die Umsetzbarkeit des Unterrichtskonzeptes sicherzustellen und zu überprüfen, ob die Schüler:innen innerhalb der Unterrichtseinheit sowohl einen Lernzuwachs in Bezug auf die 3D-Druck-Technologie als auch auf den mathematischen Lerninhalt erreichen. Dazu wurde die Unterrichtseinheit in vier Klassen eingesetzt und durch eine Prä-Post-Befragung begleitet. Um die Ergebnisse der Befragung in Relation zum herkömmlichen Unterricht setzen zu können, wurden zwei weitere Klassen, in denen der Unterricht ohne den Einsatz der 3D-Druck-Technologie durchgeführt wurde, als Kontrollgruppen herangezogen.

7.2 Kurzvorstellung der Unterrichtseinheit

Im Rahmen der vorangegangenen Evaluierungszyklen wurde ein praktisches Unterrichtskonzept zur Implementierung der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext in dem regulären Mathematikunterricht entwickelt und in vier Zyklen hinsichtlich seiner Authentizität der Einbindung der Technologie sowie seiner praktischen Umsetzbarkeit evaluiert und optimiert (vgl. Abschnitte 6.3.1 bis 6.3.4). Das Unterrichtskonzept greift den mathematischen Lerninhalt zusammengesetzte Körper als Teil des Geometrieunterrichts der Sekundarstufe I (vgl. MBWK SH, 2014) auf. Gemäß den Fachanforderungen wird von den Schüler:innen erwartet, dass sie sich auf vielfältige Weise mit zusammengesetzten Körpern mathematisch auseinandersetzen können. So sollen die Schüler:innen sowohl in der Lage sein, geometrische Grundkörper in zusammengesetzten Körpern zu identifizieren und zu benennen, als auch aus geometrischen Grundkörpern zusammengesetzte Körper zu konstruieren. Diese Konstruktion soll dabei sowohl zeichnerisch als auch digital gestützt von den Schüler:innen durchgeführt werden. Neben den Konstruktions- und Identifikationsprozessen stehen, äquivalent zu den

bisher von den Lernenden durchgeführten Berechnungen an geometrischen Grundkörpern, auch Oberflächen- und Volumenberechnungen an didaktisch angepassten zusammengesetzten Körpern im Fokus der Unterrichtseinheit. Die für die Berechnungen genutzten zusammengesetzten Körper sollen dementsprechend aus einer angemessenen Anzahl von geometrischen Grundkörpern zusammengesetzt sein, die den Schüler:innen bereits bekannt sind.

Die Unterrichtseinheit ist dabei in drei lebensweltbezogene Kontexte eingebettet: Inhalt des ersten Teils der Unterrichtseinheit ist das Identifizieren und Benennen der geometrischen Grundkörper in zusammengesetzten Körpern sowie das Sammeln erster Konstruktionserfahrungen eigener zusammengesetzter Körper anhand eines architektonischen Kontextes. Im zweiten Teil wird der Kontext eines Roboter-Schulprojektes genutzt, um mit den Schüler:innen zunächst die Unterscheidung von Zwei- und Dreidimensionalität zu thematisieren, bevor sie Oberflächeninhaltsberechnungen an zusammengesetzten Körpern durchführen. Im dritten Teil planen die Schüler:innen eine Badeschale für eine Schildkröte und führen an dieser Volumenberechnungen durch. Ziel der Unterrichtseinheit ist, dass die Schüler:innen mittels des Lernkontexts 3D-Druck sowohl ihre mathematischen Kompetenzen im Bereich der inhaltsbezogenen Kompetenz *Raum und Form* als auch verschiedene prozessbezogene mathematische und mediale Kompetenzen fördern (vgl. Anhang B).

7.3 Forschungsfragen

Für eine summative Evaluierung des erstellten Unterrichtskonzepts im Sinne einer Mehrwertevaluierung, wurden folgende Forschungsfragen untersucht:

- (RQ)** Inwiefern beeinflusst eine Unterrichtseinheit über zusammengesetzte Körper unter der Verwendung der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im Vergleich zu einem herkömmlichen Unterricht über zusammengesetzten Körpern
- (1) das Selbstkonzept der Schüler:innen in Bezug auf die 3D-Druck-Technologie,
 - (2) das Interesse der Schüler:innen an ICT und ihre subjektiv wahrgenommene ICT-Kompetenz sowie
 - (3) die instrumentelle Motivation der Schüler:innen (vgl. Abschnitt 2.2.4),
 - (4) das mathematische Selbstkonzept der Schüler:innen sowie
 - (5) die digitalen Kompetenzen der Schüler:innen (vgl. Abschnitt 2.2.4), und
 - (6) den mathematischen Lernzuwachs der Schüler:innen beim Thema zusammengesetzte Körper?

In Bezug auf die Forschungsfragen (1) bis (3) wurde eine Zunahme verschiedener Komponenten des 3D-Druck-bezogenen Selbstkonzepts nach dem ersten Kontakt mit der digitalen Technologie erwartet. Mit den Forschungsfragen (4) bis (6) sollte überprüft werden, ob die Nutzung der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext den Erwerb inhaltsbezogener mathematischer Kompetenzen beeinflusst. Hierbei wird davon

ausgegangen, dass der Lernkontext nicht vom mathematischen Lernen in der Unterrichtseinheit ablenkt bzw. dass die durch den Lernkontext potentiell reduzierte Lernzeit keine Auswirkungen auf die mathematischen Inhalte der Unterrichtseinheit hat.

7.4 Methode

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden $N = 137$ Schüler:innen (76 weiblich, 58 männlich, 3 keine Angabe; Durchschnittsalter: 12,01 Jahre; durchschnittliche Mathematiknote des letzten Zeugnisses: 2,49) der Klassenstufen 5 bis 7 ($n_5 = 23$, $n_6 = 90$, $n_7 = 20$) von fünf Gemeinschaftsschulen bzw. Gymnasien mit Hilfe einer Prä- und einer Post-Erhebung befragt. Zwischen den beiden Erhebungszeitpunkten durchliefen die Schüler:innen die Unterrichtseinheit zu dem mathematischen Lerninhalt zusammengesetzte Körper in ihrem regulären Mathematikunterricht. Dabei wurde der Lerninhalt in den Interventionsklassen ($n_{IG} = 101$) mit dem Einsatz der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext und in den Kontrollklassen ($n_{KG} = 36$) mit herkömmlichen Unterrichtsansätzen unterrichtet. In Zusammenarbeit mit den Lehrkräften der Interventionsklassen wurde die entwickelte Unterrichtseinheit vor dem Einsatz an die individuellen Bedürfnisse der Lerngruppen angepasst (z. B. in ihrem Differenzierungs- oder Unterstützungsgrad).

Der eingesetzte Fragebogen wurde von den Schüler:innen digital auf der Erhebungsplattform SoSciSurvey oder analog ausgefüllt und bestand im Prä- bzw. Post-Befragungszeitpunkt aus drei bzw. zwei Teilen. Der erste Teil der Prä-Befragung bestand aus demographischen Fragen (u. a. zu Geschlecht, Alter und Klassenstufe) sowie Fragen zur digitalen Ausstattung der Schüler:innen in ihrem Zuhause und zu der Nutzungshäufigkeit der zugänglichen digitalen Medien. Im zweiten Teil der Befragung, der Teil des Prä- und Post-Fragebogen war, wurden die Schüler:innen zu Aspekten ihres (globalen und raumgeometrischen) mathematischen Selbstkonzepts (Unfried et al., 2015) und 3D-Druck-bezogenen Selbstkonzepts (vgl. Abschnitt 2.2.4; adaptiert nach Janneck et al., 2012), ihres Interesses an ICT sowie ihrer persönlich wahrgenommenen ICT-Kompetenz (Goldhammer et al., 2017), ihres beruflichen Interesses (Bereiche unterteilt nach Bundesagentur für Arbeit, 2021) und ihrer instrumentellen Motivation (adaptiert nach PISA 2006, vgl. Frey et al., 2009) sowie einer Selbsteinschätzung ihrer digitalen Kompetenzen (basierend auf den Fachanforderungen zur Medienkompetenz; MBWK SH, 2018) befragt. Zur Beurteilung der Aussagen wurden die Schüler:innen gebeten, die Aussagen auf einer 4-Punkte-Likert-Skala (von 1 „stimme gar nicht zu“ bis 4 „stimme voll zu“) zu bewerten. Tabelle 7.1 zeigt die interne Konsistenz der verwendeten Subskalen, die überwiegend als gut bis sehr gut eingeordnet werden kann. Die geringe interne Konsistenz der Skalen zur *internalen Attribution*, zu den *externalen Kontrollüberzeugungen* sowie zu den *3D-Druck-bezogenen Strategien* (alles kognitive Komponenten des 3D-Druck bezogenen Selbstkonzepts) kann auf die sehr geringe Rücklaufquote dieser Skalen zurückgeführt werden. Daher wurden diese drei Skalen in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt. Zur Beantwortung der Forschungsfragen (1) bis (6) wurden einseitige t -Tests mit gepaarten Stichproben zum Vergleich der Prä- und Post-Befragungsdaten durchgeführt. Darüber hinaus wurden die Effektgrößen mit Cohen's d für t -Tests berechnet, um das Ausmaß der

Summative Mehrwertevaluierung im Feld

Veränderungen aufzuzeigen. Für Vergleiche mit der Kontrollgruppe wurden ANCOVAs mit den Ergebnissen der Prä-Befragung als Kovariate durchgeführt.

Table 7.1: Übersicht über die erhobenen Konstrukte, die für die Beantwortung der Forschungsfragen relevant sind sowie deren interne Konsistenz, dargestellt mittels Cronbach's Alpha (für Skalen mit drei oder mehr Items) und Spearman Brown (für Skalen mit zwei Items).

Variable und Beispielitem	Anzahl Items	Reliabilität (Prä)	Reliabilität (Post)
MATHEMATISCHES SELBSTKONZEPT			
Globales mathematisches Selbstkonzept (<i>Ich bin gut in Mathe.</i>)	8	.88	.88
Mathematisches Selbstkonzept bezogen auf Raumgeometrie (<i>Formen und Körper kann ich mir gut vorstellen. Ich kann sie in meinen Gedanken drehen und weiß genau, wie sie aussehen.</i>)	4	.86	.84
3D-DRUCK BEZOGENES SELBSTKONZEPT: KONATIVE KOMponentEN			
Handlungserfahrungen (<i>Ich verfüge über viel praktische Erfahrung im Umgang mit 3D-Druckern.</i>)	3	.67	.57
3D-DRUCK BEZOGENES SELBSTKONZEPT: MOTIVATIONALE KOMponentEN			
Positive Gefühle (<i>Die 3D-Druck-Technologie fasziniert mich.</i>)	2	.65	.81
Ängstlichkeit (<i>Im Umgang mit 3D-Druckern habe ich Angst, etwas falsch zu machen.</i>)	3	.82	.84
Verstehen (<i>Ich will verstehen, wie die 3D-Druck-Technologie funktioniert.</i>)	2	.72	.83
Gestalten (<i>Ich finde es interessant, mit dem 3D-Drucker etwas zu erschaffen.</i>)	3	.80	.81
Werkzeugperspektive (<i>Der 3D-Drucker ist für mich nur Mittel zum Zweck.</i>)	2	.49	.45
3D-DRUCK BEZOGENES SELBSTKONZEPT: KOGNITIVE KOMponentEN			
Subjektiv wahrgenommene Kompetenz (<i>Im Umgang mit 3D-Druckern bin ich sicherer als der Durchschnitt in meinem Alter.</i>)	3	.90	.88
Selbstwirksamkeit bezogen auf den 3D-Druck (<i>Wenn ich mit Problemen im 3D-Druck-Prozess konfrontiert werde, finde ich Mittel und Wege, sie zu lösen.</i>)	4	.82	.90

Summative Mehrwertsevaluierung im Feld

Internale Attribution (Wenn der 3D-Druck-Prozess nicht richtig funktioniert, liegt es in der Regel daran, dass ich etwas falsch gemacht habe.)	2	-.36	.73
Externale Kontrollüberzeugungen (Ich habe keine Kontrolle über Probleme, die beim 3D-Druck-Prozess auftreten.)	2	1.00	.33
3D-Druck bezogene Strategien (Eine neue 3D-Druck-Software (z. B. CAD, Slicer) probiere ich meist erst einmal intuitiv aus.)	2	-.45	.63

WEITERE PSYCHOLOGISCHE KONSTRUKTE

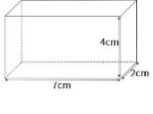
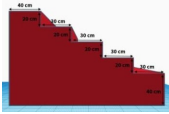
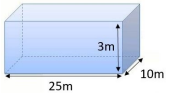
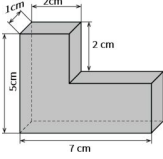
Interesse an ICT (Ich vergesse schnell die Zeit, wenn ich digitale Geräte nutze.)	4	.59	.69
Subjektiv wahrgenommene ICT-Kompetenz (Wenn meine Freund:innen oder Verwandte ein Problem mit einem digitalen Gerät haben, kann ich ihnen helfen.)	5	.79	.83
Selbsteinschätzung digitaler Kompetenzen K1.2 (Auswerten und Bewerten) (Ich kann Maße aus einem digitalen dreidimensionalen Modell ablesen.)	4	.78	.84
Selbsteinschätzung digitaler Kompetenzen K3.1 (Entwickeln und Produzieren) (Ich kann digital ein Modell in einer CAD-Software modellieren.)	5	.92	.87
Selbsteinschätzung digitaler Kompetenzen K5.2 (Werkzeuge bedarfsgerecht einsetzen) (Ich kenne neben dem 3D-Druck noch andere Werkzeuge/Vorgehen, mit denen ich ein Objekt erstellen kann.)	5	.86	.85
Instrumentelle Motivation (Sich im Unterricht mit digitalen Werkzeugen (z. B. 3D-Druck) anzustrengen, zahlt sich aus, weil mir das bei der Arbeit, die ich später machen möchte, helfen wird.)	4	.87	.93

Der dritte Teil der beiden Fragebögen enthielt drei (Prä-Test) bzw. vier (Post-Test) mathematische Kompetenzaufgaben. Diese Aufgaben bezogen sich auf die durch die Unterrichtseinheit zu fördernden inhaltsbezogenen mathematischen Kompetenzen (Identifikation und Benennung geometrischer Grundkörper in zusammengesetzten Körpern, Oberflächeninhaltsberechnung und Volumenberechnung an (zusammengesetzten) Körpern). Die zusätzliche vierte Aufgabe im Post-Test thematisierte neben der Volumenberechnung eines zusammengesetzten Körpers die Umrechnung von Kubikmetern in Liter. Die mathematischen Kompetenzaufgaben dienten der Überprüfung, ob die entsprechenden mathematischen Inhalte in der Unterrichtseinheit gelernt

Summative Mehrwertsevaluierung im Feld

wurden oder ob der Einsatz der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext potentiell vom Mathematiklernen abgelenkt hat. In der ersten Aufgabe wurde jeweils ein Gebäude aus vier Perspektiven (vorne, rechts, hinten, links) bildlich dargestellt. Die Schüler:innen mussten hier die geometrischen Grundkörper, aus denen das Gebäude zusammengesetzt war, identifizieren und benennen. Um alle zugrundeliegenden geometrischen Grundkörper identifiziert zu haben, mussten in der Prä-Befragung vier und in der Post-Befragung fünf Grundkörper genannt werden. Bei der Auswertung von Aufgabe 1 wurde die Punktevergabe normalisiert (Prätest: 0,25 Punkte und Posttest: 0,2 Punkte pro richtig benanntem geometrischen Grundkörper), um die Vergleichbarkeit dieser Aufgabe zwischen der Prä- und Post-Befragung zu gewährleisten. In der zweiten und dritten Aufgabe mussten die Schüler:innen eine innermathematische bzw. kontextualisierte Aufgabe lösen, indem sie den Oberflächeninhalt und das Volumen eines dargestellten geometrischen Grundkörpers in der Prä-Befragung bzw. eines zusammengesetzten Körpers in der Post-Befragung angaben. Tabelle 7.2 gibt einen Überblick über die dargestellten Körper der Aufgaben 1 bis 3.

Tabelle 7.2: Beispielbilder der dargestellten geometrischen Grundkörper und zusammengesetzten Körper der Aufgaben 1 bis 3 in der Prä- und Post-Befragung.

Aufgabe 1 (geometrische Grundkörper benennen)		Aufgabe 2 (Oberflächeninhalt)		Aufgabe 3 (Volumen)	
Prä	Post	Prä	Post	Prä	Post
von hinten:	von rechts:				

Um die Komplexität der Bearbeitung der Aufgaben neben den anderen Teilen des Fragebogens gering zu halten, wurden die Schüler:innen in den Aufgaben 2 und 3 gebeten, aus acht in einem Multiple-Choice-Design vorgegebenen Antwortmöglichkeiten die richtige Antwort auszuwählen. Dabei konnte jede der acht Antwortmöglichkeiten durch eine mathematische Zusammensetzung der vorgegebenen Maße des (zusammengesetzten) Körpers erreicht werden, wobei sich jeweils zwei Werte nur in der Dimension in der Einheit unterschieden (z. B. 750 cm^2 vs. 750 cm^3 für Aufgabe 3 in der Prä-Befragung). Für die Aufgaben 2 und 3 erhielten die Schüler:innen einen Punkt für die richtige Lösung und 0,5 Punkte bei richtigem Wert, aber falscher Dimension. Zu beachten ist, dass die Aufgaben nicht direkt vergleichbar sind, da sie sich in der Prä- und Post-Befragung unterscheiden. Da sich die Unterrichtseinheit aber nur über wenige Wochen erstreckte und keine umfangreiche Testzeit zur Verfügung stand, wurde dieses Vorgehen des Einzelitem-Vergleichs anstelle eines Skalenvergleichs gewählt. Dementsprechend können in den Ergebnissen nur Tendenzen zum Mathematiklernen der Schüler:innen aufgezeigt werden.

7.5 Ergebnisse

Tabelle 7.3 zeigt die deskriptiven Werte der erhobenen Skalen der Gesamtstichprobe sowie der Teilstichproben der Interventions- und Kontrollgruppe zum Prä- und Post-Befragungszeitpunkt zur Beantwortung der Forschungsfragen (1) – (3).

Tabelle 7.3: Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe sowie der beiden Teilstichproben der Interventions- und Kontrollgruppe für die Skalen zu dem 3D-Druck bezogenen Selbstkonzept, zu dem Interesse an ICT, zu der subjektiv wahrgenommenen ICT-Kompetenz und zu der instrumentellen Motivation (Likert-Skalen von 1 = „stimme gar nicht zu“ bis 4 = „stimme voll zu“). Die grau unterlegten Werte werden aufgrund geringer interner Konsistenz nicht weiter betrachtet, sollen hier aber dennoch berichtet werden.

Variable		Gesamt (N = 137)	Interventi- onsgruppe (n _{IG} = 101)	Kontroll- gruppe (n _{KG} = 36)
3D-DRUCK BEZOGENES SELBSTKONZEPT: KONATIVE KOMponentEN				
Handlungserfahrungen	Prä	1,64 (0,65)	1,68 (0,60)	1,51 (0,79)
	Post	1,98 (0,74)	2,11 (0,69)	1,60 (0,77)
3D-DRUCK BEZOGENES SELBSTKONZEPT: MOTIVATIONALE KOMponentEN				
Positive Gefühle	Prä	2,54 (0,89)	2,55 (0,93)	2,50 (0,74)
	Post	2,65 (0,84)	2,71 (0,79)	2,42 (1,02)
Ängstlichkeit	Prä	2,46 (0,89)	2,38 (0,89)	2,74 (0,84)
	Post	2,30 (0,88)	2,28 (0,86)	2,40 (0,96)
Verstehen	Prä	2,77 (0,93)	2,83 (0,90)	2,54 (1,02)
	Post	2,64 (0,95)	2,66 (0,91)	2,59 (1,07)
Gestalten	Prä	2,91 (0,93)	2,94 (0,89)	2,81 (1,09)
	Post	2,87 (0,83)	2,97 (0,76)	2,52 (0,98)
Werkzeugperspektive	Prä	2,21 (0,77)	2,22 (0,74)	2,16 (0,23)
	Post	2,24 (0,77)	2,36 (0,73)	1,75 (0,75)
3D-DRUCK BEZOGENES SELBSTKONZEPT: KOGNITIVE KOMponentEN				
Subjektiv wahrgenommene Kompetenz	Prä	1,87 (0,86)	1,88 (0,84)	1,81 (0,98)
	Post	2,15 (0,85)	2,21 (0,85)	1,86 (0,84)
Selbstwirksamkeit bezogen auf den 3D-Druck	Prä	2,03 (0,83)	2,08 (0,87)	1,87 (0,64)
	Post	2,24 (0,87)	2,35 (0,88)	1,84 (0,72)
Internale Attribution	Prä	2,31 (0,53)	2,17 (0,52)	2,75 (0,35)
	Post	2,56 (0,73)	2,50 (0,84)	2,75 (0,35)

Summative Mehrwertevaluierung im Feld

Externale Kontrollüberzeugungen	Prä	2,17 (1,17)	1,80 (0,8)	4,00 (-)
	Post	2,58 (0,80)	2,60 (0,89)	2,50 (-)
3D-Druck bezogene Strategien	Prä	3,43 (0,45)	3,40 (0,55)	3,50 (0,00)
	Post	3,14 (0,90)	3,00 (1,00)	3,50 (0,71)
WEITERE PSYCHOLOGISCHE KONSTRUKTE				
Interesse an ICT	Prä	3,36 (0,50)	3,36 (0,50)	3,38 (0,54)
	Post	3,33 (0,55)	3,36 (0,55)	3,25 (0,56)
Subjektiv wahrgenommene ICT-Kompetenz	Prä	3,09 (0,60)	3,08 (0,62)	3,13 (0,57)
	Post	3,04 (0,63)	3,03 (0,63)	3,05 (0,65)
Instrumentelle Motivation	Prä	2,55 (0,81)	2,59 (0,79)	2,42 (0,89)
	Post	2,37 (0,87)	2,43 (0,83)	2,16 (1,01)

Wie in Tabelle 7.4 dargestellt, zeigen die Ergebnisse der *t*-Tests mit gepaarten Stichproben für die Daten (a) der Gesamtstichprobe, (b) der Teilstichprobe der Interventionsgruppe und (c) der Teilstichprobe der Kontrollgruppe signifikante Unterschiede in verschiedenen Konstrukten zwischen Prä- und Post-Test. Die Unterschiede entsprechen kleinen bis mittelgroßen Effekten. Die nicht berichteten Werte sind nicht signifikant.

Tabelle 7.4: Prä-Post-Vergleiche mittels *t*-Tests für gepaarte Stichproben der Gesamtstichprobe sowie der beiden Teilstichproben der Interventions- und Kontrollgruppe für die Skalen zu dem 3D-Druck bezogenen Selbstkonzeptes, zu dem Interesse an ICT, zu der subjektiv wahrgenommenen ICT-Kompetenz und zu der instrumentellen Motivation sowie Betrachtung des Einflusses der Gruppenzugehörigkeit (Interventions- oder Kontrollgruppe) durch ANCOVAs unter Festhalten des Werts der Prä-Befragung auf den Wert der Post-Befragung (***) $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$, # $p < .10$; SWE = Selbstwirksamkeitserwartung).

Variable	Gesamtstichprobe		Interventionsgruppe		Kontrollgruppe		ANCOVA	
	<i>t</i>	<i>d</i>	<i>t</i>	<i>d</i>	<i>t</i>	<i>d</i>	<i>F</i>	η^2
Handlungserfahrungen	6,37***	0,58	6,99***	0,73	-	-	10,3**	.049
Positive Gefühle	-	-	1,57#	0,18	-	-	-	-
Ängstlichkeit	-1,67*	-0,17	-	-	-1,36#	-0,30	-	-
Verstehen	-	-	-1,57#	-0,18	-	-	-	-
Gestalten	-	-	-	-	-1,37#	-0,30	5,5**	.039
Werkzeugperspektive	-	-	-	-	-1,52#	-0,38	8,84**	.093

Subj. wahrg. 3D-Druck- Kompetenzen	3,13**	0,34	3,37***	0,40	-	-	-
3D-Druck be- zogene SWE	2,40**	0,27	2,76**	0,35	-	4,07*	.034
Interesse an ICT	-	-	-	-	-1,61#	-0,29	-
Subj. wahrg. ICT-Kompe- tenz	-	-	-	-	-	-	-
Instrumentelle Motivation	-2,22*	-0,23	-1,68*	-0,20	-1,67#	-0,37	-

Darüber hinaus wurden ANCOVAs berechnet, um den Einfluss der Gruppenzugehörigkeit (Interventions- oder Kontrollgruppe) auf den Wert der Post-Befragung zu berechnen, wobei der Wert der Prä-Befragung als Kovariate festgehalten wurde (vgl. Tab. 7.4). Die Daten weisen darauf hin, dass die Gruppenzugehörigkeit einen signifikanten Einfluss auf den Wert der Post-Befragung für die vier Konstrukte *Handlungserfahrungen*, *3D-Druck-bezogene Selbstwirksamkeitserwartungen*, *Werkzeugperspektive* und *Gestalten* hat. Dabei ist die Zugehörigkeit zur Interventionsgruppe als günstiger für die Entwicklung der ersten drei Konstrukte zu bewerten. Der Prädiktor Gruppenzugehörigkeit hat dabei einen kleinen bis mittelgroßen Effekt.

Tabelle 7.5 zeigt die deskriptiven Kennwerte der erhobenen Skalen der Gesamtstichprobe sowie der Teilstichproben der Interventions- und Kontrollgruppe zum Prä- und Post-Befragungszeitpunkt zur Beantwortung der Forschungsfragen (4) und (5).

Tabelle 7.5: Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe sowie der beiden Teilstichproben der Interventions- und Kontrollgruppe zu den Skalen zu dem globalen und raumgeometrischen Selbstkonzept sowie zu der Selbsteinschätzung der zu fördernden digitalen Kompetenzen (vgl. MBWK SH, 2018) (Likert-Skalen von 1 = „stimme gar nicht zu“ bis 4 = „stimme voll zu“).

Variable		Gesamt (N = 137)	Interventions- gruppe (n _{IG} = 101)	Kontrollgruppe (n _{KG} = 36)
MATHEMATISCHES SELBSTKONZEPT				
Globales mathematisches Selbstkonzept	Prä	2,81 (0,72)	2,88 (0,64)	2,60 (0,74)
	Post	2,78 (0,64)	2,85 (0,62)	2,59 (0,68)
Mathematisches Selbst- konzept bezogen auf Raumgeometrie	Prä	3,02 (0,72)	3,14 (0,65)	2,66 (0,78)
	Post	3,03 (0,69)	3,11 (0,65)	2,79 (0,74)

Summative Mehrwertevaluierung im Feld

SELBSTEINSCHÄTZUNG DIGITALER KOMPETENZEN				
Selbsteinschätzung digitaler Kompetenzen K1.2	Prä	2,44 (0,75)	2,57 (0,67)	2,02 (0,84)
	Post	2,63 (0,81)	2,74 (0,75)	2,24 (0,88)
Selbsteinschätzung digitaler Kompetenzen K3.1	Prä	1,91 (0,84)	1,94 (0,82)	1,78 (0,92)
	Post	2,38 (0,87)	2,54 (0,79)	1,80 (0,89)
Selbsteinschätzung digitaler Kompetenzen K5.2	Prä	2,07 (0,76)	2,10 (0,77)	1,98 (0,74)
	Post	2,44 (0,78)	2,56 (0,74)	2,07 (0,80)

Wie in Tabelle 7.6 dargestellt, zeigen die Ergebnisse der *t*-Tests mit gepaarten Stichproben für die Daten (a) der Gesamtstichprobe, (b) der Teilstichprobe der Interventionsgruppe und (c) der Teilstichprobe der Kontrollgruppe signifikante Unterschiede in der Selbsteinschätzung der in der Unterrichtseinheit zu fördernden digitalen Kompetenzen (K1.2, K3.1 und K5.2; vgl. MBWK SH, 2018) zwischen Prä- und Post-Test. Die Unterschiede entsprechen mittelkleinen bis mittelgroßen Effekten. Die nicht berichteten Werte sind nicht signifikant.

Tabelle 7.6: Prä-Post-Vergleiche mittels *t*-Tests für gepaarte Stichproben der Gesamtstichprobe sowie der beiden Teilstichproben der Interventions- und Kontrollgruppe für die Skalen zu der Selbsteinschätzung der zu fördernden digitalen Kompetenzen sowie Betrachtung des Einflusses der Gruppenzugehörigkeit (Interventions- oder Kontrollgruppe) durch ANCOVAs unter Festhalten des Werts der Prä-Befragung auf den Wert der Post-Befragung (vgl. MBWK SH, 2018; *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$).

Variable	Gesamtstichprobe		Interventionsgruppe		Kontrollgruppe		ANCOVA	
	<i>t</i>	<i>d</i>	<i>t</i>	<i>d</i>	<i>t</i>	<i>d</i>	<i>F</i>	η^2
Selbsteinschätzung digitaler Kompetenzen K1.2	2,43**	0,24	2,20*	0,25	-	-	-	-
Selbsteinschätzung digitaler Kompetenzen K3.1	4,90***	0,50	6,01***	0,69	-	-	12,9***	.105
Selbsteinschätzung digitaler Kompetenzen K5.2	4,57***	0,46	5,10***	0,60	-	-	7,61**	.059

Analog zur Beantwortung der Forschungsfragen (1) bis (3) wurden auch zur Beantwortung der Forschungsfragen (4) und (5) ANCOVAs berechnet, um den Einfluss der Gruppenzugehörigkeit (Interventions- oder Kontrollgruppe) auf den Wert der Post-Befragung zu berechnen, wobei der Wert der Prä-Befragung als Kovariate festgehalten wurde (vgl. Tab. 7.6). Die Daten weisen darauf hin, dass die Gruppenzugehörigkeit ein signifikanter Prädiktor für den Wert der Post-Befragung hinsichtlich der

Selbsteinschätzung der zu fördernden digitalen Kompetenzbereiche 3.1 und 5.2 ist. Dabei ist die Zugehörigkeit zur Interventionsgruppe als günstiger für die Entwicklung der beiden Kompetenzbereiche zu bewerten. Der Prädiktor Gruppenzugehörigkeit hat dabei einen mittelgroßen bzw. mittelkleinen Effekt.

Mit Hilfe der drei bzw. vier mathematischen Kompetenzaufgaben sollte zudem ein Indikator für den Erfolg des mathematischen Lernens der Schüler:innen aus den Daten abgeleitet werden (Forschungsfrage (6)). Tabelle 7.7 zeigt äquivalent zu den bisherigen Betrachtungen die normierten Scores jedes Aufgabenpaars aus der Prä- und Post-Befragung zwischen 0 (falsch) und 1 (korrekt).

Tabelle 7.7: Prä-Post-Vergleiche mittels *t*-Tests für gepaarte Stichproben der Gesamtstichprobe sowie der beiden Teilstichproben der Interventions- und Kontrollgruppe zu den mathematischen Kompetenzaufgaben (*** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$, # $p < .10$).

Aufgabe		Prä <i>M</i> (<i>SD</i>)	Post <i>M</i> (<i>SD</i>)	<i>t</i> (<i>p</i>)	Cohens <i>d</i>
Geometrische Körper benennen	Gesamtstichprobe	.61 (.57)	.73 (.19)	1,65# (.051)	0,19
	Interventionsgruppe	.68 (.64)	.74 (.19)	0,47 (.319)	0,06
	Kontrollgruppe	.54 (.16)	.70 (.20)	2,62** (.009)	0,62
Oberflächenin- haltsberechnung	Gesamtstichprobe	.07 (.23)	.20 (.37)	2,94** (.002)	0,29
	Interventionsgruppe	.07 (.22)	.20 (.38)	2,64** (.005)	0,30
	Kontrollgruppe	.08 (.24)	.20 (.35)	1,30 (.104)	0,26
Volumenberech- nung	Gesamtstichprobe	.50 (.43)	.33 (.41)	-3,08** (.001)	-0,32
	Interventionsgruppe	.54 (.43)	.37 (.41)	-2,74** (.004)	-0,32
	Kontrollgruppe	.32 (.39)	.15 (.34)	-1,38# (.094)	-0,33

Mittels der Berechnung von ANCOVAs, sollte auch hier der Einfluss der Gruppenzugehörigkeit (Interventions- oder Kontrollgruppe; fixed factor) unter Festhalten des Wertes der Prä-Befragung als Kovariate auf den Wert der Post-Befragung berechnet werden (vgl. Tab 7.8).

Tabelle 7.8: Betrachtung des Einflusses der Gruppenzugehörigkeit (Interventions- oder Kontrollgruppe) unter Festhalten des Werts der Prä-Befragung auf den Wert der Post-Befragung (# $p < .10$).

Aufgabe	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2
Geometrische Körper benennen	0,50	.482	.007
Oberflächeninhaltsberechnung	0,0002	.990	.000
Volumenberechnung	3,13#	.080	.033

Die Daten deuten darauf hin, dass die Gruppenzugehörigkeit beim Lernen der Volumenberechnung an zusammengesetzten Körpern einen tendenziellen Einfluss auf den Wert der Post-Befragung hat (vgl. Tab. 7.8). Interferenzstatistisch kann nicht nachgewiesen werden, dass die Zugehörigkeit zu einer der beiden Gruppen weniger ungünstig

für das Lernen der Volumenberechnung ist. Rein deskriptiv weisen die Daten der Interventionsgruppe auf ein besseres Verständnis der Volumenberechnung im Prä-Test hin, die Post-Test-Werte beider Gruppen nehmen um denselben Faktor ab (vgl. Tab. 7.7). Der Prädiktor Gruppenzugehörigkeit hat hier einen kleinen Effekt.

7.6 Diskussion

Ziel der vorgestellten Untersuchung war die Evaluation eines im Rahmen eines Educational-Design-Research-Ansatzes entwickelten Unterrichtskonzepts, das die 3D-Druck-Technologie als Lernkontext für den Lerninhalt der zusammengesetzten Körper nutzt. Die Motivation für das Gesamtvorhaben liegt in der Notwendigkeit, den Schüler:innen im Laufe ihrer Schulbiographie an einer allgemeinbildenden Schule sowohl fachliche als auch digitale Kompetenzen zu vermitteln und eine grundlegende Vorbereitung auf die zukünftige digitale Arbeitswelt zu gewährleisten (u. a. Grundke et al., 2017).

Die Ergebnisse in Tabellen 7.3 und 7.4 zeigen, dass sich die Unterrichtseinheit zu zusammengesetzten Körpern positiv auf einzelne Aspekte der verschiedenen Komponenten des 3D-Druck bezogenen Selbstkonzepts der Schüler:innen auswirkt und dass sich durch die Nutzung des Lernkontextes eine stärkere Entwicklung bezüglich dreier Komponenten (Handlungserfahrungen, Gestalten und *Selbstwirksamkeitserwartungen* in Bezug auf die 3D-Druck-Technologie) im Vergleich zur Kontrollgruppe zeigt (RQ(1)). Dies ist relevant für eine mögliche spätere berufliche Auseinandersetzung der Schüler:innen mit der 3D-Druck-Technologie im Kontext der digitalen Arbeitswelt (vgl. Abschnitt 6.3.2; Wakefield, 2015). Mit Hilfe der entwickelten Unterrichtseinheit können die Schüler:innen also (explizit und implizit) erste Erfahrungen im Umgang mit der 3D-Druck-Technologie sammeln, die sich positiv auf ihr Selbstkonzept bezüglich dieser Technologie auswirken. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass mittels der Erhebungsinstrumente keine tatsächlichen Kompetenzen im Umgang mit der Technologie erhoben wurden, sondern ausschließlich die selbstberichteten subjektiven Einstellungen der Schüler:innen zu der 3D-Druck-Technologie. Da die subjektiven Einstellungen einer Person zu einer Sache jedoch als entscheidend für ein zukünftiges Engagement angesehen werden (Bandura, 1978), können die dargestellten Ergebnisse dennoch als relevant für den Einsatz der entwickelten Unterrichtseinheit verstanden werden, um Schüler:innen auf eine mögliche zukünftige Auseinandersetzung mit der 3D-Druck-Technologie im beruflichen Kontext vorzubereiten.

Da die 3D-Druck-Technologie im zu evaluierenden Unterrichtskonzept nicht als Lerninhalt, sondern als Lernkontext implementiert wurde (vgl. Abschnitt 2.3), lag ein zweiter Fokus der Untersuchung auf dem Erwerb mathematischer und digitaler Kompetenzen sowie dem mathematischen Selbstkonzept der Schüler:innen (RQ(4)-(6)). Die erhobenen Daten deuten darauf hin, dass die angestrebten digitalen Kompetenzen durch das entwickelte Unterrichtskonzept tatsächlich gefördert wurden (vgl. Tab. 7.6). Die Daten zu den mathematischen Kompetenzen (vgl. Tab. 7.7 und 7.8) weisen zusätzlich darauf hin, dass die Schüler:innen der Interventionsgruppe nicht weniger Mathematik lernen als die Schüler:innen der Kontrollgruppe. So zeigen die Entwicklungen der Interventions- und Kontrollgruppe in den verschiedenen

Aufgabenkontexten die gleichen Tendenzen auf (positive Tendenz bei dem Benennen geometrischer Körper und bei der Oberflächeninhaltsberechnung, negative Tendenz bei der Volumenberechnung). Bei der Oberflächeninhaltsberechnung von (zusammengesetzten) Körpern schneiden die Schüler:innen der Interventionsgruppe zum Post-Befragungszeitpunkt signifikant besser ab als in der Prä-Befragung. Die Aufgaben zwei und drei der Post-Befragung sind aus mathematikdidaktischer Sicht als schwieriger einzustufen als die entsprechenden Aufgaben der Prä-Befragung: In den Aufgaben 2 (Berechnung des Oberflächeninhalts) und 3 (Berechnung des Volumens) wurden anstelle von Quadern (Zeitpunkt der Prä-Befragung) aus Quadern zusammengesetzte Körper (Zeitpunkt der Post-Befragung: Treppe in Aufgabe 2, L-Körper in Aufgabe 3) betrachtet. Diese erhöhte Komplexität könnte zudem Ansätze zur Erklärung der Schwierigkeiten der Schüler:innen beim Lösen der Aufgabe zur Volumenberechnung in der Post-Befragung geben, da hier sowohl die Interventions- als auch die Kontrollgruppe signifikant schwächere Ergebnisse als in der Prä-Befragung hatten. Darüber hinaus musste bei Aufgabe 1 (Benennung der geometrischen Körper in zusammengesetzten Körpern) ein Körper mehr benannt werden als in der Prä-Befragung, um die normierte volle Punktzahl zu erreichen. Der Schwierigkeitsgrad der Aufgabe 1 in der Prä- und Post-Befragung ist dennoch vergleichbar, da die zugrunde liegenden geometrischen Grundkörper in den abgebildeten Bildern der Gebäude ähnlich leicht zu identifizieren waren.

Die vorgestellte Untersuchung diene als fünfter und letzter Zyklus der Evaluierung des prototypischen Unterrichtskonzepts, der die 3D-Druck-Technologie als Lernkontext und damit als Vehikel zur Thematisierung des Lerninhalts zusammengesetzter Körper nutzt. Mit Bezug auf die durchgeführten Evaluierungszyklen kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die Nutzung der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht zur Vermittlung mathematischer Lerninhalte grundsätzlich funktioniert. Die bisherigen Evaluierungszyklen deuten darauf hin, dass die Lehrkräfte den Ansatz akzeptieren und als praktisch durchführbar ansehen (vgl. Abschnitt 6.3.1). Darüber hinaus wird die 3D-Druck-Technologie in den Unterrichtsmaterialien (u. a. Arbeitsblätter und Aufgabenvideos) in einer authentischen Weise eingesetzt, die von Industrievertreter:innen als effektive Vorbereitung zukünftiger Mitarbeiter:innen wahrgenommen wird (vgl. Abschnitt 6.3.2). Im Rahmen dieser und der beiden vorhergehenden Studien (vgl. Abschnitte 6.3.3 und 6.3.4) weisen die Ergebnisse darauf hin, dass die Schüler:innen mittels des entwickelten Unterrichtskonzepts Erfahrungen mit dem 3D-Druck sammeln, ohne dass dabei der Erwerb der curricularen mathematischen Inhalte vernachlässigt wird.

Limitationen

Wie bei Feldstudien üblich, gibt es verschiedene Einschränkungen, die die Interpretation der Ergebnisse beeinflussen können. Die Daten der vorliegenden Studie wurden in den Schuljahren 2021/22 und 2023/24 erhoben. Insbesondere im ersten Erhebungszeitraum waren die Schulen noch von den Nachwirkungen der Schulschließungen während der Covid19-Pandemie betroffen. Die Schulschließungen und ihre

Nachwirkungen könnten sich auf das Vorwissen der Schüler:innen über geometrische Grundkörper ausgewirkt haben. Da die Daten der Kontrollgruppe jedoch erst im Schuljahr 2023/24 erhoben wurden, kann davon ausgegangen werden, dass dieser Nachteil nur die Interventionsgruppe betraf. Darüber hinaus liegen keine Daten darüber vor, wie und mit welchem Fokus die Unterrichtseinheit in den Klassen der Kontrollgruppe unterrichtet wurde, außer, dass die 3D-Druck-Technologie keine Rolle spielte. Auch in den Interventionsgruppen wurde die Unterrichtseinheit von den regulären Lehrkräften unterrichtet. Obwohl die Unterrichtseinheit im Vorfeld mit den Lehrkräften besprochen wurde, kann es Unterschiede in der Umsetzung sowie in der Häufigkeit des Kontakts mit der Technologie (sowohl Soft- als auch Hardware) zwischen den verschiedenen Klassen gegeben haben.

Darüber hinaus ist die Aussagekraft der mathematischen Kompetenzaufgaben eingeschränkt. Aus Zeitgründen konnte nur eine geringe Anzahl von Aufgaben eingesetzt werden, da die Unterrichtseinheit im regulären Schulunterricht stattfand und alle anderen Konstrukte ebenfalls durch die Befragung erfasst werden sollten. Darüber hinaus bildet die Untersuchung nur einen Quasi-Längsschnitt über wenige Wochen ab (vor und nach einer Unterrichtseinheit von ca. sieben Unterrichtsstunden), so dass keine Aussagen über nachhaltiges mathematisches Lernen sowie einen Zugewinn an tatsächlichen Kompetenzen und nützlichen Selbstkonzepten für den Eintritt in die digitale Arbeitswelt getroffen werden können.

Die vorliegende Studie weist darauf hin, dass der Mathematikunterricht zu ausgewählten Lerninhalten (vgl. Tab. 6.2 in Abschnitt 6.1) funktionieren und eine Auseinandersetzung mit der Technologie fördern kann. Allerdings sind an dieser Stelle, wie auch bei anderen empirischen Studien, Replikationsstudien notwendig. Dabei wäre ein hervorzuhebender Fokus der Vergleich des Mathematiklernens der Schüler:innen im Unterricht mittels des vorliegenden Lernkontextes bzw. im herkömmlichen Unterricht zum vorliegenden Lerninhalt.

8 EINORDNUNG DER DISSEMINATIONSSTUDIE

Auf Basis des prototypischen Unterrichtskonzepts wurden im Anschluss an den letzten Evaluierungszyklus weitere Unterrichtskonzepte zu ausgewählten Inhalten (vgl. Tab. 6.2 in Abschnitt 6.1) erstellt. Um einen nachhaltigen Einsatz zu gewährleisten, wurden diese Unterrichtskonzepte auf einer Open Educational Resources Plattform (<https://oer.uni-kiel.de/>) veröffentlicht. Diese Plattform ermöglicht es Lehrkräften, die Unterrichtskonzepte herunterzuladen und später überarbeitete Versionen wieder hochzuladen. Zudem sollten die Unterrichtskonzepte den Lehrkräften im Rahmen von Kurz-Fortbildungen vorgestellt werden. Innerhalb der Kurz-Fortbildung wurden den Lehrkräften verschiedene Technologien für den Einsatz im Unterricht vorgestellt und kurze Anwendungskontexte in Form von Aufgaben und Videos gegeben. Der Teil zu der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im Mathematikunterricht umfasste ca. 60 Minuten. Um auch Lehrkräfte zu erreichen, die abseits der Ballungsräume arbeiten, wurden dazu 17 Fortbildungen an regionalen Schulen in Schleswig-Holstein und Süddänemark durchgeführt, an denen in dem Zeitraum Februar/März 2023 insgesamt 90 Lehrkräfte teilnahmen. Um weitere Lehrkräfte zu schulen, wurden darüber hinaus im Sommer 2023 vier Online-Fortbildungen via Zoom angeboten, an denen weitere zehn Lehrkräfte teilnahmen.

Die Lehrkräfte-Fortbildungen wurden von einer Untersuchung begleitet, deren Ziel es war, zu überprüfen, (a) ob die 3D-Druck-Technologie bereits nach einer einstündigen Kurz-Fortbildung mit anschließender Bereitstellung von Unterrichtsmaterialien (u. a. Vorschläge für Stundenraster und Arbeitsblätter sowie Aufgabenvideos) im regulären Mathematikunterricht eingesetzt wird und (b) inwiefern sich psychologische Konstrukte der Lehrkräfte zu dem Einsatz der Technologie im regulären Unterricht im Laufe der Auseinandersetzung mit dem Thema verändern. Grundlage der Studie waren die folgenden Forschungsfragen:

(RQ1) Inwiefern fördert eine (Kurz-)Fortbildung zu Nutzungsmöglichkeiten des 3D-Drucks als Lernkontext den Einsatz der 3D-Druck-Technologie im regulären Mathematikunterricht?

Ausgehend von der Annahme, dass es unter den Lehrkräften verschiedene Gruppen hinsichtlich interner Barrieren gibt (vgl. Abschnitt 2.2.4):

(RQ2) Inwiefern lassen sich die Ausprägungen relevanter interner Barrieren mittels (Kurz-)Fortbildungen angleichen?

Als Untersuchungsdesign wurde eine Prä-Post-Follow-up-Befragung gewählt, die mittels der Erhebungsplattform SoSciSurvey durchgeführt wurde. Insgesamt nahmen

Einordnung der Disseminationsstudie

$N = 24$ Lehrkräfte an der Prä- sowie einer der Post-Befragungen (Post- oder Follow-up-Befragung) teil. Der Fragebogen war analog zum Fragebogen der Rahmenbedingungsstudie der Schule (vgl. Abschnitt 3.2 und Kapitel 5) in drei Teile gegliedert: Der erste Teil enthielt Items zur digitalen Ausstattung der Schule sowie deren Nutzung durch die einzelne Lehrkraft. Der zweite Teil bestand aus Skalen zur Erfassung relevanter interner Barrieren (vgl. Abschnitt 2.2.4) bezüglich der Implementierung der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht. Der dritte Teil enthielt offene Fragen zu individuell wahrgenommenen Chancen und Herausforderungen in Bezug auf den Einsatz der 3D-Druck-Technologie im Fachunterricht. Die Daten wurden anschließend deskriptiv und im Gruppenvergleich ausgewertet. Bereits an dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Stichprobengröße trotz mehrmaliger Erinnerungsmails an die teilnehmenden Lehrkräfte eher klein und daher kritisch zu betrachten ist. Die erhobenen Daten wurden dennoch ausgewertet, so dass die Ergebnisse der Studie unter Berücksichtigung der Limitationen zu betrachten sind. Die Studie wird in Kapitel 9 ausführlich dargestellt.

9 DISSEMINATIONSSTUDIE – LEHRKRÄFTE-FORTBILDUNGEN

Der folgende Beitrag wurde am 26.08.2024 erstmals eingereicht und befindet sich im Begutachtungsverfahren.

Dem 3D-Druck als Lernkontext im Mathematikunterricht eine Chance geben – Technologieeinsatz von Mathematiklehrkräften im regulären Unterricht am Beispiel der 3D-Druck-Technologie

Mira H. Wulff, Anika Radkowitzsch & Aiso Heinze

Zusammenfassung: Digitale Medien und Technologien spielen in der heutigen und zukünftigen Gesellschaft sowie insbesondere in der Arbeitswelt eine zentrale Rolle. Bei der Vorbereitung von Schüler:innen auf den Übergang in die Arbeitswelt spielen Lehrkräfte eine bedeutende Rolle. Ziel des vorliegenden Beitrags ist die Untersuchung des Effekts von kurzen Lehrkräftefortbildungen und der Bereitstellung von forschungsbasiert entwickelten Unterrichtsmaterialien auf die Einbindung relevanter Aspekte der digitalen Arbeitswelt (hier am Beispiel der 3D-Druck-Technologie) als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht.

Abstract: Digital media and technologies play a relevant role in today's and tomorrow's society and especially in the world of work. Teachers are instrumental in preparing students for the transition to the world of work. The aim of this article is to investigate the effect of short teacher training courses and the provision of research-based developed teaching materials on the integration of relevant aspects of the digital world of work (using the example of 3D printing technology) as a learning context in regular mathematics lessons.

9.1 Einleitung

Die zunehmende Digitalisierung gehört aktuell zu den zentralen (gesellschaftlichen) Herausforderungen. Um diesen zu begegnen, können innovative Unterrichtsansätze in den allgemeinbildenden Schulen genutzt werden. Ein Fokus liegt hierbei auf der Nutzung digitaler Medien im Fachunterricht. Innerhalb des Mathematikunterrichts wird dabei meist auf herkömmliche digitale Medien bzw. Technologien wie den Taschenrechner oder Computer zurückgegriffen (vgl. z. B. Reinhold et al., 2023). Inzwischen bieten aber auch viele weitere digitale Medien, wie z. B. interaktive elektronische Tafeln (Hardware) und dynamische Geometriesoftware (Software), Möglichkeiten, um

fachliches Lernen im Unterricht zu unterstützen. Verschiedene digitale Medien gehören bereits zu den Standardmedien im regulären Mathematikunterricht: So können beispielsweise der Computer bei der Analyse von Daten oder der CAS-Taschenrechner bei der Visualisierung von Funktionen unterstützend in der Vermittlung fachlicher Inhalte im regulären Mathematikunterricht eingesetzt werden. Neben der Förderung fachlicher Kompetenzen gehören zum Bildungsauftrag der allgemeinbildenden Schulen ebenso die Berufsorientierung und die Berufsvorbereitung (KMK, 2017a). Für die Schaffung von Lerngelegenheiten zur Berufsorientierung und -vorbereitung können digitale Medien/Werkzeuge, die (a) eine Relevanz in der heutigen und zukünftigen Arbeitswelt besitzen und (b) einen Mathematikbezug aufweisen genutzt werden. Die zunehmende Digitalisierung der Arbeitswelt der letzten Jahrzehnte resultiert in einer Transformation von mechanischen oder analogen zu digitalen automatisierten Prozessen (z. B. Kaiser et al., 2021). Die neuen digitalen Technologien der Arbeitswelt können als Lernkontext im regulären Fachunterricht genutzt werden. Damit können einerseits fachliche Lernziele und andererseits digitale Lernziele inkl. eines Beitrags zur Berufsorientierung bzw. Berufsvorbereitung der Schüler:innen adressiert werden.

Die Auswahl der digitalen Medien und Technologien für den Mathematikunterricht obliegt den jeweiligen Lehrkräften, die den Unterricht planen, durchführen und nachbereiten. In dem Planungs- und Gestaltungsprozess haben die Lehrkräfte zwar eine eingeschränkte, aber vorhandene Autonomie unter anderem in der Auswahl der digitalen Medien (KMK, 2004). Lehrkräfte spielen folglich im Rahmen des voranschreitenden Digitalisierungsprozesses des Unterrichts an allgemeinbildenden Schulen eine essentielle Rolle. Damit Lehrkräfte digitale Medien erfolgreich in ihrem Unterricht nutzen können, bedarf es einer Passung zu dem Unterrichtsinhalt sowie entsprechende Kompetenzen der Lehrkräfte (vgl. Ostermann et al., 2022). Neben dem vorhandenen pädagogischen, fachlichen und fachdidaktischen Lehrkräftewissen sowie Einstellungen und Überzeugungen, rücken also zunehmend digitalisierungsbezogene Kompetenzen und Wissensfacetten in den Vordergrund (u. a. Fernández-Batanero et al., 2020). Darüber hinaus wird der Einsatz digitaler Medien im fachlichen Unterricht häufig mit einem – von Lehrkräften subjektiv wahrgenommenen – höheren Aufwand verbunden (Ostermann et al., 2021).

Da die Digitalisierung als (gesellschaftliche) Herausforderung auch in naher Zukunft nicht abgeschlossen sein wird, werden sich die digitalisierungsbezogenen Kompetenzen von Lehrkräften für eine erfolgreiche Integration aktueller digitaler Medien weiter verändern. Für die Vorbereitung der Lehrkräfte bilden die zwei ersten Phasen der Lehrkräfteausbildung (Studium, Vorbereitungsdienst) eine zentrale Grundlage. Nach Abschluss der zweiten Phase können Lehrkräfte in der sogenannten dritten Phase der Lehrkräftebildung Fortbildungsangebote in Anspruch nehmen, die unter anderem extern von den Fortbildungsinstituten der Länder, Schulämter, Universitäten, (Pädagogischen) Hochschulen oder intern von Kolleg:innen durchgeführt werden (vgl. Buhl et al., 2021). Aufgrund der schnellen Weiterentwicklung digitaler Medien nimmt die dritte Phase der Lehrkräfteausbildung eine zunehmend bedeutende Rolle ein. So erfüllen die ersten zwei Phasen der Lehrkräfteausbildung zwar die essentielle Bedeutung, zukünftige Lehrkräfte pädagogisch, fachlich und (fach-)didaktisch auf ihre Tätigkeit

als Lehrkraft vorzubereiten, das Kennenlernen neuer Medien bzw. die Weiterentwicklung vorhandenen Wissens unterliegt jedoch der individuellen Auseinandersetzung der Lehrkraft mit dem Inhalt – idealerweise mit Unterstützung der dritten Phase der Lehrkräfteausbildung.

Der vorliegende Beitrag basiert auf dem Design-Forschungsprojekt DiASper (Digitale Arbeitswelt aus Schulperspektive) und geht u. a. der Frage nach, inwiefern der 3D-Druck als exemplarisches digitales Werkzeug der Arbeitswelt in den regulären Mathematikunterricht eingebunden werden kann, um eine frühzeitige Berufsorientierung sowie eine Auseinandersetzung mit relevanten digitalen Technologien der Arbeitswelt zu ermöglichen. Neben dem Erwerb mathematischer Kompetenzen ist zudem ein Einblick in digitale und berufsrelevante Anforderungen ein Fokus des Projekts. Wie zuvor erwähnt, sind Mathematiklehrkräfte ein relevanter Faktor für die Einbindung von neu entwickelten Unterrichtskonzepten. Die Implementierung der im Projektkontext entwickelten Unterrichtsansätze kann folglich nur gelingen, wenn geeignete schulische Rahmenbedingungen gegeben sind und Lehrkräfte bereit sind, die Unterrichtskonzepte in ihrem regulären Mathematikunterricht einzusetzen. Vorhergehende Studien des Projektes weisen auf eine Offenheit von Mathematiklehrkräften gegenüber dem Einsatz der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im Mathematikunterricht hin, die mit dem erwarteten Nutzen des 3D-Druck-Kontextes und der *Selbstwirksamkeitserwartung* der Lehrkräfte zusammenhängt (vgl. Wulff et al., 2023a). Das Projekt DiASper nutzt zudem Erfahrungswerte aus einem binationalen Kontext, indem sowohl Unternehmen als auch Lehrkräfte aus Deutschland und Dänemark in die Entwicklung und die Evaluationszyklen mit einbezogen wurden (vgl. Wulff et al., 2023b). Der binationale Kontext wurde insbesondere aufgrund des unterschiedlichen Digitalisierungsgrads der Schulen sowie der unterschiedlichen digitalen Kompetenzen der Schüler:innen als förderlich eingeschätzt, da so eine größere Varianz in den unterrichtlichen Rahmenbedingungen zu erwarten ist. So zeigte beispielsweise die Studie ICILS 2018 hohe Diskrepanzen zwischen den computer- und informationsbezogenen Kompetenzen von Schüler:innen aus Deutschland und Dänemark sowie der digitalen Ausstattung deutscher und dänischer Schulen (Eickelmann et al., 2019).

Wie zuvor erwähnt, sind die Lehrkräfte die relevanten Akteure, wenn es um die Implementation innovativer Unterrichtskonzepte oder digitaler Medien geht. Um eine Verwendung der entwickelten Unterrichtsansätze an allgemeinbildenden Schulen zu fördern, wurden im Projektkontext kurze Fortbildungen durchgeführt, in denen Lehrkräften der Unterrichtsansatz vorgestellt wurde. In diesem Artikel stellen wir neben den notwendigen Hintergrundinformationen zu dem Unterrichtskonzept eine Evaluationsstudie zur Effektivität der kurzen Lehrkräftefortbildung vor. Mittels eines Prä-Post-Follow-up-Befragungskonzeptes wurden dazu die Einstellungen der teilnehmenden Lehrkräfte bezüglich der Nutzung der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht erhoben. Die zugrundeliegende Frage war dabei, inwiefern eine Kurzfortbildung sowie eine potentielle anschließende individuelle Auseinandersetzung der Lehrkräfte mit den Unterrichtsansätzen einen Einfluss auf die Ausprägung relevanter psychologischer Konstrukte bezüglich der Integration digitaler Technologien im Mathematikunterricht hat. Trotz der kurzen Fortbildungen sind die

Ergebnisse ermutigend. Aufgrund der geringen Bereitschaft der Lehrkräfte zur Teilnahme an der Begleitstudie unterliegen sie aber Limitationen und bedürfen einer Replikation.

9.2 Theoretischer Hintergrund

Dem Unterrichten mit digitalen Medien wird eine stetig wachsende Bedeutung zugeschrieben (institutionell beispielsweise sowohl von der KMK (2017b, 2021) als auch der OECD (2021)). Hintergrund hierfür ist u. a. das Ziel, Schüler:innen auf die digitalisierte (Arbeits-)Welt vorzubereiten. Um einen Unterricht mit digitalen Medien gewährleisten zu können, müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden: Einerseits müssen institutionelle Rahmenbedingungen betrachtet werden, wie beispielsweise die Ausstattung der Schulen mit digitalen Technologien, da diese mit der von den Lehrkräften wahrgenommenen Relevanz der Integration digitaler Technologien als auch ihrer Bereitschaft mit diesen auseinandersetzen positiv korreliert (Petko et al., 2018). Andererseits ist die jeweilige Fachlehrkraft für methodische und didaktische Entscheidungen in der Planung und Durchführung des Fachunterrichts zuständig, so dass Lehrkräfte in der Auswahl und der Nutzung digitaler Medien im Unterricht eine zentrale Rolle einnehmen.

9.2.1 Gelingensbedingungen für die Nutzung digitaler Technologien im Fachunterricht

Für die Einbindung digitaler Technologien in den Fachunterricht spielen verschiedene Gelingensbedingungen eine Rolle. Diese können nach Ertmer (1999) in externe und interne Kategorien unterteilt werden. Externe Barrieren sind beispielsweise schulinterne Ressourcen wie Hard- und Software, die Ausbildung der Lehrkräfte oder der didaktische und technische Support (vgl. Eickelmann et al., 2019). Da der zunehmende Digitalisierungsgrad der Schulen sowie die Verankerung des Lehrens und Lernens mit digitalen Technologien in der ersten Phase der Lehramtsausbildung (vgl. u. a. Ackeren et al., 2019) vermutlich zu einem schrittweisen Abbau externer Barrieren führt, können sie als temporär relevante Herausforderungen für die Integration von digitalen Technologien betrachtet werden. Die digitale Ausstattung der Schulen umfasst heute zumeist breit einsetzbare mobile Endgeräte wie Notebooks oder Tablets, wohingegen speziellere Geräte wie 3D-Drucker nicht Teil der digitalen Ausstattung von Schulen sind (vgl. Eickelmann et al., 2019).

Interne Barrieren umfassen u. a. teilweise unbewusste Einstellungen der Lehrkraft über das Lehren und Lernen mit der digitalen Technologie im jeweiligen Fachunterricht, wie beispielsweise die Beliefs der Lehrkraft, sowie professionelles Wissen (z. B. *TPACK*) und entsprechende Fertigkeiten der Lehrkräfte (vgl. Eickelmann et al., 2019). Die internen Barrieren werden in Relation zu den externen Barrieren als die „biggest enablers“ (Ertmer et al., 2012) bezeichnet, da sie als umfassender und relevanter im Integrationsprozess von digitalen Technologien in den Fachunterricht charakterisiert werden können (Ertmer, 1999; Newhouse, 2001). Demzufolge fokussiert die vorliegende Studie neben der technischen Schulausstattung hauptsächlich interne Barrieren.

9.2.2 Interne Barrieren von Lehrkräften bei der Nutzung digitaler Technologien im Fachunterricht

Für die Einbindung neuer Unterrichtsansätze in den Fachunterricht ist eine Passung dieser Ansätze zu bestehenden Beliefs der Lehrkraft von zentraler Bedeutung (Hughes, 2005; Zhao & Frank, 2003). Bezugnehmend auf die Erwartungs-Wert-Theorie von Wigfield et al. (1994) können zur Beschreibung der Übereinstimmung von individuellen Überzeugungen und – im vorliegenden Fall – dem Unterrichtsansatz des 3D-Drucks als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht die *task value beliefs* der Lehrkräfte betrachtet werden. Wigfield et al. (1992, 1994) unterteilen das Konstrukt in die drei Wertkategorien Freude (intrinsic value), Wichtigkeit (attainment value) und Nutzen (utility value). Diese lassen sich für die dargestellte Studie wie folgt beschreiben:

- Die Wertkategorie Freude (intrinsic value) beschreibt die individuelle Freude der Lehrkraft an dem vorliegenden Ansatz.
- Die Wertkategorie Wichtigkeit (attainment value) umfasst die von der Lehrkraft individuell wahrgenommene Relevanz des Ansatzes und damit verbunden, den vorliegenden Ansatz und die damit in der Vorbereitung und Umsetzung einhergehenden Herausforderungen zu meistern.
- Die Wertkategorie Nutzen (utility value) beschreibt den individuellen durch die Lehrkraft wahrgenommenen Nutzen des vorliegenden Ansatzes zu ihren eigenen und übergreifenden (Unterrichts-)Zielen.

Der einem Ansatz zugeschriebene *task value* beschreibt gemeinsam mit der dem Ansatz zugeordneten Erfolgserwartung die Leistungsmotivation einer Person (u. a. Wigfield & Eccles, 1992). Folglich kann angenommen werden, dass Lehrkräfte im Rahmen des Fachunterrichts an allgemeinbildenden Schulen einen neuen Ansatz in ihrem regulären Unterricht einsetzen, wenn sie diesem einen hohen *task value* zuschreiben.

Neben dem zugeschriebenen *task value* hat auch das individuelle Wissen der Lehrkraft einen signifikanten Einfluss auf die Entscheidung, wie der jeweilige Fachunterricht durchgeführt wird (Borko & Putnam, 1995). Das Lehrkräftewissen kann dabei mittels verschiedener Modelle beschrieben werden. Ein zentrales Modell zur individuellen Beschreibung von Lehrkräftewissen ist das PCK-Modell nach Shulman (1986), das Lehrkräftewissen in pädagogisches (*PK*), fachliches (*CK*) und fachdidaktisches Wissen (*PCK*) kategorisiert. Als Resultat der zunehmenden Digitalisierung der Schulen und des Fachunterrichts wurde das PCK-Modell u. a. durch Mishra und Koehler (2006) um eine technologische Komponente erweitert. In diesem TPACK-Framework wurden die bereits genannten Komponenten um das technologische Wissen (*TK*) und damit auch um die jeweiligen Überschneidungen technologisches pädagogisches (*TPK*), technologisches fachliches (*TCK*) und technologisches fachdidaktisches Wissen (in der Literatur sowohl als *TPCK* als auch als *TPACK* bekannt) ergänzt. Diese Ergänzung des ursprünglichen Modells lässt sich vor allem mit der Annahme begründen, dass eine Interaktion von Technologie, Inhalt und Pädagogik grundlegend für eine effektive Integration von Technologien im Fachunterricht ist (Angeli & Valanidis,

2009). Über das Lehrkräftewissen bezogen auf die vorgestellten Bereiche hinaus sind auch die *Selbstwirksamkeitserwartung* der Lehrkräfte in Bezug auf ebendiese von Relevanz (u. a. Wozney et al., 2006). Die *Selbstwirksamkeitserwartung* einer Lehrkraft bezogen auf ein Wissenskonstrukt beschreibt die individuelle Einschätzung der eigenen Handlungsfähigkeit und -effektivität bzgl. dieses Wissenskonstrukts. Dabei weist vorhergehende Forschung auf einen positiven Zusammenhang zwischen der Nutzung (bzw. Nutzungsintention) von digitalen Technologien im Unterricht und den *Selbstwirksamkeitserwartungen* bezüglich technikbezogener Wissenskonstrukte hin (Wozney et al., 2006; Wulff et al., 2023a). Nach Bauer und Kenton (2005) ist die Ausprägung der *Selbstwirksamkeitserwartung* der Lehrkräfte für die Nutzungs(intention) sogar von höherer Relevanz als die Wissensausprägung oder die Fertigkeiten der Lehrkräfte.

Die Frage nach dem Einsatz digitaler Technologien im regulären Fachunterricht sowie der Vorbereitung von Lehrkräften auf einen solchen Einsatz ist Gegenstand verschiedener Studien (vgl. u. a. Literaturreview von Pinto & Leite, 2020; Rodrigues, 2020; Dagdilelis, 2018). In dem vorliegenden Projektkontext wird der Einsatz von digitalen Technologien zur Förderung fachlicher und digitaler Kompetenzen sowie zur Bereitstellung von Gelegenheiten zur Berufsorientierung und -vorbereitung betrachtet. Hierfür wurde der 3D-Druck als eine relevante Technologie des digitalen Arbeitsmarktes exemplarisch ausgewählt. Im Folgenden werden daher der Projektkontext, die zugrundeliegenden Ziele sowie eine Begründung zur Auswahl der 3D-Druck-Technologie und ihrer Einsatzmöglichkeiten im schulischen Kontext dargestellt.

9.2.3 Projektkontext - Die Nutzung digitaler Medien im Fachunterricht zur Berufsorientierung und -vorbereitung

Der Bildungsauftrag der allgemeinbildenden Schulen umfasst neben dem allgemeinen Erziehungsauftrag, der Förderung fachlicher Kompetenzen sowie der Entwicklung von kognitiven, emotionalen, sozialen, kreativen und motorischer Fähigkeiten u. a. die Ermöglichung von beruflicher Teilhabe. Laut der 2017 veröffentlichten Empfehlung der Kultusministerkonferenz (KMK) soll es Schüler:innen im Laufe ihrer Schulzeit ermöglicht werden, mit verschiedenen Branchen, einzelnen Berufen oder relevanten Aspekten der Arbeitswelt in Kontakt zu kommen. Dieser Kontakt kann infolge der KMK dabei auf verschiedenen Ebenen stattfinden (KMK, 2017a):

- Auf institutioneller Ebene werden u. a. die Zusammenarbeit mit beruflichen Schulen und weiteren außerschulischen Partner:innen (z. B. der Bundesagentur für Arbeit) sowie die Einbindung der Eltern und Erziehungsberechtigten angesprochen.
- Auf der Ebene des Unterrichts können u. a. Berufswahlstrategien erlernt und reflektiert sowie diagnostische Instrumente eingesetzt werden, die Schüler:innen einen Überblick über bestehende Kompetenzen und Interessen geben. Zudem können im Rahmen des regulären Fachunterrichts Kontexte der Arbeitswelt oder studienrelevante Informationen aufgegriffen werden (Rohenroth et al., 2023b).

- Auf Schüler:innen-Ebene können Betriebspraktika dazu dienen, den Schüler:innen erste individuell gewählte Einblicke in die Arbeitswelt zu geben.

Empirische Studien zeigen, dass nur wenige Jugendliche sich ausreichend informiert fühlen, um einen erfolgreichen Übergang in die Arbeitswelt zu bestreiten, wenngleich Lernende den Lehrkräften sowie schulischen Informationsveranstaltungen eine hohe Relevanz zuschreiben (u. a. Barlovic et al., 2022; Giek & Seifried, 2023). In der Vorbereitung der Schüler:innen auf die digitale Arbeitswelt kann das Einbinden exemplarischer Aspekte der digitalen Arbeitswelt Vorteile bieten. Hierdurch können Schüler:innen verschiedene Branchen kennenlernen, aber auch Eingangsvoraussetzungen für Ausbildungen und Studiengänge betrachten. Dies kann dabei unterstützen, Fehlvorstellungen abzubauen und den Schüler:innen ein differenzierteres Bild der von ihnen erwarteten Kompetenzen und Fertigkeiten beim Übergang in die Arbeitswelt ermöglichen. Die Erhöhung der Ausprägung sowie die Ausdifferenzierung des Interessenprofils unterstützen Schüler:innen bei der Berufsfindung (differenziertes Profil, vgl. Eder & Bergmann, 2015).

9.2.4 3D-Druck als „neues“ digitales Werkzeug der digitalen Arbeitswelt

Die 3D-Druck-Technologie gewinnt in der digitalen Arbeitswelt als „neue“ Produktionsmethode neben den herkömmlichen subtraktiven (z. B. Fräsen) oder formgebenden Verfahren (z. B. Gießen) stetig an Relevanz (Fastermann, 2014; Hagl, 2015; Junk, 2017). So gab 2021 in einer vom Branchenverband der deutschen Informations- und Telekommunikationsbranche (BITKOM) durchgeführten Befragung eine große Mehrheit der befragten Industrieunternehmen an, dass sie den 3D-Druck bereits einsetzen (44 %) oder dessen Einsatz planen (42 %) (Rohleder, 2021). Für diese Entwicklung gibt es mehrere Gründe: Die Bereiche Customization und Personalization setzen die Technologie gewinnbringend ein, da die Produktion kleiner Stückzahlen oder Einzelstücke ohne Mehrkosten durch den additiven Produktionsprozess ermöglicht wird. Zudem bietet die 3D-Druck-Technologie eine zeit- und kostensparende Alternative zu den oben genannten herkömmlichen Produktionsprozessen (Fastermann, 2014; Hagl, 2015). Darüber hinaus können mittels der 3D-Druck-Technologie Teile produziert werden, die durch andere Produktionsverfahren nicht möglich oder in mehreren Schritten hergestellt werden müssten (z. B. Scharniere oder Verbindungen einzelner Teile).

Aufgrund der verschiedenen Vorteile wird die Technologie zunehmend breiter in Industrie, Handwerk und Wirtschaft eingesetzt, so beispielsweise im Flugzeugbau, bei der Herstellung von Kleinteilen oder sogar bei der Produktion von Implantaten, Lebensmitteln oder beim Häuserbau (vgl. Fastermann, 2014; Hagl, 2015). Folglich kann angenommen werden, dass das Potenzial der 3D-Druck-Technologie noch nicht ausgeschöpft ist und auch für zukünftige Arbeitsprozesse hochrelevant sein wird. Entsprechend bietet sich die Betrachtung der 3D-Druck-Technologie als Beispielaspekt der digitalen Arbeitswelt im Rahmen der Berufsorientierung und -vorbereitung an allgemeinbildenden Schulen an.

9.2.5 Nutzungsmöglichkeiten der 3D-Druck-Technologie in der Schule

Die Nutzung der 3D-Druck-Technologie im Fachunterricht der allgemeinbildenden Schule ist bereits Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte (z. B. Emmermann et al., 2016; Cheng, 2019; Dilling et al., 2021). Dabei ist ein Fokus die Bereitstellung sinnvoller Lerngelegenheiten mit der Technologie im regulären Schulunterricht, die für alle Schüler:innen unabhängig von individuellen Motivatoren zugänglich sind. Für eine sinnvolle Verbindung der Technologie mit dem regulären Fachunterricht können drei Ansätze für die Erstellung von Lernangeboten unterschieden werden: Die Nutzung der 3D-Druck-Technologie als Lerninhalt, zur Lernunterstützung oder als Lernkontext (vgl. u. a. Figueiredo & Alfonso, 2005).

- Bei der Nutzung der 3D-Druck-Technologie als Lerninhalt wird diese explizit im regulären Fachunterricht oder im Rahmen eines Unterrichtsprojekts aufgegriffen. So könnten beispielsweise im Mathematik-, Technik- oder Informatikunterricht die relevante Hard- und Software des 3D-Drucks oder genutzte Code-Strukturen thematisiert werden (Krisch et al., 2017).
- Die 3D-Druck-Technologie kann zudem zur Visualisierung von Lerngegenständen und somit zur Lernunterstützung eingesetzt werden. Hierbei kann weiter unterschieden werden, ob die Technologie zur Unterrichtsmaterialvorbereitung durch Lehrkräfte oder im Rahmen von Lerngelegenheiten von Lernenden genutzt wird. Beispielsweise können Lehrkräfte Pyramiden mit verschiedenen n -Ecken als Grundseite sowie einen Kegel zum Vergleich drucken. Lernende hingegen könnten zu Beginn der Unterrichtseinheit zu Laplace-Experimenten manipulierte Würfel konstruieren und drucken (Dilling et al., 2021).
- Zudem kann die 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im regulären Fachunterricht verwendet werden. Hierbei werden die zugrundeliegenden Prozesse oder der Druck an sich genutzt, um curriculare Inhalte des jeweiligen Faches zu unterrichten. Der Schwerpunkt liegt folglich nicht auf der Technologie als Lerninhalt, sondern auf den curricularen Fachinhalten, die mithilfe des 3D-Drucks unterrichtet und gelernt werden. Es existieren bereits erste veröffentlichte Ansätze, die den 3D-Druck als Lernkontext beispielsweise für das Thematisieren von dreidimensionalen Koordinaten in der 7. Klasse verwenden (Emmermann et al., 2016).

Im Rahmen des Projekts DiASper, an das die vorliegende Studie geknüpft ist, wurden Unterrichtsmaterialien entwickelt, mit denen der 3D-Druck als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht verwendet werden kann (Wulff et al., 2023b). Hierfür wurden die mathematischen Inhalte der Prozesse des 3D-Drucks (Modellierung, Triangulierung/Tesselierung, Slicing, technischer Druckprozess) analysiert und mit den curricularen Inhalten des Faches Mathematik im Land Schleswig-Holstein und in Dänemark abgeglichen. Im Rahmen dieses Abgleichs entstand eine Liste von Verknüpfungspunkten zwischen curricularen Lerninhalten des regulären Mathematikunterrichts und des 3D-Druck-Prozesses. Auf Basis dieser Liste wurden mittels eines Education-Design-Ansatz (vgl. Plomp & Nieveen, 2013) Unterrichtskonzepte mit einer

curricularen Begründung sowie einer Ausarbeitung der Vorteile der Herangehensweise der Nutzung des 3D-Drucks als Lernkontext im Mathematikunterricht erstellt. Diese wurden sowohl mit Akteuren aus der Schule als auch aus Industrie, Handwerk und Wirtschaft auf Akzeptanz des Unterrichtskonzeptes und Authentizität der Nutzung der Technologie evaluiert und optimiert. Auf diese Zyklen aufbauend wurden anschließend praktische Unterrichtsmaterialien (Stundenraster, Arbeitsblätter, Erklärungen und Aufgabenvideos) erstellt und in anhand eines prototypischen Konzeptes in drei weiteren Zyklen evaluiert und optimiert (Wulff et al., 2023b). Im letzten Schritt geht es um die Dissemination des Unterrichtskonzeptes und der Materialien mittels kurzer Lehrkräftefortbildungen.

9.2.6 Forschungsfragen

Um Lehrkräfte bei dem Einsatz neuer digitaler Technologien in ihrem Fachunterricht zu unterstützen, können diese im Rahmen von Fortbildungen vorgestellt werden. Hierbei sind verschiedene Persönlichkeits- und Interessenprofile der teilnehmenden Lehrkräfte zu berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund befasst sich der vorliegende Beitrag mit der Untersuchung des Einflusses von (Kurz-)Fortbildungen auf den Einsatz der 3D-Druck-Technologie im regulären Mathematikunterricht:

(RQ1) Inwiefern fördert eine (Kurz-)Fortbildung zu Nutzungsmöglichkeiten des 3D-Drucks als Lernkontext den Einsatz der 3D-Druck-Technologie im regulären Mathematikunterricht?

(RQ2) Ausgehend davon, dass es unter den Lehrkräften verschiedene Gruppen bezogen auf interne Barrieren gibt: Inwiefern lassen sich die Ausprägungen relevanter interner Barrieren mittels (Kurz-)Fortbildungen angleichen?

9.3 Methode und Design

9.3.1 Instrumente

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden im Februar und März 2023 Lehrkräftefortbildungen u. a. zur Nutzung der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht durchgeführt. Um auch interessierten, dezentral ansässigen Lehrkräften eine Teilnahme an den Fortbildungen zu ermöglichen, wurden die Fortbildungen an verschiedenen Schulen in Schleswig-Holstein und Süd-Dänemark angeboten. Aufgrund zeitlicher Rahmenbedingungen sowie dem regionalen Fortbildungsangebot wurden dreistündige Fortbildungen durchgeführt, in denen verschiedene Inhalte thematisiert wurden, darunter ein einstündiger Teil zum 3D-Druck als Lernkontext. Das Ziel der einstündigen Kurzfortbildung bestand darin, den teilnehmenden Lehrkräften den 3D-Druck sowie die im Projekt zuvor entwickelten Unterrichtskonzepte vorzustellen und ihnen erste Handlungskompetenzen zur Nutzung der 3D-Druck-Technologie im regulären Mathematikunterricht zu ermöglichen. Die Lehrkräfte erhielten anhand eines Aufgabenbeispiels Einblicke in die verschiedenen Phasen des 3D-Druckprozesses sowie deren Verknüpfungsmöglichkeiten zu den

curricularen Inhalten des Mathematikunterrichts. Zudem wurden den teilnehmenden Lehrkräften im Anschluss an die Fortbildung alle im Projekt erstellten Materialien (Theoretische Konzeptbegründungen, Unterrichtsmaterialien wie Stundenraster, Arbeitsblätter, Aufgabenvideos sowie Erklärungen; vgl. Abschnitt 9.2.5) zur Verfügung gestellt.

Die Fortbildung wurde von einer Online-Prä-Post-Follow-up-Befragung mittels der Erhebungsplattform SoSciSurvey (Leiner, 2024) begleitet. Der verwendete Fragebogen bestand dabei aus drei Teilen:

- Der erste Teil umfasste neben demographischen Fragen je ein Item zur digitalen Ausstattung der Schulen mit 3D-Druckern und zur individuellen Nutzung eines 3D-Druckers durch die jeweilige Lehrkraft (im privaten und im schulischen Kontext)²⁰.
- Im zweiten Teil wurden verschiedene psychologische Konstrukte mittels vierstufigen Likert-Skalen²¹ erfasst. Hierbei wurden die teilnehmenden Lehrkräfte zu ihrem Verhältnis zu digitalen Medien im Allgemeinen und im Mathematikunterricht (Items basierend auf BITKOM, 2015) sowie ihren *task value beliefs* zur 3D-Druck-Technologie und ihren *Selbstwirksamkeitserwartungen* zu den technologie-verknüpften Wissensbereichen *TK*, *TPK* und *TPACK* bezogen auf die Implementation der 3D-Druck-Technologie im regulären Mathematikunterricht befragt²².
- Der dritte Teil des Fragebogens bestand aus offenen Fragen zu wahrgenommenen Chancen und Herausforderungen bezüglich der Nutzung der 3D-Druck-Technologie im regulären Mathematikunterricht (für einen genaueren Überblick über die Erstellung des Fragebogens, vgl. Wulff et al., 2023a).

In der Post- und Follow-up-Befragung wurde neben dem zweiten und dritten Teil des Fragebogens zusätzlich gefragt, ob sich die Einstellungen der Lehrkräfte zur Integration der Technologie in ihrem Fachunterricht seit der Fortbildung verändert habe.

Die teilnehmenden Lehrkräfte wurden zu Beginn der Befragung gefragt, ob sie bereits die 3D-Druck-Technologie für Lerngelegenheiten in ihrem regulären Mathematikunterricht genutzt haben. Entsprechend der gegebenen Antwort (Ja/Nein) wurden die später abgefragten Skalen bezüglich der *task value beliefs* Kategorien Interesse und Nutzen sowie die Skalen zur *Selbstwirksamkeitserwartung* sprachlich angepasst. Lehrkräfte, die bereits die 3D-Druck-Technologie als Lernkontext nutzten erhielten das Item im Optativ, Lehrkräfte, die die 3D-Druck-Technologie bisher nicht eingesetzt hatten, erhielten das Item im Konjunktiv (z. B. Optativ: „Ich bin überzeugt, dass ich technische Probleme bei der Nutzung der 3D-Druck-Technologie lösen kann.“; Konjunktiv: „Ich bin überzeugt, dass ich technische Probleme bei der Nutzung der 3D-

²⁰ Mithilfe offener Fragen wurde abhängig von der Antwort bezüglich des Ausstattungsimems zusätzlich erhoben, wie häufig die befragte Lehrkraft, den (im privaten oder schulischen Kontext) zugänglichen 3D-Drucker innerhalb des letzten Monats genutzt hat.

²¹ Die Antwortmöglichkeiten der vierstufigen Likert-Skalen waren 1 = „stimme nicht zu“, 2 = „stimme eher nicht zu“, 3 = „stimme eher zu“ und 4 = „stimme zu“.

²² Zur Erhebung der psychologischen Konstrukte *task value beliefs* und *Selbstwirksamkeitserwartungen* bezüglich *TK*, *TPK* und *TPACK* wurden die von Cheng (2019) entwickelten Skalen ins deutsche bzw. dänische übersetzt und an die Rahmenbedingungen der vorliegenden Studie angepasst.

Druck-Technologie lösen könnte.“). Tabelle 9.1 liefert eine Übersicht über die genutzten Skalen mit Beispielimens.

Tabelle 9.1: Übersicht über die genutzten Skalen mit Beispielimens sowie ihrer internen Konsistenz, die mittels des Reliabilitätskoeffizienten Cronbachs Alpha (Skalen mit 3-4 Items) und Spearman Brown (Skalen mit 2 Items) angegeben wird. Dabei wird die interne Konsistenz der Skalen der Prä-Befragung der Experimentalgruppe ($n_1 = 24$) und der Vergleichsgruppe ($n_C = 166$) gemeinsam betrachtet, während die Skalen der Post-Befragung ($n_2 = 24$) und Follow-up-Befragung ($n_3 = 24$) jeweils nur von der Experimentalgruppe betrachtet werden. Bei den Skalen zu den task value beliefs Interesse und Nutzen sowie den Selbstwirksamkeitserwartung entspricht der erst angegebene Wert der internen Konsistenz der Skalen der Lehrkräfte, die bereits die 3D-Druck-Technologie als Lernkontext eingesetzt haben ($n_{Prä} = 14$, $n_{Post} = 7$, $n_{Follow-up} = 6$) und der zweite Wert der internen Konsistenz der Skalen der Lehrkräfte, die noch nicht die 3D-Druck-Technologie eingesetzt haben.

Variable und Beispielimens	Anzahl Items	Reliabilität Prä	Reliabilität Post	Reliabilität Follow-up
Digitale Ausstattung, Medienkonzept und Nutzung (Haben Sie Zugang zu einem 3D-Drucker?)	2 (+2 ²⁰)		-	
Verhältnis zu digitalen Medien (im Allgemeinen bzw. im Mathematikunterricht) (Wie stehen Sie dem Einsatz digitaler Medien im Mathematikunterricht gegenüber?)	2	0,81	0,89	0,68
Task value beliefs (Interesse) (Aus Lehrkräfteperspektive finde ich das Integrieren der 3D-Druck-Technologie in meinem Mathematikunterricht interessant.)	3	0,66 & 0,82	0,70 & 0,66	0,94 & 0,71
Task value beliefs (Wichtigkeit) (Mir ist es wichtig gut darin zu sein, die 3D-Druck-Technologie in meinem Mathematikunterricht zu integrieren.)	2	0,81	0,70	SD = 0
Task value beliefs (Nutzen) (Die 3D-Druck-Technologie ist nützlich/hilfreich im Mathematikunterricht, um Lerngelegenheiten für Schüler:innen zu verbessern.)	2	0,68 & 0,77	0,27 & 0,92	0,71 & 0,67
Selbstwirksamkeitserwartung Technological Knowledge (TK) (Ich bin überzeugt, dass ich technische Probleme bei der Nutzung der 3D-Druck-Technologie lösen kann.)	4	0,89 & 0,88	0,75 & 0,91	0,79 & 0,89
Selbstwirksamkeitserwartung Technological Pedagogical Knowledge (TPK) (Ich bin überzeugt, dass ich die 3D-Druck-Technologie verwenden kann, um das Lernen der Schüler:innen in einer Mathematikstunde zu fördern.)	4	0,84 & 0,73	0,80 & 0,92	1,00 & 0,83
Selbstwirksamkeitserwartung Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) (Ich bin überzeugt, dass ich die 3D-Druck-Technologie passend in den Mathematikunterricht und den zugehörigen Methoden integrieren kann.)	4	0,88 & 0,80	0,82 & 0,86	0,76 & 0,71

Die Reliabilitäten der in den Erhebungen genutzten Skalen sind als gut einzuschätzen (vgl. Tab. 9.1). Einzelne Abweichungen sind auf die geringe Anzahl der Lehrkräfte

zurückzuführen, die die 3D-Druck-Technologie eingesetzt haben und die Items in der Optativ-Version erhielten.

9.3.2 Stichprobe

Insgesamt haben $N = 90$ Lehrkräfte an den Fortbildungen teilgenommen²³. Die Prä-Befragung ($n_1 = 68$ Teilnehmende) wurde direkt vor der Kurz-Fortbildung im Februar und März 2023 und die Post-Befragung ($n_2 = 18$ Teilnehmende) vor den Sommerferien 2023 per E-Mail an die teilnehmenden Lehrkräfte versendet, sodass zwischen der Kurz-Fortbildung und der Post-Befragung beinahe ein Schulhalbjahr vergangen war. Um Veränderungen eines gesamten Schuljahres abzudecken, wurde zusätzlich zwischen Dezember 2023 und Juni 2024 eine Follow-Up-Erhebung ($n_3 = 19$ Teilnehmende, davon 13 Teilnehmende die sowohl an der Post- als auch an der Follow-up-Erhebung teilgenommen haben) durchgeführt. Um Prä-Post-Vergleiche betrachten zu können, wird in diesem Beitrag die Teilstichprobe von $n = 24$ Lehrkräften (10 weiblich, 14 männlich) betrachtet, die sowohl an der Prä-Befragung als auch an der Post- und/oder Follow-up-Befragung teilgenommen haben. Bei der Altersverteilung war die Kategorie *zwischen 51-60 Jahren* mit neun Lehrkräften am stärksten vertreten, gefolgt von den Kategorien *31-40* und *41-50* mit je sieben Lehrkräften. Zudem war eine befragte Lehrkraft jünger als 31 Jahre. Von den 24 Lehrkräften unterrichteten 18 an einer deutschen und sechs an einer dänischen Schule²⁴. Die meisten der befragten Lehrkräfte unterrichteten an einem Gymnasium (13 Lehrkräfte), gefolgt von Gemeinschaftsschulen ohne gymnasiale Oberstufe (sieben Lehrkräfte) und Gemeinschaftsschulen mit gymnasialer Oberstufe (vier Lehrkräfte). Zum ersten Erhebungszeitpunkt hatten die meisten Lehrkräfte eine Berufserfahrung in Vollzeitäquivalent von 19-30 Jahren (neun Lehrkräfte), gefolgt von 7-18 Jahren (sieben Lehrkräfte), sowie 0-3 bzw. 4-6 Jahre (jeweils drei Lehrkräfte). Zwei Lehrkräfte gaben eine Berufserfahrung von mehr als 30 Jahren an.

Die teilnehmenden Lehrkräfte wurden zu Beginn jedes Befragungszeitpunkts gefragt, ob sie Zugang zu einem 3D-Drucker haben. Zu dem Zeitpunkt der Prä-Befragung hatten 18 der 24 befragten Lehrkräfte in der Schule Zugriff auf einen 3D-Drucker, eine Lehrkraft hatte ausschließlich privat Zugriff auf einen 3D-Drucker und fünf Lehrkräfte hatten keinen Zugriff. Diese Verteilung ändert sich bis hin zu den zuletzt vorliegenden Daten (bei 19 Lehrkräften Daten der Follow-up-Erhebung und bei fünf Lehrkräften Daten der Post-Erhebung) nur insofern, dass die eine Lehrkraft mit ausschließlich privatem Zugriff auf einen 3D-Drucker ab der Post-Befragung zusätzlich auch im schulischen Rahmen Zugriff auf einen 3D-Drucker hatte und die 3D-Drucker an der Schule einer Lehrkraft ab der Post-Befragung nicht mehr einsatzfähig waren. Durchschnittlich nutzen die befragten Lehrkräfte zum Zeitpunkt der Prä-Befragung

²³ Die Untersuchung wurde durch die Ethikkommission des IPN Kiel hinsichtlich ethischer Bedenken und Datenschutz vor der Durchführung geprüft und genehmigt (2023_01_WU). Ebenso wurde die Untersuchung vom Ministerium für Allgemeine und Berufliche Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein vor der Durchführung geprüft und am 02.01.2023 genehmigt.

²⁴ Lehrkräfte von Minderheitenschulen, d. h. deutsche Schulen in Dänemark bzw. umgekehrt, werden hier aufgrund der kleinen Stichprobe nicht gesondert betrachtet.

den 3D-Drucker monatlich im schulischen Kontext 3,6 Mal und im privaten Kontext 2,4 Mal. Zum Zeitpunkt der letzten Erhebung (davon 19 Datensätze aus der Follow-up-Erhebung und 5 aus der Post-Erhebung) nutzten die Lehrkräfte durchschnittlich die ihnen zugänglichen 3D-Drucker monatlich im schulischen Kontext 2,8 Mal und im privaten Kontext 8,25 Mal.

9.4 Ergebnisse

9.4.1 Forschungsfrage 1: Förderung des Einsatzes der 3D-Druck-Technologie im Mathematikunterricht durch (Kurz-)Fortbildungen

Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage wurde die Integration der 3D-Druck-Technologie im regulären Mathematikunterricht abgefragt. Von den 24 Lehrkräften gaben vor der Kurz-Fortbildung zwei an, dass sie den 3D-Druck gelegentlich als Lernkontext in ihrem Mathematikunterricht einsetzen. Diese Anzahl erhöhte sich im spätesten Erhebungszeitpunkt (5 Datensätze aus der Post-Erhebung, 19 Datensätze aus der Follow-up-Erhebung) auf sieben Lehrkräfte (5 gelegentlich, 2 selten). Weitere fünf Lehrkräfte gaben zudem an, dass sie bei einer Passung von Unterrichtsinhalt und den vorliegenden Unterrichtsansätzen, die 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht verwendet hätten. Darüber hinaus waren die Rückmeldungen zum Fortbildungsangebot sehr positiv. So wurden der Lernkontextansatz und die Vermittlung des Ansatzes innerhalb der Fortbildung und auch in offenen Kommentaren in den Online-Befragungen als interessant und spannend durch die teilnehmenden Lehrkräfte wahrgenommen.

9.4.2 Forschungsfrage 2: Angleichung interner Barrieren durch (Kurz-)Fortbildungen

Zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage wurden Cluster mittels der Prä-Befragungs-Werte der teilnehmenden Lehrkräfte bzgl. des Konstrukts *SWE TPACK* ($MW = 3,09$, $SD = 0,46$) gebildet, um ein für den Einsatz digitaler Technologien im regulären Unterricht relevantes Persönlichkeits- und Interessenprofil der Lehrkräfte betrachten zu können. Nach Wozney et al. (2006) hat die *Selbstwirksamkeitserwartung* bezüglich *TPACK* einen Einfluss auf die Nutzung digitaler Technologien im Fachunterricht. Zur Gruppenbildung wurden mittels des Mittelwerts und der Standardabweichung aus der Gesamtstichprobe drei Teilstichproben gebildet, die im Folgenden verglichen werden (unterdurchschnittlich: $[0; MW - SD[$ mit $n_u = 4$, durchschnittlich: $[MW - SD; MW + SD]$ mit $n_d = 16$, überdurchschnittlich: $]MW + SD; 4]$ mit $n_{\bar{u}} = 4$). Die Gruppenaufteilung wurde auch für die weiteren Befragungszeiträume übernommen.

Da nicht alle befragten Lehrkräfte sowohl an Post- und Follow-up-Befragung teilnahmen, wurden für einen Vorher-Nachher-Vergleich der vorliegenden Daten nur die Daten aus dem Prä-Erhebungszeitraum und des jeweils spätesten Erhebungszeitpunkts (5 Datensätze des Post- und 19 Datensätze des Follow-up-Befragungszeitpunkts) betrachtet. Tabelle 9.2 gibt einen Überblick über die deskriptiven Kennwerte

des Gruppenvergleichs und Abbildung 9.1 visualisiert den deskriptiven Gruppenvergleich über die Mittelwerte.

Tabelle 9.2: Mittelwerte und Standardabweichungen der Prä-Befragung sowie der letzterhobenen Befragung (5 Post-Datensätze, 19 Follow-up-Datensätze) nach Aufteilung der Stichprobe $n = 24$ mittels des Konstrukts SWE TPACK um Gruppenvergleiche zu ermöglichen. Angabe der Mittelwerte und Standardabweichungen der Vergleichsgruppe (tvb = task value beliefs, SWE = Selbstwirksamkeitserwartung).

SWE TPACK	Vergleichsgruppe ($n_c = 166$)	Unterdurchschnittlich ($n_u = 4$)		Durchschnittlich ($n_d = 16$)		Überdurchschnittlich ($n_{\bar{u}} = 4$)	
		Prä	Post	Prä	Post	Prä	Post
SWE	2,87 (0,67)	2,38	2,94	3,09	2,92	3,81	3,31
TPACK		(0,14)	(0,75)	(0,20)	(0,44)	(0,13)	(0,55)
Verhältnis zu digitalen Medien	3,56 (0,55)	3,63	3,75	3,43	3,53	4,00	3,88
		(0,48)	(0,29)	(0,42)	(0,46)	(0,00)	(0,25)
tvb Interesse	3,32 (0,67)	3,67	3,50	3,54	3,38	3,75	3,67
		(0,38)	(0,33)	(0,44)	(0,49)	(0,50)	(0,47)
tvb Wichtigkeit	2,83 (0,98)	2,13	2,25	3,50	3,40	3,50	3,00
		(0,88)	(0,96)	(0,73)	(0,54)	(0,58)	(0,82)
tvb Nutzen	3,10 (0,73)	2,88	3,25	3,56	3,13	3,38	3,13
		(0,25)	(0,65)	(0,44)	(0,76)	(0,48)	(0,63)
SWE TK	3,03 (0,70)	2,56	3,31	3,05	3,00	3,88	3,69
		(0,80)	(0,38)	(0,38)	(0,70)	(0,25)	(0,47)
SWE TPK	3,06 (0,63)	2,33	3,25	3,13	3,08	3,80	3,69
		(0,58)	(0,46)	(0,23)	(0,41)	(0,25)	(0,47)

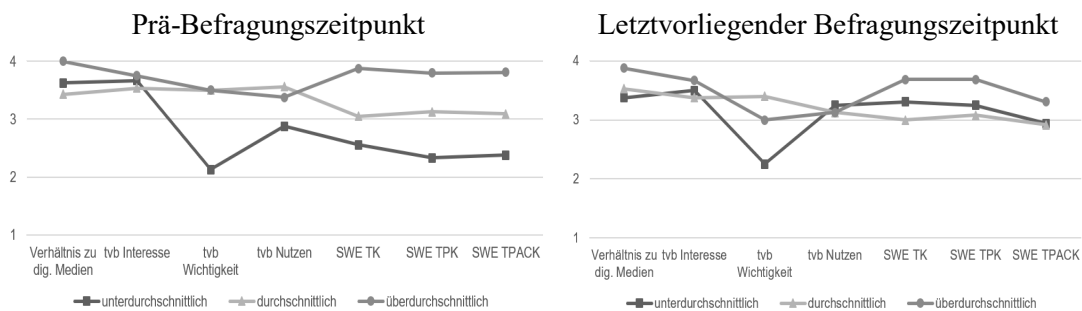


Abbildung 9.1: Mittelwerte der Prä-Befragung sowie der letzterhobenen Befragung (5 Post-Datensätze, 19 Follow-up-Datensätze) der unterdurchschnittlichen Gruppe ($[0; MW - SD[$ mit $n_u = 4$), der durchschnittlichen Gruppe ($[MW - SD; MW + SD]$ mit $n_d = 16$) und der überdurchschnittlichen Gruppe ($[MW + SD; 4]$ mit $n_{\bar{u}} = 4$).

Um die vorliegenden deskriptiven Werte in Relation setzen zu können, sind zudem die deskriptiven Werte von $n_c = 166$ Lehrkräften angegeben, die ebenfalls im Rahmen des Forschungsprojekts als Rahmenbedingungsstudie für den Einsatz der 3D-Druck-Technologie im regulären Mathematikunterricht erhoben wurden (vgl. Wulff et al.,

2023a)²⁵. Für den Vergleich von Prä- und Post/Follow-up-Daten innerhalb der gebildeten Gruppen wurde der Wilcoxon Rank Test (Wilcoxon, 1945) als nicht-parametrisches Testverfahren verwendet, da bei den kleinen Stichprobengrößen keine Normalverteilung angenommen werden kann. Innerhalb der unterdurchschnittlichen Gruppe nahm die *Selbstwirksamkeitserwartung* bzgl. *TK* tendenziell mit einem großen Effekt zu ($W(4) = 6$, $p = .091$, $|r| = 1$). Innerhalb der durchschnittlichen Gruppe nahm die *Selbstwirksamkeitserwartung* bzgl. *TPACK* ebenfalls mit einem großen Effekt tendenziell ab ($W(16) = 18$, $p = .055$, $|r| = .526$). Darüber hinaus konnten mittels eines Kruskal-Wallis-Tests zum Prä-Erhebungszeitpunkt Gruppenunterschiede bezüglich der sechs Konstrukte *Verhältnis zu digitalen Medien*, *tvb Wichtigkeit* und *Nutzen*, *SWE TK*, *TPK* und *TPACK* und im letztvorliegenden Erhebungszeitpunkt bezüglich des Konstrukts *tvb Wichtigkeit* festgestellt werden (vgl. Tab. 9.3).

Tabelle 9.3: Vorher-Nachher-Gruppenvergleich über die Prä- sowie 5 Post und 19 Follow-up-Datensätze der Lehrkräfte, die an den Fortbildungen teilnahmen mittels Kruskal-Wallis-Tests. (** $p < .001$, * $p < .01$, * $p < .05$, # $p < .10$, *tvb* = task value beliefs, *SWE* = Selbstwirksamkeitserwartung)

$n = 24$	X^2	p	ε^2
Prä-Befragungs-Zeitpunkt			
<i>Verhältnis zu digitalen Medien</i>	5,73 [#]	.057	0,26
<i>tvb Wichtigkeit</i>	7,25*	.027	0,32
<i>tvb Nutzen</i>	6,41*	.041	0,28
<i>SWE TK</i>	9,87**	.007	0,43
<i>SWE TPK</i>	12,9**	.002	0,61
<i>SWE TPACK</i>	17,33***	< .001	0,75
Letztvorliegender Befragungs-Zeitpunkt			
<i>Verhältnis zu digitalen Medien</i>	2,20	.334	0,10
<i>tvb Wichtigkeit</i>	5,48 [#]	.065	0,25
<i>tvb Nutzen</i>	0,13	.939	0,01
<i>SWE TK</i>	3,89	.143	0,17
<i>SWE TPK</i>	1,42	.491	0,06
<i>SWE TPACK</i>	4,57	.102	0,21

9.5 Diskussion und Implikationen

Im Rahmen der sich ständig wandelnden digitalisierten Welt ist die Vorbereitung der Schüler:innen auf einen reflektierten Umgang mit digitalen Technologien aber auch auf die Nutzung dieser in späteren beruflichen Kontexten ein zentraler Aspekt, der in dem regulären Fachunterricht an allgemeinbildenden Schulen berücksichtigt werden sollte. Für die Implementation von Lerngelegenheiten mit digitalen Technologien als festen Bestandteil des Fachunterrichts spielen externe und interne Barrieren eine zentrale Rolle (Ertmer, 1999). Da Schulen zunehmend digitaler und mit mehr

²⁵ Innerhalb der Rahmenbedingungsstudie (Wulff et al., 2023a) wurde u. a. der in diesem Beitrag vorgestellte Fragebogen ebenfalls eingesetzt. Es handelte sich jedoch um eine einmalige Befragung von $N = 166$ Lehrkräften.

Supportstrukturen ausgestattet sind (Eickelmann et al., 2019; Yotyoding & Lorenz, 2022), werden externe Barrieren schrittweise abgebaut. Die internen Barrieren hingegen beziehen sich auf Einstellungen, Wissen und Kompetenzen der Lehrkräfte und nehmen Einfluss auf die Unterrichtsplanung, -durchführung und -nachbereitung (Ertmer, 1999; Ertmer et al., 2012; Hew & Brush, 2007; Ostermann et al., 2022) und sind folglich von zentraler Bedeutung. Da Zeit im Rahmen von Lehrtätigkeiten häufig ein eingeschränkt verfügbares Gut ist, werden u. a. auch Kurz-Fortbildungen (bspw. als gegenseitiger Austausch im Kollegium mit oder ohne externen Input; vgl. Buhl et al., 2021) eingesetzt.

Ziel des vorliegenden Beitrags ist es, den Einsatz und die Auseinandersetzung von Lehrkräften mit digitalen Technologien im regulären Mathematikunterricht am Beispiel der 3D-Druck-Technologie sowie den Effekt einer (Kurz-)Fortbildung auf den Einsatz und interne Barrieren zu untersuchen. Bezogen auf den vorliegenden Forschungskontext weisen die Daten darauf hin, dass bereits die Teilnahme an einer kurzen Fortbildung inklusive Bereitstellung von entsprechenden Materialien zur weitergehenden individuellen Auseinandersetzung und zum Einsatz im Unterricht bei Lehrkräften mit ungünstigeren Voraussetzungen zu einer positiven Entwicklung interner Barrieren führt (vgl. Tab. 9.3). Die deskriptiven Daten weisen die Tendenz auf, dass die (Kurz-)Fortbildungen und Bereitstellung der Materialien einen positiven Effekt sowohl bezüglich der *task value beliefs* als auch der erhobenen *Selbstwirksamkeitserwartungen* der Gruppe an Lehrkräften mit unterdurchschnittlicher Ausprägung der *Selbstwirksamkeitserwartung* bzgl. *TPACK* hatten (vgl. Tab. 9.2). Darüber hinaus weisen die Daten darauf hin, dass auch die Lehrkräfte, die bereits vor der Teilnahme an der Kurz-Fortbildung hohe Ausprägungen in den untersuchten Konstrukten aufwiesen, auch nach der Auseinandersetzung mit der 3D-Druck-Technologie und der Konfrontation mit den Herausforderungen der praktischen Umsetzung ihre hohen Werte und somit ihre positive Einstellung gegenüber der Einbindung der Technologie als Lernkontext im Mathematikunterricht beibehielten (vgl. Tab. 9.2).

Im Rahmen des Education Design Research Projekts (vgl. Wulff et al., 2023b) lassen die Resultate zudem darauf schließen, dass die im Forschungsprojekt entwickelten Unterrichtskonzepte, die den 3D-Druck als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht implementieren sowie zugehörige Materialien (u. a. Vorschläge für Stundenraster, Aufgabenblätter, Erklärungen und Aufgabenvideos) auf Zustimmung und Akzeptanz bei den befragten Lehrkräften stoßen. Das grundlegende Ziel des übergeordneten Forschungsprojektes war es, einsetzbare Unterrichtskonzepte zu erstellen, die Aspekte des 3D-Drucks als Vehikel zum Mathematiklernen nutzen, um neben der Förderung fachlicher und digitaler Kompetenzen bei Schüler:innen auch die Berufsorientierung und -vorbereitung in den regulären Unterricht einzugliedern. Nach der Teilnahme an den Kurz-Fortbildungen setzten mehr Lehrkräfte die 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht zu ausgewählten curricularen Lerninhalten ein. Dabei war nicht vorgesehen, dass der Mathematikunterricht nur noch auf der 3D-Druck-Technologie basiert, sondern dass diese bei einer Passung des Unterrichtsinhalts genutzt werden kann.

Die Bedeutung digitaler Medien und Technologien hat in den letzten Jahrzehnten stetig zugenommen, so dass eine frühzeitige (kritische) Auseinandersetzung mit und Nutzung von digitalen Medien und Technologien in der heutigen und zukünftigen Gesellschaft von zentraler Bedeutung ist. Damit die digitale Bildung der Schüler:innen erfolgreich durchgeführt werden kann, ist eine Vorbereitung der Lehrpersonen hinsichtlich dieser Aufgabe zentral. Die Verankerung digitaler Medien und Technologien in der Lehrkräfteausbildung ist dabei zwar wichtig, sodass zukünftige Lehrkräfte frühzeitig mit Einbindungsmöglichkeiten konfrontiert werden, aufgrund der zeitlichen Ausdehnung der Lehrtätigkeit kann jedoch Angeboten zur Fortbildung von Lehrkräften eine entsprechend höhere Relevanz zugeordnet werden. Aus den in Abschnitt 9.4 beschriebenen Ergebnissen lässt sich auf Basis des Evaluationsmodells für Fortbildungen nach Kirkpatrick (1959, 1960) ableiten, dass (Kurz-)Fortbildungen (hier am Beispiel der 3D-Druck-Technologie) die teilnehmenden Lehrkräfte grundsätzlich auf einen Einsatz von Technologien im regulären Fachunterricht erfolgreich vorbereiten kann. Mittels der vorliegenden Daten können Aussagen bezüglich drei der vier Level erfolgreicher Fortbildungen getroffen werden:

- Level 1 (*Reaction*): Das Feedback der teilnehmenden Lehrkräfte sowohl zum Angebot der (Kurz-)Fortbildungen als auch zur Durchführung während der Fortbildungen war positiv. Darüber hinaus wurde auch in den offenen Kommentarfeldern der Befragungen sich positiv bezüglich der Fortbildungsteilnahme ausgesprochen.
- Level 2 (*Learning*): Aus den beschriebenen Ergebnissen lässt sich eine Veränderung bei den Lehrkräften bei verschiedenen Konstrukten sehen. So profitieren insbesondere Lehrkräfte mit ungünstigeren Voraussetzungen von der Teilnahme an der (Kurz-)Fortbildung.
- Level 3 (*Behavior*): Aus den beschriebenen Ergebnissen der Post- und Follow-up-Erhebung lässt sich eine häufigere Nutzung des 3D-Drucks als Lernkontext im Mathematikunterricht der teilnehmenden Lehrkräfte feststellen.
- Level 4 (*Results*): Zu dieser Ebene wurden in der vorgestellten Studie keine Daten erhoben. Angestrebt wird, dass die Nutzung der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht keinen negativen Einfluss auf das Mathematiklernen der Schüler:innen nimmt, die Schüler:innen aber gleichzeitig Einblicke in die Nutzung der 3D-Druck-Technologie in der digitalen Arbeitswelt erhalten. Dass das Unterrichtskonzept grundsätzlich funktioniert, wird in Wulff et al. (2023b, c) berichtet.

Auf Basis dieser Resultate kann der Einsatz von (Kurz-)Fortbildungen als sinnvoll angesehen werden. Anzumerken ist dabei, dass die Fortbildung einen sehr engen Bereich adressiert hat und mit fertig einsetzbarem Material (theoretische und fachdidaktische Begründungen der Unterrichtskonzepte, Stundenraster, Aufgabenblätter, Aufgabenvideos, druckbare Modelle zur Nutzung im Mathematikunterricht sowie Präsentationen und Videos zur Relevanz der 3D-Druck-Technologie in der digitalen Arbeitswelt) begleitet wurde. Es ging also nicht um komplexe Inhalte, sondern eher um eine

Anleitung, so dass eine Kombination aus Informationen, eigenständiger technischer Erprobung und einsetzbares Material ausreichte. Es bedarf an dieser Stelle Replikationsstudien, die in analoger Form ein Augenmerk auf die Förderung des Einsatzes von Technologien im regulären Fachunterricht legen.

Limitationen

Bei der berichteten Interpretation der Ergebnisse sind verschiedene Limitationen zu betrachten. So ist zu berücksichtigen, dass es innerhalb der Prä-Post-Follow-up-Messzeitpunkte eine hohe Stichprobenmortalität gibt. So hatten insgesamt 90 Lehrkräfte an den Fortbildungen teilgenommen, von denen für die Auswertung nur 24 Datensätze für einen tatsächlichen Prä-Post-/Follow-up-Vergleich verwendet werden konnten. Darüber hinaus ist zu beachten, dass eine Teilnahme an den Fortbildungen für Lehrkräfte freiwillig war und vermutlich eine selektive Stichprobe von interessierten Lehrkräften an den Fortbildungen und somit insbesondere an der Befragung teilgenommen hat. Es ist jedoch anzumerken, dass die Selektivität für die Beantwortung der ersten Forschungsfrage erwartet wurde. Bei der Betrachtung der Resultate ist ebenfalls zu bedenken, dass keine objektiv gemachten Beobachtungen der Lehrkräftekompetenzen oder des Einsatzes der 3D-Druck-Technologie im Mathematikunterricht durchgeführt wurden. Diese wurden auf Basis von Selbsteinschätzungen der Lehrkräfte bezüglich ihrer Einstellungen und ihres Unterrichts diskutiert. Nach Bauer und Kenton (2005) sind diese zwar von höherer Relevanz für die Nutzung(sintention) der Lehrkräfte als die Kompetenzausprägung, jedoch lassen sich auf Basis von Selbsteinschätzungen nur Annahmen bezüglich des Erreichens des dritten Niveaus der erfolgreichen Fortbildungen treffen. Darüber hinaus sind Überschneidungen zwischen der Vergleichs- und der Fortbildungsgruppe nicht auszuschließen, da beide im selben Gebiet (Schleswig-Holstein und Süd-Dänemark) zu unterschiedlichen Zeiten durchgeführt wurden und es aufgrund der Anonymisierung keine Möglichkeit eines Abgleichs gab. Aufgrund der Größe der Vergleichsgruppe wird hier aber kein zu starker Einfluss einer Überschneidung erwartet.

9.6 Fazit

Ziel dieses Beitrages war es, die Nutzung von digitalen Technologien (hier am Beispiel des 3D-Drucks) im regulären Fachunterricht (hier am Beispiel des Mathematikunterrichts) sowie den Einfluss von (Kurz-)Fortbildungen auf das Nutzungsverhalten und interne Barrieren für eine Technologienutzung zu untersuchen. In vorherigen Studien des Projektkontexts wurden bereits zentrale Aspekte der internen Barrieren für eine Einbindung digitaler Technologien in den regulären Fachunterricht herausgearbeitet. Die vorliegenden Ergebnisse weisen darauf hin, dass (Kurz-)Fortbildungen mit der zusätzlichen Bereitstellung von Unterrichtsmaterialien bereits zu einer Steigerung der Nutzung der 3D-Druck-Technologie im regulären Mathematikunterricht führen. Darüber hinaus weisen die berichteten Resultate darauf hin, dass die (Kurz-)Fortbildungen insbesondere einen positiven Effekt für Lehrkräfte mit unterdurchschnittlicher Ausprägung der *Selbstwirksamkeitserwartung* bzgl. *TPACK* haben und dass sie sich in ihren Ausprägungen interner Barrieren nach der (Kurz-)Fortbildung und potentieller

individueller Auseinandersetzung mit den Materialien den Lehrkräftegruppen mit günstigen Voraussetzungen anpassen, sowie dass die Lehrkräftegruppen mit günstigeren Voraussetzungen auch nach der Auseinandersetzung mit der Einbindung der 3D-Druck-Technologie in den regulären Mathematikunterricht sowie der damit auftretenden Herausforderungen ihre positive Einstellungen beibehalten. Damit liefert der vorliegende Beitrag Hinweise für (Kurz-)Fortbildungen zur angeleiteten Nutzung von digitalen Technologien im regulären Fachunterricht, deren Zeitansatz sich durch die individuelle Beschäftigung mit direkt nutzbaren Materialien gering gehalten werden kann.

10 DISKUSSION UND IMPLIKATIONEN

Gegenstand dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung effektiver und praxistauglicher Unterrichtskonzepte für den regulären Mathematikunterricht, die eine digitale Technologie authentisch als Lernkontext nutzen, um mathematische und digitale Kompetenzen von Schüler:innen zu fördern sowie Möglichkeiten zur Berufsorientierung und -vorbereitung für die digitale Arbeitswelt bereitzustellen. Aufgrund ihrer derzeitigen und zukünftigen Relevanz für den digitalen Arbeitsmarkt sowie ihrer verschiedenen, vielfältigen Anwendungsbereiche und dem mathematischen Hintergrund ihrer Teilprozesse wurde exemplarisch die 3D-Druck-Technologie ausgewählt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der vorgestellten Studien dieser Arbeit zusammengefasst und gemeinsam diskutiert. Anschließend wird auf Implikationen für die Bildungspraxis, insbesondere in Form von Designprinzipien (vgl. Abschnitt 2.4), eingegangen und Limitationen bezogen auf den Forschungsansatz dargelegt.

10.1 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Entsprechend der Strukturierung der Arbeit wird bei der Zusammenfassung zunächst auf die Rahmenbedingungen der verschiedenen Akteure eingegangen und anschließend auf den Designprozess der Unterrichtskonzepte sowie die entsprechenden Evaluierungen und die abschließende Disseminationsphase der Unterrichtskonzepte im Rahmen von (Kurz-)Fortbildungen eingegangen.

10.1.1 Rahmenbedingungen von Industrie und Schule

Damit die 3D-Druck-Technologie zwar didaktisch reduziert, aber authentisch in den regulären Mathematikunterricht eingebunden werden kann, müssen zunächst die Rahmenbedingungen ihres Einsatzes in der digitalen Arbeitswelt sowie in der Schule dargelegt werden. Hierfür wurden zwei Studien durchgeführt, die in den Kapiteln 4 und 5 dargestellt wurden.

Aufgrund des wachsenden Fachkräftemangels in vielen Bereichen der Arbeitswelt, nimmt die Rolle authentischer Möglichkeiten zur Berufsorientierung und -vorbereitung eine zunehmend zentral werdende Rolle ein (KMK, 2017a; SWK, 2022). Damit solche Lerngelegenheiten einen vorbereitenden Charakter innehaben und zielführend sind, anstatt Fehlvorstellungen aufzubauen, sollte die Perspektive der Arbeitswelt (Unternehmen) einbezogen werden. Auf Basis von leitfadengestützten Interviews mit Industrievertreter:innen in der Rahmenbedingungsstudie der digitalen Arbeitswelt (vgl. Kapitel 4) kann dargestellt werden, welches Wissen und welche Fertigkeiten von Schulabsolvent:innen beim Übergang in Berufe erwartet werden, die im professionellen Alltag die 3D-Druck-Technologie nutzen. So werden von (zukünftigen)

Diskussion und Implikationen

Arbeitnehmer:innen Programmier- und Softwarekenntnisse, Wissen über Möglichkeiten und Limitationen, der Umgang mit dem Drucker und weitere Hardwarekenntnisse sowie ein mathematisches Vorwissen zu relevanten Aspekten der Technik, eine (technische) Affinität, branchenspezifisches Wissen und Materialkenntnisse erwartet (vgl. Tab. 4.1 in Abschnitt 4.4). Selbstverständlich kann die Förderung dieser Wissensbereiche nicht als Teil der Allgemeinbildung in den Fachunterricht aufgenommen werden, jedoch können die dargestellten Wissensbereiche Anknüpfungspunkte liefern, um Schüler:innen mit der 3D-Druck-Technologie an sich, ihren Möglichkeiten und Grenzen sowie ihren Anwendungsgebieten vertraut zu machen. Mittels des Lernkontext-Ansatzes (vgl. Abschnitt 2.3) kann dieser Kontakt im Rahmen des regulären Fachunterrichts als Vehikel für fachliches Lernen ermöglicht werden und dazu dienen, das Interesse der Schüler:innen an der Technologie bzw. Berufen, in denen die Technologie genutzt wird, zu stärken sowie erste Druckerfahrungen zu ermöglichen (vgl. Tab. 4.2 in Abschnitt 4.4). Die Studie liefert damit wichtige Ansätze für Aspekte, die in der Erstellung der Unterrichtskonzepte bedacht werden müssen, um authentische Erfahrungs- und Lernmöglichkeiten zu der 3D-Druck-Technologie auf dem digitalen Arbeitsmarkt im regulären Schulunterricht zu erstellen.

Nach Ertmer (1999) existieren interne (z. B. Einstellungen der Lehrkraft zum Lehren und Lernen) und externe Barrieren (z. B. Ausstattung der Schule) für die Nutzung digitaler Technologien im Schulkontext: Aufgrund der zunehmenden Digitalisierung von Schulen in Deutschland (vgl. u. a. Eickelmann et al., 2019) sowie der Verankerung digitaler Technologien in der ersten Phase der Lehramtsausbildung (vgl. u. a. Ackeren et al., 2019), können externe Barrieren zwar als *temporär* relevant angesehen werden, die internen Barrieren stellen jedoch die „biggest enablers“ (Ertmer et al., 2012) des Implementationsprozesses dar. Um neue Unterrichtskonzepte im regulären Mathematikunterricht implementieren zu können, spielen Lehrkräfte eine entscheidende Rolle, da sie den Unterricht planen, durchführen und nachbereiten. Dementsprechend wurden in einer weiteren Studie dieser Arbeit die Rahmenbedingungen der Schule mit Blick auf die Lehrkräfte als zentrale Akteure des Implementationsprozesses neuer Unterrichtsansätze betrachtet (vgl. Kapitel 5). Auf Basis eines Online-Fragebogens wurden Gelingensbedingungen für eine Nutzung der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im Mathematikunterricht hinsichtlich der internen Barrieren (vgl. Ertmer, 1999) von Lehrkräften erhoben. In der Betrachtung von schulischen Gelingensbedingungen neuer Unterrichtsansätze müssen externe Barrieren betrachtet werden. Da insbesondere der digitale Ausstattungsgrad der Schulen schrittweise zunimmt (Eickelmann et al., 2019; Yotyodying & Lorenz, 2022), sind aber die internen Barrieren von Lehrkräften von zentraler Bedeutung in der Einbindung von neuen Unterrichtsansätzen. In der Rahmenbedingungsstudie der Schule wurden 166 Lehrkräfte hinsichtlich ihrer schulischen Ausstattung mit 3D-Druckern, ihrer Nutzungsintention der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext sowie hinsichtlich verschiedener psychologischer Konstrukte befragt, die einen Einfluss auf die Nutzung digitaler Technologien im Fachunterricht haben (vgl. Abschnitt 2.2.4). Die Daten weisen im Einklang mit vorhergehender Forschung (Wozney et al., 2006; Bauer & Kenton, 2005; Wigfield & Eccles, 1992) auf

einen positiven Zusammenhang zwischen der Intention der Lehrkräfte, die 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im Mathematikunterricht zu nutzen, und ihren *Selbstwirksamkeitserwartungen* bzgl. der Wissensbereiche *TPK* und *TPACK* sowie ihren *task value beliefs* bzgl. der Implementation der Technologie hin (vgl. Tab. 5.3 in Abschnitt 5.4). Dementsprechend ist die Förderung dieser Bereiche bei Lehrkräften für eine erfolgreiche Integration der geplanten Unterrichtsansätze von zentraler Bedeutung. Diese Erkenntnis ist im Sinne einer Nachhaltigkeit der Implementation für die Dissemination der Unterrichtskonzepte wichtig, da die Lehrkräfte in der Entwicklung ihrer *Selbstwirksamkeitserwartungen* sowie ihrer *task value beliefs* unterstützt werden sollten (vgl. Abschnitt 2.2.4 und Kapitel 5).

10.1.2 Entwicklung der Unterrichtskonzepte

Auf Basis der erhobenen Rahmen- und Gelingensbedingungen wurde dem Educational Design Research folgend (vgl. Plomp & Nieveen, 2013) ein prototypisches Unterrichtskonzept zum Lerninhalt „Zusammengesetzte Körper“ entwickelt und mittels iterativer Zyklen evaluiert sowie optimiert. Dafür wurden zunächst mathematische Inhalte, die grundlegend für die Prozesse des 3D-Drucks sind sowie ihre Verknüpfungspunkte zu dem mathematischen Fachcurriculum herausgearbeitet. Die Foki der Evaluierungszyklen wurden anschließend so gewählt, dass sie die theoretische und praktische Umsetzbarkeit des endgültigen Unterrichtskonzepts sichern. Des Weiteren sollte sichergestellt werden, dass die 3D-Druck-Technologie authentisch eingesetzt wird und der Lernkontext der 3D-Druck-Technologie sich (a) positiv auf das *3D-Druck-bezogene* und *mathematische Selbstkonzept*, (b) positiv auf die fokussierten digitalen Kompetenzen und (c) nicht negativ auf das mathematische Lernen der Schüler:innen auswirkt. In der Umsetzung der Evaluierungszyklen wurden relevante Akteure der Umsetzung (hier: Industrievertreter:innen, Lehrkräfte und Schüler:innen) beteiligt, so dass folgende Foki mit entsprechenden Akteuren evaluiert wurden:

- 1. Zyklus:** Formative Evaluierung der theoretischen Umsetzbarkeit und Akzeptanz für den regulären Mathematikunterricht mit $N = 10$ Lehrkräften.
- 2. Zyklus:** Formative Evaluierung der Authentizität des Einsatzes der 3D-Druck-Technologie sowie der erwarteten zu fördernden Handlungskompetenzen von Schüler:innen mit $N = 3$ Industrievertreter:innen.
- 3. Zyklus:** Erste praktische formative Evaluierung der Umsetzbarkeit im Kontext Schule mit Hilfe einer Mathematiklehrkraft und einer Schulklasse.
- 4. Zyklus:** Pilotierung der summativen Mehrwerts-Evaluierung hinsichtlich verschiedener psychologischer Konstrukte im Laborkontext mit Hilfe zweier drei-tägiger Workshops mit $N = 16$ Schüler:innen.
- 5. Zyklus:** Summative Mehrwerts-Evaluierung im Feld mit zusätzlich drei bzw. vier mathematischen Kompetenzaufgaben mit $N = 137$ Schüler:innen.

Diskussion und Implikationen

Mittels der ersten drei Zyklen wurde das erstellte Unterrichtskonzept formativ mit Hilfe relevanter Akteure evaluiert und angepasst, während der vierte Zyklus als Vorbereitung der summativen Evaluierung des fünften Zyklus diente. Zusammengefasst deuten die in den fünf Evaluierungszyklen erhobenen Indikatoren darauf hin, dass der im Forschungsprojekt entwickelte Ansatz zur Einbindung der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext in den regulären Mathematikunterricht praxistauglich und effektiv ist. So konnte gezeigt werden, dass Lehrkräfte den Ansatz akzeptieren und ihn als praktisch durchführbar ansehen (1. Zyklus). Darüber hinaus wird der 3D-Druck in der Unterrichtseinheit und den -materialien in einer authentischen Weise eingesetzt, die von der Industrie als effektive Vorbereitung zukünftiger Arbeitnehmer:innen wahrgenommen wird (2. Zyklus). Ebenso ist das Unterrichtskonzept praktisch in den regulären Mathematikunterricht integrierbar und von Lehrkräften umsetzbar (3. Zyklus). Im Rahmen der letzten zwei Zyklen weisen die erhobenen Daten darauf hin, dass die Schüler:innen mit Hilfe der entwickelten Unterrichtseinheit Erfahrungen mit der 3D-Druck-Technologie sammeln und eine positive Einstellung gegenüber der Technologie entwickeln konnten, ohne dabei das Lernen zentraler mathematischer Inhalte zu vernachlässigen. Demzufolge kann ein Mathematikunterricht, der die 3D-Druck-Technologie als Lernkontext bei einer Passung zum curricularen mathematischen Lerninhalt implementiert, dazu beitragen, dass Schüler:innen unter gleicher Fokussierung des mathematischen Lerngegenstands frühzeitig und regelmäßig mit Aspekten der digitalen Arbeitswelt in Berührung kommen. Folglich wurden im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit zur Beantwortung der übergreifenden Forschungsfrage (vgl. Abschnitt 2.3) Unterrichtskonzepte entwickelt, mittels derer Schüler:innen im regulären Mathematikunterricht einen mathematischen Inhalt lernen, ihre digitalen Kompetenzen fördern sowie sich mit dem 3D-Druck als exemplarische relevante digitale Technologie des (zukünftigen) Arbeitsmarktes auseinandersetzen.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden weitere Unterrichtskonzepte entwickelt, die für die Thematisierung weiterer mathematischer curricularer Lerninhalte (vgl. Abschnitt 6.1) im regulären Fachunterricht mittels der Nutzung der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext verwendet werden können. Die erstellten Unterrichtskonzepte und -materialien (u. a. Stundenraster und Arbeitsblätter) wurden sowohl über die Projekthomepage des DiASper-Projekts (<https://2023.diasper-project.eu/>) als auch über eine Open Educational Resources Plattform (<https://oer.uni-kiel.de/>) für Lehrkräfte kostenlos zugänglich gemacht. Letztere ermöglicht den nutzenden Lehrkräften die Weiterentwicklung der bereitgestellten Materialien, indem neue Versionen, die beispielsweise Kommentare zur Durchführung oder erstellte Differenzierungen und Hilfskonstruktionen enthalten, geteilt werden können. Darüber hinaus wurden Anleitungen für die Verwendung der Materialien und für die Nutzung der 3D-Druck-Technologie veröffentlicht. Hierdurch können Lehrkräfte unterstützt werden, die einen Einsatz der 3D-Druck-Technologie (als Lernkontext) im regulären Fachunterricht planen.

10.1.3 Dissemination der Unterrichtskonzepte

Um Lehrkräfte auf eine Nutzung der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht vorzubereiten, wurden nach der Erstellung der

Unterrichtskonzepte kurze Lehrkräftefortbildungen im Rahmen des Forschungsprojekts angeboten. Innerhalb der Kurz-Fortbildungen wurde den teilnehmenden Lehrkräften der entwickelte Unterrichtsansatz sowie eine Auswahl von Unterrichtskonzepten beispielhaft vorgestellt. Im Anschluss wurden mittels verschiedener Aufgabenkontexte aus den Unterrichtskonzepten die vier zugrundeliegenden 3D-Druck-Prozesse erläutert (vgl. Abschnitt 2.1.2), so dass die teilnehmenden Lehrkräfte einen ersten Zugang zur Nutzung der Technologie erhalten konnten. Im Anschluss an die Fortbildung erhielten alle teilnehmenden Lehrkräfte die im Forschungsprojekt entwickelten Materialien (theoretische und praktische Unterrichtskonzepte mit Vorschlägen für Stundenraster und Arbeitsblätter sowie weitere Unterstützung für einen Einsatz der Unterrichtskonzepte wie Modelle für den 3D-Druck und Aufgabenvideos).

Mittels einer Prä-Post-Follow-up-Erhebung wurden die Einstellungen von $n = 24$ Lehrkräften bezüglich des Einsatzes der 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht untersucht. Nach Ertmer (1999) können externe und interne Barrieren für den Einsatz digitaler Technologien im Fachunterricht betrachtet werden, wobei die externen Barrieren aufgrund der zunehmenden Digitalisierung sowie Verankerung digitaler Medien und Technologien im Alltag und in der Lehrkräftebildung (vgl. u. a. Eickelmann et al., 2019; Ackeren et al., 2019; Ertmer et al., 2012) im vorliegenden Forschungsprojekt weniger betrachtet wurden. Dementsprechend wurden die internen Barrieren (z. B. Einstellungen der Lehrkraft) als relevanter Faktor des Einsatzes von Technologien im Fachunterricht fokussiert. Die erhobenen Daten weisen darauf hin, dass bereits eine Kurzfortbildung mit anschließender Bereitstellung von einsetzbaren Materialien bei Lehrkräften mit einer ungünstigeren *Selbstwirksamkeitserwartung* für ihr *TPACK* zu dem Abbau interner Barrieren für den Einsatz digitaler Technologien im regulären Mathematikunterricht führt.

Darüber hinaus weisen die Ergebnisse der Untersuchung darauf hin, dass die mittels des Educational Design Research entwickelten Unterrichtskonzepte auch breiter gefasst auf Akzeptanz stoßen und bei einer Passung des Lerninhalts im regulären Mathematikunterricht eingesetzt werden können. Dieser Einsatz wird insbesondere dadurch unterstützt, dass an den Schulen nicht notwendigerweise ein 3D-Drucker zur Durchführung der Unterrichtskonzepte vorhanden sein muss.

10.2 Implikationen für die Forschung

Wie in Kapitel 9 und Abschnitt 2.4 bereits skizziert wurde, ergeben sich verschiedene Implikationen für zukünftige Forschung. Einerseits bieten die Resultate Anknüpfungspunkte für die weitere Forschung zur Wirkung von Kurz-Fortbildungen und andererseits liefern die aus den Evaluierungszyklen abgeleiteten Designprinzipien, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden, Hinweise dafür, wie weitere curriculare Inhalte mit der 3D-Druck-Technologie bzw. wie auch andere digitale Technologien mit curricularen Inhalten im regulären Schulunterricht verknüpft werden können.

10.2.1 Lehrkräftefortbildungen

Im Rahmen der Untersuchung der durchgeführten Lehrkräftefortbildungen weisen die Ergebnisse darauf hin, dass bereits kurze Fortbildungen insbesondere Lehrkräften

Diskussion und Implikationen

zugutekommen, die eine geringere *Selbstwirksamkeitserwartung* bezüglich ihres technologischen Wissens haben. Dies ist zwar nicht in Übereinstimmung mit dem Merkmal guter Fortbildungen bezogen auf die angemessene Fortbildungsdauer (Lipowsky, 2009, 2021), sollte jedoch in zukünftiger Forschung weiter beobachtet werden, da einerseits alle weiteren von Lipowsky (2009, 2021) definierten Merkmale in der Planung der Kurzfortbildung berücksichtigt wurden und es sich andererseits um eine praktisch-orientierte Lehrkräftefortbildung handelte mit dem Ziel technisches Wissen (als interne Barriere) zu adressieren. Hierfür spricht ebenfalls, dass trotz der Fortbildungskürze im Rahmen der begleitenden Prä-Post-Follow-up-Untersuchung die erhobenen Daten auf Basis des Evaluationsmodells nach Kirkpatrick (1959, 1960) auf einen Erfolg der Fortbildungsteilnahme bis zur dritten Stufe (*Behavior*) hinweisen. So ist es möglich, dass die Teilnahme an einer Kurzfortbildung, die ausschließlich einen ersten vorstellenden und erläuternden Kontakt bietet, attraktiver für Lehrkräfte ohne tiefergehendes bestehendes Vorwissen wirkt. Dementsprechend könnte untersucht werden, ob mittels Kurzfortbildungen mehr Lehrkräfte erreicht werden, da (a) der zu erbringende Zeiteinsatz geringer ist und (b) mittels des Zeiteinsatzes der Fortbildung verdeutlicht wird, dass Lehrkräfte mit geringerer Ausprägung des Vorwissens ebenfalls adressiert werden, da in der vorgegebenen zeitlichen Kürze nicht auf Details eingegangen wird. Ebenso wurde bereits in der Information zur Fortbildung darauf hingewiesen, dass entwickelte Materialien zum Einsatz im regulären Unterricht innerhalb der Fortbildung vorgestellt und im Anschluss bereitgestellt werden. Folglich war den teilnehmenden Lehrkräften von Beginn an bekannt, dass die Fortbildung eine einleitende und erläuternde Funktion zum Umgang mit und der eigenständigen individuellen Auseinandersetzung mit den Unterrichtskonzepten sowie ihrem individuellen Einsatz im regulären Mathematikunterricht einnimmt.

10.2.2 Designprinzipien

Um eine Vergleichbarkeit der Rahmenbedingungen für den Einsatz der Unterrichtskonzepte an verschiedenen Schulen in verschiedenen Lerngruppen für eine spätere Ableitung von Designprinzipien zu ermöglichen, wurde sich in der Entwicklung der Konzepte an den zehn curricularen Fragen orientiert, die jeweils eine grundlegende Frage zum Lernvorgang und zum Lerninhalt beantwortet (vgl. Abschnitt 2.4). Auf die definierten Rahmenbedingungen wird im folgenden Abschnitt kurz eingegangen, bevor die Designprinzipien vorgestellt und diskutiert werden.

(1) Begründung

Innerhalb der vorliegenden entwickelten Unterrichtskonzepte lernen die Schüler:innen mit dem Ziel, curriculare mathematische und digitale Kompetenzen zu fördern. Beides ist Teil des regulären Unterrichts, weshalb der Mehrwert der entwickelten Unterrichtskonzepte vor allem in der Inkorporation der 3D-Druck-Technologie liegt, um frühzeitige und regelmäßige Möglichkeiten zur Berufsorientierung und -vorbereitung von Schüler:innen zu schaffen. Durch den prognostizierten Fachkräftemangel sowie der digitalen Transformation der Arbeitswelt (vgl. Abschnitt 2.1.1) hat sich das Anforderungsprofil an (zukünftige) Arbeitnehmer:innen verändert. Ein Aufgreifen der

veränderten Bedingungen mittels authentischer Kontexte der digitalen Arbeitswelt kann Schüler:innen dabei unterstützen, ein realitätsgetreues Bild der verschiedenen Branchen der Arbeitswelt zu erhalten.

(2) Inhalt und (3) Lernaktivitäten

Ein zentraler Ausgangspunkt des Designprozesses war die Eingliederung der entwickelten Unterrichtskonzepte in das bestehende Mathematikcurriculum. Demzufolge lernen die Schüler:innen die 3D-Druck-Technologie (mit Bezug zur digitalen Arbeitswelt) kennen, ohne die mathematischen Inhalte des Fachcurriculums zu vernachlässigen (vgl. Abschnitt 6.1). Da die Unterrichtskonzepte die curricularen mathematischen Inhalte fokussieren, wird die 3D-Druck-Technologie ausschließlich als exemplarische relevante digitale Technologie des digitalen Arbeitsmarktes innerhalb der entwickelten Unterrichtseinheiten als Lernkontext verwendet. Die Schüler:innen lernen also curriculare Fachinhalte mit Hilfe der 3D-Druck-Technologie als Vehikel für fachliches Lernen.

(4) Rolle der Lehrkraft

Da die Entwicklung der Unterrichtskonzepte unter der Vorannahme stattfand, dass diese im regulären Mathematikunterricht eingesetzt werden können, ändert sich die Rolle der Lehrperson im Vergleich zum herkömmlichen Unterricht ausschließlich insofern, dass entsprechende Wissenskonstrukte (*TK*, *TPK*, *TPACK*) bzw. geeignete *Selbstwirksamkeitserwartungen* zu den Wissenskonstrukten vorhanden sein müssen (vgl. Kapitel 5). Ebenso wie im herkömmlichen Unterricht bereitet die Lehrkraft die Lerntätigkeiten der Schüler:innen vor und unterstützt sie in ihrem Lernprozess.

(5) Materialien und Ressourcen

Da die Unterrichtseinheit potentiell an jeder allgemeinbildenden Schule einsetzbar sein soll, wurden im Unterrichtskonzept sowohl notwendige als auch optionale Materialien und Ressourcen festgelegt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die notwendigen Materialien und Ressourcen an jeder allgemeinbildenden Schule in Deutschland vorhanden sind, die optionalen möglicherweise jedoch nicht.

Die notwendigen Materialien und Ressourcen umfassen innerhalb der entwickelten Unterrichtskonzepte die gängigen Unterrichtsmedien wie eine Tafel oder ein Whiteboard sowie Arbeitsblätter. Innerhalb der Unterrichtskonzepte sind zum Ersparnis der Arbeitszeit der Lehrpersonen Vorschläge für Arbeitsblätter enthalten, die an die jeweilige Lerngruppe angepasst werden können. Darüber hinaus werden auch für einige Aufgabenkontexte digitale Endgeräte (z. B. Computer oder Tablets) benötigt, die auf das Internet zugreifen können, so dass digital mittels einer CAD-Software dreidimensional modelliert werden kann oder Aufgabenvideos geschaut werden können. Als optionale Ressource kann ein 3D-Drucker in der Unterrichtseinheit verwendet werden. Da die 3D-Druck-Technologie als Lernkontext und nicht als Lerninhalt oder zur Lernunterstützung verwendet wird, sind die Unterrichtskonzepte in der Schulpraxis auch ohne Vorhandensein eines 3D-Druckers durchführbar. Hierbei sollte jedoch bedacht werden, dass Schüler:innen sich in diesem Fall nur implizit mit der Technologie auseinandersetzen und konative Handlungskompetenzen vermutlich nicht

Diskussion und Implikationen

gefördert werden. In diesem Fall kann auf Makerspaces oder Industriebesuche ausgewichen werden, damit den Schüler:innen eine Möglichkeit zum expliziten Kontakt mit der Technologie ermöglicht wird.

(6) Gruppierung, (7) Ort, (8) Zeit und (10) Ziele und Vorgaben

Da die Unterrichtskonzepte so entwickelt wurden, dass sie in dem regulären Fachunterricht an allgemeinbildenden Schulen eingesetzt werden können, lernen die Schüler:innen in den entwickelten Unterrichtseinheiten in ihren regulären Lerngruppen (z. B. im Klassenverbund) sowie an ihrem regulären Lernort (z. B. im Klassenzimmer) und zur regulären Lernzeit (z. B. im Mathematikunterricht). Darüber hinaus werden in den Vorschlägen der Stundenraster zu der Unterrichtseinheit jeweils Möglichkeiten für einsetzbare Sozialformen aufgezeigt, die abhängig von der Lerngruppe umgesetzt werden können. Entsprechend der herkömmlichen Nutzung von Lernzielen der Einheit und der einzelnen Unterrichtsstunden, wurden auch zu den entwickelten Unterrichtseinheiten jeweils Einheits- und Stundenziele erstellt, die im Sinne der Überprüfbarkeit operationalisiert sind (vgl. Anhang E). Diese Ziele sind kompetenzorientiert und enthalten eine oder mehrere prozessorientierte Komponente(n).

(9) Bewertung

Ebenso wie für die vorherigen curricularen Fragen folgt aus dem Ansatz der Anknüpfung an den regulären Mathematikunterricht auch für diese Kategorie eine direkte Vergleichbarkeit zum herkömmlichen Unterricht. Dementsprechend erfolgt die Bewertung des mathematischen Lernens der Schüler:innen mittels der jeweils genutzten Überprüfungsform (z. B. Klassenarbeit, gleichwertige Ersatzleistung oder Klausur). Hierbei besteht die Möglichkeit, digitale Prüfungsformen (z. B. die Nutzung von GeoGebra) einzusetzen. Bei einem Einbezug der Kenntnisse zur 3D-Druck-Technologie in der digitalen Arbeitswelt als Bewertungskriterium bieten sich neue Prüfungsformate wie Referate, Portfolios oder ähnliches an.

Aus den verschiedenen Evaluierungszyklen, die das prototypische Unterrichtskonzept zu dem mathematischen Lerninhalt zusammengesetzte Körper im Rahmen des Forschungsprojektes durchlaufen ist, und unter Festhaltung der curricularen Rahmenbedingungen (1) bis (10) wurden planmäßig Designprinzipien abgeleitet. Die abgeleiteten Designprinzipien dienen im Educational Design Research (vgl. Abschnitt 2.4) dazu, aus der *einen* entwickelten Lösung zu *einem* vorher definierten Problem, generalisierbare Lösungsheuristiken für vergleichbare Problemstellungen in ähnlichen Kontexten abzuleiten. Im Folgenden sollen die abgeleiteten Designprinzipien vorgestellt und ihre Generalisierbarkeit diskutiert werden.

Wenn man eine Intervention 3D-Druck (als exemplarische relevante digitale Technologie des digitalisierten Arbeitsmarktes) im regulären Mathematikunterricht zum Lerninhalt Zusammengesetzte Körper (für den Zweck/die Funktion Förderung der Berufsorientierung und -vorbereitung ohne die Vernachlässigung mathematischer und digitaler Kompetenzen in der

allgemeinbildenden Schule) entwerfen will, dann ist man am besten beraten, diese Intervention mit den Merkmalen

(C₁) Nutzung des 3D-Drucks als Lernkontext und

(C₂) Nutzung von curricularen Inhalten als Lerninhalt

zu versehen und diese mit Hilfe der Verfahren

(P₁) Betrachtung von Rahmenbedingungen der relevanten Akteure für die Sicherstellung der Authentizität und der Umsetzbarkeit (vgl. Kapitel 4, 5),

(P₂) Entwicklung von Unterrichtskonzepten unter Betrachtung der curricularen Fragen (siehe oben (1) – (10)) (vgl. Abschnitt 6.2),

(P₃) iterativer formativer und summativer Evaluierung unter Einbezug der relevanten Akteure und (vgl. Abschnitt 6.3 und Kapitel 7) und

(P₄) Sicherstellung der Zugänglichkeit, Nutzbarkeit und Verständlichkeit der erstellten Konzepte (vgl. Kapitel 9)

aufgrund der theoretischen Argumente

(T₁) Veränderung der Anforderungsprofile zukünftiger Arbeitnehmer:innen und Fachkräftemangel (vgl. Abschnitt 2.1),

(T₂) zunehmende Relevanz der beruflichen Bildung sowie Möglichkeiten der Berufsorientierung und -vorbereitung (vgl. Abschnitt 2.2.1 und 2.2.3) und

(T₃) gleichbleibende Relevanz von zu fördernden curricularen mathematischen und digitalen Kompetenzen (vgl. Abschnitt 2.2.1)

und der empirischen Argumente

(E₁) die Nutzung des 3D-Drucks als Lernkontext kann eine mögliche spätere Auseinandersetzung mit der Technologie im beruflichen Kontext vorbereiten (vgl. Kapitel 4),

(E₂) die Notwendigkeit der Unterstützung von Lehrkräften in der Umsetzung neuer Unterrichtsansätze (vgl. Kapitel 5, 9),

(E₃) die Nutzung des 3D-Drucks als Lernkontext hat eine positive Wirkung auf einzelne Aspekte des 3D-Druck-bezogenen Selbstkonzepts der Schüler:innen und fördert digitale Kompetenzen (vgl. Abschnitt 6.3.4 und Kapitel 7) und

(E₄) im Vergleich zu herkömmlichen Unterricht lernen die Schüler:innen nicht weniger Mathematik in der Intervention (vgl. Kapitel 7)

umzusetzen.

Generalisierbarkeit der Designprinzipien

Allein die Formulierung der Designprinzipien ist jedoch nicht ausreichend um eine Generalisierbarkeit oder Allgemeingültigkeit anzunehmen. So müssen die abgeleiteten Designprinzipien in weiteren Kontexten überprüft werden (vgl. Abschnitt 2.4). Dafür

können einzelne Aspekte des oben angegebenen Interventionskontextes („3D-Druck (als exemplarische relevante digitale Technologie des digitalisierten Arbeitsmarktes) im regulären Mathematikunterricht zum Lerninhalt Zusammengesetzte Körper“) variiert werden. Im vorliegenden durchgeführten Educational Design Research Projekt bietet sich das Variieren von drei Kontexten an, wobei innerhalb der Kontextvariationen bei Festhalten der entsprechenden *Merkmale* und dem Folgen des *Verfahrens* eine erneute Überprüfung der *theoretischen* und *empirischen Argumente* notwendig ist:

(A) Kontextvariation: Technologie

„3D-Druck (als exemplarische relevante digitale Technologie des digitalisierten Arbeitsmarktes) im regulären Mathematikunterricht zum Lerninhalt Zusammengesetzte Körper“

Eine erste mögliche Kontextvariation zur Überprüfung der Generalisierbarkeit der abgeleiteten Designprinzipien ist die Technologie, die als Lernkontext ausgewählt wurde. So wurde sich in der vorliegenden Forschungsarbeit aufgrund ihrer Relevanz für die derzeitige und zukünftige digitale Arbeitswelt für die 3D-Druck-Technologie entschieden (vgl. Abschnitt 2.1.2). Aufgrund der stetigen Weiterentwicklung von Technologien insbesondere mit dem Übergang in die Industrie 5.0 (vgl. Abschnitt 2.1.1), könnten zukünftig auch andere Technologien in den Fokus rücken sowie eine Passung zu curricularen Fachinhalten aufweisen. Ein Beispiel hierfür wären KI-Modelle (vgl. z. B. Lineare Algebra mittels ChatGPT, Helfrich-Schkarbanenko, 2023) oder Robotik (vgl. z. B. Negative Zahlen im Kontext Robotik, MacDonald & Hinterseer, 2020; Problemlösen mit LEGO®-Robotik, Hörnberger, 2023), die bereits heute im Rahmen von (Fremd-)Sprachenunterricht bzw. Informatikunterricht betrachtet werden können.

(B) Kontextvariation: Unterrichtsrahmen

„3D-Druck (als exemplarische relevante digitale Technologie des digitalisierten Arbeitsmarktes) im **regulären** Mathematikunterricht zum Lerninhalt Zusammengesetzte Körper“

Eine zweite mögliche Kontextvariation wäre der Unterrichtsrahmen, in welchem die 3D-Druck-Technologie im Mathematikunterricht eingesetzt wird. Statt der Nutzung im Rahmen des regulären Unterrichts, ist auch eine Einbindung der Technologie im Rahmen von Projektwochen, Lernlaboren und Förder- oder Forderkursen denkbar. Der Rahmen des regulären Unterrichts wurde im vorliegenden Forschungsprojekt gewählt, um eine breite Einsatzmöglichkeit der entwickelten Unterrichtskonzepte gewährleisten zu können. Bei einer Nutzung der Konzepte in anderen Unterrichtsrahmen wäre eventuell eine Anpassung der Stundenraster notwendig (vgl. die Pilotierung der Mehrwertsevaluierung im Laborkontext als Workshop, Abschnitt 6.3.4).

(C) Kontextvariation: Verknüpfung mit dem Curriculum

„3D-Druck (als exemplarische relevante digitale Technologie des digitalisierten Arbeitsmarktes) im regulären Mathematikunterricht zum **Lerninhalt Zusammengesetzte Körper**“

Eine dritte mögliche Kontextvariation zur Überprüfung der Generalisierbarkeit der formulierten Designprinzipien ist die Erstellung und Evaluierung weiterer Unterrichtskonzepte zu passenden curricularen mathematischen Lerninhalten (vgl. Tab. 6.2 in Abschnitt 6.1). Hierdurch wäre überprüfbar, ob die Designprinzipien ausschließlich für den prototypischen mathematischen Lerninhalt der zusammengesetzten Körper anwendbar oder ebenfalls auf weitere passende Lerninhalte des Mathematikcurriculums übertragbar sind.

Wie in Kapitel 8 bereits berichtet, wurden zu ausgewählten weiteren curricularen Inhalten Unterrichtskonzepte erstellt (z. B. Ebenendarstellungen, Perspektiven). Diese wurden bisher jedoch mit Ausnahme eines Unterrichtskonzeptes nicht summativ evaluiert. Im Rahmen einer Masterarbeit wurde ein Konzept zu dem mathematischen Lerninhalt Simplex/Eckpunktmodelle auf Basis der im vorherigen Abschnitt formulierten Designprinzipien entwickelt und mit Hilfe von zwei 7. Klassen verschiedener Schulformen mit $N = 36$ (21 weiblich, 14 männlich) untersucht. Dabei handelt es sich ausschließlich um die Betrachtung einer Interventionsgruppe, sodass nur Tendenzen aufgezeigt werden können. Zusätzlich zum mathematischen Selbstkonzept wurde innerhalb der Masterarbeit die intrinsische Motivation der Schüler:innen bezüglich der Unterrichtseinheit mittels der vier Subskalen Interesse/Vergnügen, subjektiv wahrgenommene Kompetenz (Kompetenzerleben), subjektiv wahrgenommene Wahlfreiheit (Autonomieerleben) und subjektiv wahrgenommener Druck/Anspannung erhoben. Die Ergebnisse der summativen Evaluierung weisen auf eine Gültigkeit der Designprinzipien für den Lerninhalt Simplex/Eckpunktmodelle hin (Osahr, 2023).

10.3 Implikationen für die Praxis

Die Notwendigkeit für eine Implementierung digitaler Medien und Technologien in der allgemeinen Schulbildung, um Schüler:innen eine kritische Medienbildung zu ermöglichen ist unumstritten (z. B. Gräsel et al., 2020; institutionelle Vorgaben, MBWK SH, 2018; im Mathematikunterricht, Reinhold et al., 2023). Darüber hinaus bilden frühzeitige berufliche Orientierungsmöglichkeiten im Angesicht des prognostizierten Fachkräftemangel eine zunehmend wichtige Grundlage im Entscheidungsprozess zur Berufswahl der Schüler:innen. Die im Forschungsprojekt entwickelten Unterrichtskonzepte bieten eine Möglichkeit, gleichzeitig curriculare fachliche und digitale Elemente zu unterrichten und den Schüler:innen Einblicke in für den digitalen Arbeitsmarkt relevante Aspekte zu geben. Dabei sind die Unterrichtskonzepte gerade so entwickelt, dass sie bei Passung des Lerninhalts herkömmliche Unterrichtskonzepte zu dem jeweiligen Lerninhalt ergänzen oder ersetzen können – je nach Wahl der Lehrperson im Vorbereitungsprozess der Unterrichtseinheit. Da an allgemeinbildenden Schulen in Deutschland zunehmend Filamentdrucker verfügbar sind (vgl. Abschnitt 2.2.2), geben die entwickelten Unterrichtskonzepte darüber hinaus Lehrkräften bereits evaluierte und auf ihren Mehrwert überprüfte Möglichkeiten an die Hand, die vorhandenen 3D-Drucker sinnvoll einzusetzen. Dies kann dazu führen, dass Hemmungen im Einsatz digitaler Technologien, auch abgesehen von der 3D-Druck-Technologie, im regulären Fachunterricht als Lernkontext, Lerninhalt oder zur Lernunterstützung abnehmen. Somit können Schüler:innen mit erhöhter Häufigkeit und mit verschiedenen

digitalen Medien sowie Werkzeugen im Schulkontext in Berührung kommen und diese für Lernprozesse nutzen.

Da der Designprozess in der vorliegenden Forschungsarbeit kanonisch durchgeführt wurde, kann die Arbeit zusätzlich dazu dienen, den Ansatz des Lernkontextes auszuweiten. So können die abgeleiteten Designprinzipien auf andere Bereiche übertragen werden, die als Lernkontexte für den fachlichen Unterricht an allgemeinbildenden Schulen dienen können. In diesem Übertragungsprozess kann das in der vorliegenden Forschungsarbeit beschriebene Vorgehen als Vorgehensvorlage eingesetzt werden, um Unterrichtskonzepte im Lernkontextansatz zu entwickeln.

10.4 Limitationen

Wie bei allen Studien müssen auch die in dieser Arbeit berichteten Forschungsergebnisse unter gewissen Limitationen betrachtet werden. Limitationen der einzelnen Studien wurden in der jeweiligen Vorstellung der Studie berichtet (vgl. Abschnitte 4.5, 5.4.1, 7.6 und 9.5), so dass es in diesem Abschnitt um übergreifende, die gesamte Forschungsarbeit betreffende Limitationen gehen soll.

Der Definition des Educational Design Research folgend wurde in der vorliegenden Forschungsarbeit *eine* Lösung für *ein* identifiziertes Problem erarbeitet. Mittels der Rahmenbedingungsstudien (Kapitel 4, 5) sollte sichergestellt werden, dass ein relevantes Problem identifiziert wurde. Die Evaluierungszyklen sichern, dass die entwickelte Lösung zielführend und umsetzbar ist. Es wird aber nicht der Anspruch erhoben, dass die entwickelte Lösung (hier: die Nutzung des 3D-Drucks als eine exemplarische digitale Technologie als Lernkontext), die einzig funktionierende Lösung ist. Darüber hinaus wurde die Generalisierbarkeit der Designprinzipien bisher nur an einem weiteren curricularen mathematischen Lerninhalt überprüft, nicht aber mit Hilfe anderer Technologien untersucht (vgl. Abschnitt 10.2.2). Jedoch weisen die in Abschnitt 10.2.2 kurz dargestellten Ergebnisse bezüglich des entwickelten Unterrichtskonzeptes zum mathematischen Lerninhalt Simplex/Eckpunktmodelle darauf hin, dass die formulierten Designprinzipien auch für diesen Lerninhalt gültig sind. Dementsprechend gibt es erste Hinweise, dass eine Gültigkeit der Designprinzipien für die Implementation der 3D-Druck-Technologie im Mathematikunterricht vorliegt.

Eine weitere zu bedenkende Limitation ist, dass sich die in der summativen Evaluierungsstudie (vgl. Kapitel 7) betrachtete Interventionsgruppe ausschließlich aus Lerngruppen der Netzwerkschulen des DiASper-Projekts zusammensetzen. Die Schulen befinden sich alle in Schleswig-Holstein. Um die Selektivität der Interventionsgruppe trotzdem so gering wie möglich zu halten, wurden verschiedene Schulformen (Gymnasium sowie Gemeinschaftsschule mit bzw. ohne Oberstufe) in den Evaluierungszyklus eingebunden. Im Rahmen der Projektlaufzeit wurden darüber hinaus alle Netzwerkschulen mit Hilfe von Interreg-Fördergeldern²⁶ mit 3D-Druckern ausgestattet. Auch wenn unklar bleibt, inwiefern die 3D-Drucker in der jeweiligen Unterrichtseinheit der Klassen der Interventionsgruppe eingesetzt wurden, so kann davon

²⁶ Das DiASper-Projekt wurde gefördert durch Interreg Deutschland-Danmark mit Mitteln des europäischen Fonds für regionale Entwicklung.

ausgegangen werden, dass es keine Klasse der Interventionsgruppe aus der summativen Mehrwertevaluationsstudie gab (5. Zyklus; vgl. Abschnitt 6.3.5 und Kapitel 7), die nicht mindestens einmal mit einem 3D-Drucker gearbeitet hat. Die Unterrichtskonzepte sind zwar so konzipiert, dass das Vorhandensein eines 3D-Druckers an der jeweiligen Schule optional ist, inwiefern sich eine Abwesenheit eines expliziten Kontakts mit der Technologie auf die erhobenen psychologischen Konstrukte auswirkt, verbleibt jedoch unklar.

Unter dem Anspruch, Möglichkeiten im regulären Fachunterricht für Schüler:innen zur Berufsorientierung und -vorbereitung zu schaffen, muss darüber hinaus die Limitation betrachtet werden, dass innerhalb des Forschungsprojektes nur eine Quasi-Längsschnittstudie durchgeführt wurde, in der die Einstellungen der Schüler:innen bezüglich der digitalen Arbeitswelt und der 3D-Druck-Technologie mittels Selbsteinschätzungsberichten und nicht mit Hilfe von Kompetenzaufgaben erhoben wurden. Dementsprechend bleibt die Frage offen, ob die Schüler:innen mit Hilfe der entwickelten Unterrichtskonzepte, die die 3D-Druck-Technologie als Lernkontext im regulären Mathematikunterricht implementieren, tatsächlich vorbereitende Handlungskompetenzen für ein späteres Berufsleben mit 3D-Druckern erwerben. Dazu wären Längsschnittstudien über mehrere Jahre durchzuführen, die im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit zeitlich nicht umsetzbar waren. Jedoch bieten die Unterrichtseinheiten eine breite Orientierungsmöglichkeit sowie einen Erstkontakt zur Technologie im Rahmen des Fachunterrichts. Hierdurch können Schüler:innen mit einer Technologie in Berührung kommen, von der sie potentiell bereits gehört, sich aber nicht näher mit auseinandergesetzt haben. Zudem ermöglicht der Ansatz den Lehrpersonen die Relevanz der Fachinhalte des Mathematikunterrichts in berufliche Kontexte einzuordnen, um so dem Relevanzparadox (Niss, 1994) entgegen zu wirken.

Abschließend ist anzumerken, dass die Stichprobengrößen in einigen der Evaluierungszyklen (insbesondere Zyklus 2 und 4; vgl. Abschnitte 6.3.2 und 6.3.4) sowie in der Disseminationsstudie (vgl. Kapitel 9) relativ gering sind ($N_{\text{Zyklus 2}} = 3$, $N_{\text{Zyklus 4}} = 16$ bzw. $N_{\text{Disseminationsstudie}} = 24$), so dass die Ergebnisse vor allem als Tendenzen aufgefasst werden sollten. Die geringen Stichprobengrößen haben in den Evaluierungszyklen aufgrund ihrer Beschaffenheit sowie der Evaluierungsziele vermutlich keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Evaluierungsergebnisse. In den Auswertungen der Disseminationsstudie hingegen wurde die geringe Stichprobengröße mitbedacht und die dargestellten Resultate als Tendenzen für den Erfolg von Kurzfortbildungen aufgefasst, insbesondere für Lehrkräfte mit geringer *Selbstwirksamkeitserwartung* bezüglich technologischer Wissensausprägungen. Weiterführende Forschung mit entsprechend großen Stichprobengrößen könnte mittels statistischen Signifikanztests genauere Aussagen bezüglich der Wirksamkeit von Kurzfortbildungen treffen.

11 FAZIT UND AUSBLICK

Ausgehend davon, dass eine Diskrepanz zwischen den von der digitalen Arbeitswelt erwarteten Kompetenzprofilen und den fachspezifischen mathematischen curricularen Inhalten besteht, wurde in der vorliegenden Forschungsarbeit auf Basis durchgeführter Rahmenbedingungsstudien und dem Educational Design Research ein prototypisches Unterrichtskonzept entwickelt und mittels fünf formativer und summativer Zyklen evaluiert. Dabei entspricht das entwickelte Unterrichtskonzept einer Lösungsmöglichkeit für die dargestellte Ausgangslage hinsichtlich *einer* relevanten digitalen Technologie des digitalen Arbeitsmarktes.

Bei der Entwicklung des Unterrichtskonzepts wurden die relevanten Akteure (hier: Akteure der digitalen Arbeitswelt, Mathematiklehrkräfte und Schüler:innen) involviert, um (a) den authentischen Einsatz der gewählten digitalen Technologie der digitalen Arbeitswelt, (b) die praktische Durchführbarkeit und (c) den Mehrwert für die Lernenden zu sichern. Bereits im Zuge der Rahmenbedingungsstudien wurden durch offene Kommentare der Lehrkräfte eine Offenheit für und ein Interesse an der geplanten Entwicklung von Unterrichtskonzepten für einen möglichen Einsatz der 3D-Druck-Technologie im regulären Mathematikunterricht deutlich. So wurde nach der Teilnahme an der Rahmenbedingungsstudie von verschiedenen Lehrkräften angefragt, ob es noch eine Möglichkeit gäbe als Netzwerklehrkraft in den Projektkontext aufgenommen zu werden. Ähnliche Erfahrungen wurden auf Seiten der Vertreter:innen der Arbeitswelt gemacht. So zeigten die in der Rahmenbedingungsstudie durchgeführten Gespräche mit Akteuren aus der digitalen Arbeitswelt eine Offenheit für die frühzeitige Einbindung relevanter Technologien in die allgemeine Schulbildung. Darüber hinaus zeigte sich auch eine Offenheit für die Entwicklung außerschulischer Lerngelegenheiten in Kooperation mit Lehrkräften, so dass bereits während der Projektlaufzeit erste Kontakte zwischen Netzwerkschulen und -unternehmen hergestellt werden konnten.

Das Ergebnis der durchgeführten Evaluierungszyklen ist ein Unterrichtskonzept zu *einem* curricularen mathematischen Lerninhalt, das in den regulären Mathematikunterricht integriert werden kann und somit den Zielen der allgemeinbildenden Schule entspricht. Darüber hinaus bietet das Unterrichtskonzept die Möglichkeit, den 3D-Druck als eine relevante digitale Technologie der digitalen Arbeitswelt zu nutzen, um mathematisches Lernen zu ermöglichen. Gleichzeitig erhalten die Schüler:innen authentische Einblicke in einzelne Aspekte der Verwendung der 3D-Druck-Technologie in der Arbeitswelt. Während der Projektlaufzeit wurden im Rahmen verschiedener Veranstaltungen (z. B. Rent-A-Scientist der Kiel-Region in Schleswig-Holstein) Unterrichtsbesuche an Schulen durchgeführt, die nicht Netzwerkschulen des Projekts

Fazit und Ausblick

waren. Auch hier gab es sowohl von Seiten der Lehrkräfte als auch von Schüler:innen überwiegend positive Rückmeldungen hinsichtlich des Interesses und der Relevanzwahrnehmung. Die Relevanz der forschungsbasiert entwickelten Unterrichtskonzepte, als Lösungen des anfangs identifizierten bildungswissenschaftlichen Problems, ist somit aus wissenschaftlicher als auch aus erfahrungsbasierter Perspektive hoch. Zusammengefasst hat die vorliegende Forschungsarbeit dementsprechend dazu beigetragen, eine berufsrelevante Technologie anhand von entwickelten Unterrichtskonzepten und -materialien erfolgreich in den regulären Mathematikunterricht zu integrieren. Das in der Arbeit aufgezeigte Vorgehen und die abgeleiteten Designprinzipien können als Inspiration für die Integration anderer Technologien in verschiedene Unterrichtsfächer mittels des Lernkontextansatzes verwendet werden, um so bereits in der Schulbildung zukünftige Herausforderungen des Arbeitsmarktes transparent aufzuzeigen und mit fachlichem Lernen zu verknüpfen.

Um die Nachhaltigkeit der entwickelten Unterrichtskonzepte zumindest grundlegend zu sichern, ist die Nutzung von OER-Plattformen von zentraler Bedeutung, da die nutzenden Lehrkräfte über diese Plattformen in einen (indirekten) Austausch treten und ihre eigenen Versionen von Stundenrastern, adaptierten Aufgaben oder Arbeitsblättern mit anderen Lehrkräften teilen können. Um die Lehrkräfte über das verfügbare Angebot zu informieren, wurde während der Projektlaufzeit auf die Netzwerkschulen zurückgegriffen und die in Kapitel 9 vorgestellten Lehrkräftefortbildungen durchgeführt. Darüber hinaus wurden die entwickelten Unterrichtskonzepte sowie die zugrundeliegenden Entwicklungsprozesse im Rahmen einer IQSH-Veranstaltung den Studienleitungen des Faches Mathematik vorgestellt, so dass davon ausgegangen werden kann, dass eine ausreichend große Anzahl von Multiplikator:innen über die erstellten Unterrichtskonzepte sowie deren Verfügbarkeit informiert sind, um einen nachhaltigen Einsatz zu gewährleisten.

Ausgehend von einer Übertragung der Designprinzipien auf weitere Unterrichtsinhalte und weitere Technologien sollte in zukünftigen wissenschaftlichen Forschungsprojekten die Prüfung der Generalisierbarkeit bzw. Allgemeingültigkeit der formulierten Designprinzipien fokussiert werden. Bei einer positiven Evaluierung der Designprinzipien könnten diese Lehrkräfte oder andere Akteure des Bildungsbereichs in der Erstellung von Unterrichtskonzepten unterstützen, die weitere relevante digitale Technologien (z. B. Robotik oder KI) über den Lernkontexts-Ansatz in den regulären Schulunterricht implementieren. Unter der Annahme, dass die Designprinzipien generalisierbar sind, könnten Schüler:innen durch die Nutzung verschiedener Technologien als Lernkontexte in unterschiedlichen Unterrichtsfächern des regulären Fachunterrichts an allgemeinbildenden Schulen ein breites Bild von der Nutzung verschiedener digitaler Technologien in verschiedenen beruflichen Kontexten und Branchen erhalten. Dies könnte es den Schüler:innen ermöglichen, bereits während der Schulzeit im geschützten Rahmen ihrer Lerngruppe mit verschiedenen beruflichen Kontexten in Kontakt zu kommen, sich anhand authentischer Kontexte innerhalb der Möglichkeiten des Arbeitsmarktes zu orientieren und sich gezielt auf einen Übergang in die digitale Arbeitswelt vorzubereiten, ohne dabei fachliche Inhalte zu vernachlässigen.

A DARSTELLUNG DER KONZEPTUELLEN RAHMENBEDINGUNGEN DES PROJEKTS

Der folgende Beitrag wurde am 20.01.2022 eingereicht und nach einem Peer-Review-Prozess in der untenstehenden Fassung in 2023 in **F. Dilling, F. Pielsticker, I. Witzke (Hrsg.): Learning mathematics in the context of 3D printing: Proceedings of the International Symposium on 3D Printing in Mathematics Education** (DOI: 10.1007/978-3-658-38867-6_3) veröffentlicht²⁷.

Increasing the skills on occupationally relevant digital technologies among students in Southern Denmark and Northern Germany: 3D printing as a learning context in regular mathematics classes

Mira H. Wulff, Marc Wilken & Aiso Heinze

Zusammenfassung: One of today's central challenges is the digital transformation of the workplace, as the rapid development of digital technologies is leading to changes in professions. Consequently, innovative educational concepts are needed to prepare students for the required competence profile and to ensure that they can enter the workplace with a digital-technological basic education. The Danish-German DiASper project (Digital Working World from School Perspective) therefore aims to implement aspects of digital technologies of the digital workplace in regular STEM school lessons. Taking the digital and technological processes of 3D printing as the starting point, the project has identified learning contents that address both the curricular contents of mathematics and the digital technologies of the workplace. Technological processes of 3D printing, namely modeling, triangulation, slicing and printing, can be used as a learning context to teach mathematical content in both geometry and calculus. For instance, the use of a CAD-software enables students of different grades to analyze composite figures by spinning the object virtually, thus providing the possibility to enhance students' spatial visualization ability. The project follows the design-based research approach to adapt the teaching concepts for the possibility of an optimized use in mathematics teaching. This paper gives an insight into the conceptual framework of the DiASper project as well as the project goals.

²⁷ Die Wiederverwertung dieses Beitrags geschieht mit freundlicher Genehmigung von Springer Nature.

A.a. Introduction

Within this conceptual paper, the project DiASper (Digital Working World from School Perspective) will be presented. The project is a cooperation of German and Danish network partners and is lead managed by the IPN – Leibniz-Institute for Science and Mathematics Education in Kiel. The aim of DiASper is, among other things, to develop teaching concepts for mathematics lessons that take up 3D printing (as an example of a digital technology of the digital workplace) as a learning context. This means that students should learn mathematics within the frame of the 3D printing processes in their regular mathematics lessons.

The background to this project goal are the changing demands on future workers in the digital working world. Since students in general education schools are to be educated to become responsible citizens, among other things, preparation for the challenges of the digital world of work should be an integral part of teaching. This paper therefore provides an insight into the conceptual framework of the DiASper project, starting by identifying some of the requirements of the digital workplace. In particular, Additive Manufacturing/3D printing will be discussed as an example of a digital tool that has high potential for the current and future labor market (Section 2). The mathematics behind the processes of 3D printing will also be discussed in order to motivate the potential connection points to the regular content of mathematics lessons of German and Danish curricula, which will be examined in more detail in Section 4.

Likewise, a brief insight into the state of digitization in German schools and the use of digital media in mathematics education will be given in Section 3. Section 4 then introduces the DiASper project with its conceptual framework and the identified points of connection between the mathematics behind the technical processes of 3D printing and the content of regular mathematics lessons. For illustration purposes, an example of a teaching idea will be presented shortly. Within a short conclusion, the next steps of the project will finally be presented.

A.b. Digitalization of the workplace

The increasing digitalization of the world has led to constant changes in society as well as the values and norms linked to it. As a result, everyday-life needs to be adapted accordingly. However, social areas are not the only ones transformed by the digitalization: During the last decade, the working world has undergone a digital transformation (Kirchner, 2015; BMAS, 2016; Kaiser et al., 2021). In a research report the German federal ministry of labor and social affairs (*Bundesministerium für Arbeit und Soziales* - BMAS) evaluated the digitalization of the workplace (BMAS, 2016). The report states, that the use of information and communications technology (ICT) in job-related contexts has increased (BMAS, 2016). However, ICT is not the only form of digital technology that has experienced a growth in the working world. Indicators of digitalization can be found in different sectors: Digital technologies are used in production processes, but also in creative domains as well as service and administration (Calvino et al., 2018). As a consequence, the BMAS speaks of an advancing change from analogue and/or mechanical processes to automatized processes. This transition influences not only processes of the working world (e.g. production processes), but

first and foremost the required qualification profile of employees and future workers (Grundke et al., 2017; BMAS, 2020). This means that (future) employees need the knowledge to work with different machinery and technologies than before. This knowledge includes both technical knowledge and the ability to work with the given digital technology. According to research conducted by BMAS in 2020, some employees assume that the increase of digital technologies in job-related contexts demands the acquisition of new competences. After an analysis of competence profiles related to workplaces influenced by the digitalization, the BMAS states that competences that are required in the digitalized workplace cannot be seen as replacements of competences needed previously. They can, however, rather be characterized as a further development of formerly required skills (BMAS, 2020).

A.b.i. Additive Manufacturing as an example of a digital technology

3D printing is an important new digital technology, which is increasingly used in various manufacturing sectors in industry and craft. There are various 3D printing processes that are collected under the umbrella term ‘3D printing’. This makes it difficult to clearly distinguish processes that cannot be assigned to this umbrella term. For this reason, one could refer to the following working definition: *3D printing is a process, in which a material is either first liquefied by a melting procedure or taken in its liquid or pulverized form. The liquefied mass is then either applied in layers from a movable, usually heated nozzle onto a base or the material, which has already solidified again, or solidified in layers with the help of sintering or other solidifying processes. The process is iterated so that an object which has previously been modeled is created layer by layer* (based on Fastermann, 2014; Junk, 2017). Due to this additive production method 3D printing is also called Additive Manufacturing. Based on the working definition, processes associated with 3D printing can be distinguished from traditional subtractive (e.g. milling, machining) or formative (e.g. casting) processes.

The advantages of the 3D printing process are the possibilities for innovation, since objects that are to be printed can expeditiously be adapted and individualized in the preferred modeling software and the possibility to produce intricate or especially small objects. It is also worth mentioning, that the printing process described in the working definition enables the use of 3D printing by non-professionals who do not have extensive technical or craft knowledge. This potential has also increased in recent years as alternatives to complex modeling software that are usable by laymen or printer-specific slicer programs can be accessed.

In 2018 and 2019, 314 Danish production companies were asked about their use of Additive Manufacturing. At that time, according to the survey, 25% of the asked companies were using 3D printing processes. Nevertheless, the report draws attention to the high potential of the technology, although it can be stated that 3D printing played a rather subordinate role in 2018 alongside robot technologies and the associated automation of production processes (Blichfeldt et al., 2020).

In February and March 2021, the German Association for Information Technology, Telecommunications and New Media (*Bundesverband*

Konzeptuelle Rahmenbedingungen

Informationswissenschaft, Telekommunikation und neue Medien – BITKOM) asked several industry branches in Germany about their views on 3D printing. The survey showed that 44% of the questioned companies were already using 3D printing in work processes and another 42% were planning and discussing the manufacturing process. Consequently, it is already possible to speak of a broad use of 3D printing technology in the German industry, which could be further expanded in the future, thus showing the potential and significance of the technology. The survey also provides a reasoning for this: The questioned companies state that the use of the 3D printing technology increases the possibility for the flexible design of work processes, for bridging supply bottlenecks (for example during the Covid19 pandemic) and for the individualization of products (BITKOM, 2021). In addition, the 3D printing technology is also expanding the possibilities in non-manufacturing and non-manual areas with processes such as bio-printing or Contour-Crafting.

A.b.ii. The mathematics behind 3D printing

To be able to analyze the mathematics behind the 3D printing, the entire process of 3D printing is divided into four interdependent technical processes: Modeling, tessellation/triangulation of the surface, slicing and printing (see for example Espera et al., 2019). In the following, these processes are described in more detail with regard to their mathematical content.

Modeling

The first step of 3D printing is the modeling phase, in which the object to be printed is constructed digitally. There are several modeling methods (cf. Dilling & Witzke, 2019): A real object can be scanned with the help of a 3D scanner. The scanner then provides the user with a digital model of the real object. Furthermore, an object can be modeled in a CAD (*Computer Aided Design*) software. Some CAD software work on the basis of solid geometric figures which are composed (direct modeling). This means that the model is built together with the help of the Boolean Operators AND, OR and NOT. These operators are applied to solid figures in order to examine the basic operations Unions, Intersections and Complements. Other CAD software operate so that a two-dimensional area is modeled and eventually either extruded to a prism or a pyramid or rotated around a fixed axis into a body of rotation (parametric modeling). Another way of creating a digital model is via code: An object is built digitally with the help of variables, loops and logical operators (script-based modeling).

When the digital model is finished, one has to think about the optimal printing position. As overhanging parts for instance can only be printed with support structures, the optimal positioning of the digital object during the modeling process can save material.

Tessellation or Triangulation

Within the tessellation or triangulation process, the surface of the modeled object is described by a net of primitive geometric shapes (usually by squares or triangles, hence the term triangulation) and thereby positioned in a virtual printing space. Thereby, the

modeled object is converted into a “language” that can be understood by computers. The most common format is the STL (Standard Triangulation Language)-format. However, different tessellation formats exist, each with a different focus. Within the STL-format, the description of the modeled object can be divided into different blocks with four parameters each (specification of the coordinates of three vertices as well as the surface normal of the triangular surface) (Dilling & Witzke, 2020).

Rounded surfaces are described by a finer net of triangles and consequently with a higher number of triangles. This is done to increase the accuracy of the representation of the modeled object. The approximation of a rounded surface is based on Leibniz’s idea that every curve can be approximated by a polygonal chain (Guicciardini, 1999).

Slicing

The slicing-phase is the final preparation phase for the printing process. To prepare the triangulated file for printing, the model is sliced into individual layers. Control commands such as the temperature of the print nozzle, a description of the travel path and the amount of material to be applied along the path traveled by the print nozzle are added. Beside control commands, support structures can be added, if necessary. If surfaces are rounded, the resolution of the print can be refined through adjustment of the layer thickness of the printing process.

Printing

The sliced model is eventually printed in layers. Within this process, the material is added in voxels, three-dimensional data points, which are the equivalent to pixels in a two-dimensional image. Depending on the selected printing process, the individual layers can be glued, welded or sintered to previous layers.

The previous Section A.b focused in the digitalization of the workplace and accompanying changes (e.g. in the competence profile of (future) employees). The following sections focus on the training and education of future employees. An important component of the preparation for the digital workplace is general education, which students attend over a period of nine to 13 years. Preparing students for the digitalized working world can be seen as one of the central missions of general school education.

A.c. Digitalization of German schools

General education schools play a significant part in preparing children and young people for life in today’s and tomorrow’s society – including the preparation for the digitized workplace. Already in 2019, the Digital Education Charta²⁸ was launched in Germany as an alliance of representatives from politics, business, science and society. The Charta defines digital education as an integral part of general education, which is why digital education should also be part of the curriculum in general education schools, according to the alliance.

²⁸ See further <https://charta-digitale-bildung.de/> (Gesellschaft für Informatik e.V.).

Konzeptuelle Rahmenbedingungen

This is reflected both in the strategy for education in the digital world (*Strategie zur Bildung in der digitalen Welt*) defined by the Standing Conference of the Ministers for Education and Cultural Affairs of the Länder in the Federal Republic of Germany (*Kultusministerkonferenz - KMK*) and in the handout Digital Education – The Key to a Changing World (*Digitale Bildung – Der Schlüssel zu einer Welt im Wandel*) published by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (*Bundesministerium für Wirtschaft und Energie - BMWI*). Both publications assign general education schools a high status and consequently a great responsibility in the training of future skilled workers and their preparation for the digital work environment. While the BMWI's handout addresses the need for digital education in all phases of life and education, the KMK's digital strategy shows the extent to which digital education could be implemented in general education schools. The KMK's digital education goals focus on active and independent participation and self-regulation in digital contexts. These digital educational goals are to be implemented in every subject at general education schools. The link between education and workplace is also highlighted in literature: The embedding of technology in educational settings can be seen as essential for learning processes (e.g. to empower students to self-regulate their learning processes), for supporting lifelong learning, for accessing knowledge and for motivating students (see for example Starke-Meyerring & Wilson, 2008; Willinsky, 2009; Selwyn, 2013).

Before the use of digital technologies in school can be discussed, the digital equipment of schools in Germany needs to be considered. This has already been done in comparison to other countries in the *International Computer and Information Literacy Study* (ICILS) (Fraillon et al., 2020). According to this study, the student-computer-ratio adds up to 9.7:1, which means that there is one computer, laptop or tablet-computer for about ten students. These computers are in Germany often stored in computer labs, which means that students often have no direct access to these computers. But in order to be able to work with most of the existing digital technologies, a computer is needed. It is worth mentioning that the Covid19-pandemic has benefitted the digitalization of German schools, as teachers and pupils needed to work together and communicate digitally as no actual meetings were allowed (Mußmann et al., 2021).

Beside the digital equipment, the existence of an IT contact person that helps with technical issues is important when working with digital technologies at schools. ICILS recorded that most schools in Germany rely on external support if at all (Fraillon et al., 2020). This could result in slower support and therefore a less amount of teachers working with the given digital technologies. The importance of accessibility is therefore highlighted in the ICILS report. Furthermore, there is also a call for pedagogical support (Fraillon et al., 2020). This refers to support given in order to include digital technologies in individual school lessons.

If schools were equipped in an optimal way both with digital equipment and IT contact persons, teachers still would need to be educated in how to use and how to incorporate the given digital technologies (Härtig et al., n.d.). Therefore, there is a need for further education for teachers. There is a range of possibilities that could help teachers with the use of digital equipment in their individual lessons. If digital

technologies were to be incorporated early in teacher education, future teachers would already have basic knowledge when arriving at schools. Moreover, support structures both at schools and from the government would be needed to support teachers on their individual competence level.

If all the aforementioned conditions are given, teachers still need to be willing to incorporate digital technologies in their regular lessons. In order to develop teaching ideas and concepts that are easily accessible and usable in teaching, there should be a focus on existing curricular and mathematical content (Lipowsky, 2009). As a result, content that is already taught, could be taught in a different context or with a different focus. Still, the issue of added value remains that is also important when constructing teaching ideas that potentially could replace existing teaching ideas.

A.c.i. Digitalization in mathematics education

In order for mathematics education to be able to fulfill its general education mission in today's digitized world, digital goals must be placed in the focus of teaching in addition to, among others, logic, problem-solving, and modeling skills. According to Winter (1995), in order to have a general educational effect, mathematics instruction at lower and upper secondary education should enable the following three basic experiences: Firstly, mathematics education should address phenomena of our environment which concern or should concern us all. Secondly, mathematics education should enable students to get to know and understand mathematical objects and facts as a deductively ordered world of its own kind. And lastly, mathematics education should enable students to acquire problem-solving skills that go beyond mathematics in the confrontation with tasks.

As digital technologies are increasingly found in all areas of life, an examination of them and their modes of operation is inevitable. Therefore, the digital educational goal of active and self-determined participation in the digital world (KMK, 2017b) is supported in particular by Winter's first basic experience in that learners should become familiar with and understand the basic processes of digital technologies through mathematics education. Likewise, learners should acquire a higher level of self-regulation competence (i.e. gradually assuming responsibility for their own learning) through the use of digital technologies in the classroom (KMK, 2017b). In particular, this educational goal can be achieved by using digital technologies to enhance the design of lessons by incorporating digital learning environments and learning opportunities. By moving toward process- and outcome-based teaching and learning, learners can be supported in increasingly taking charge of planning and designing their learning goals and learning paths that are individually adapted to their learning levels (KMK, 2017b). Consequently, this educational goal can be considered on the basis of Winter's second and third basic experiences. For mathematics education it can be deduced that especially modeling and problem-solving processes that have a relation to digital technologies can be useful to let learners rethink their own ways of thinking and to learn and use heuristic skills.

A.d. 3D printing as a learning context in regular mathematics teaching

Within the research project that is connected to the DiASper project (funded by the EU Interreg-program), 3D printing will be considered as a learning context. This approach can be distinguished from existing approaches in research: The two main foci in international research are to use 3D printing to visualize (complex) mathematics (see for example Sun & Li, 2017; Dilling et al., 2019; Dilling et al., 2021) or to address the modeling aspect of the digital technology (see for example Aguilar, 2020; Lavicza et al., 2020; Bedewy et al., 2021). Within both approaches 3D printing or parts of 3D printing are used for descriptive mathematics teaching, in which 3D printed objects are used either for lesson preparation or as a visualization opportunity. Consequently, 3D printing can in both research approaches be seen as an effective vehicle to facilitate the students' access to the mathematical content of the individual lessons. Other research studies focus, for example, on the incorporation of CAD software for teaching the concept of volume of solids (see for example Ng, 2017) or art-related mathematical projects (see for example Vanscoeder, 2014; Menano et al., 2019).

In the DiASper project we want to incorporate 3D printing as a *learning context* in mathematics education. Thus, we chose a different focus, as the primary role of 3D printing in this educational context is not specifically to facilitate the learning of mathematical content. Instead, we want to develop teaching ideas for mathematics lessons for Grades 5-13 in which students can learn the curricular mathematics content, on the one hand, and get an idea about the 3D printing processes as part of their digital education and preparation for the digital workplace, on the other hand. The teaching concepts that are created within the project use the four technical processes of 3D printing (modeling, triangulation, slicing, and printing process) to generate learning opportunities for mathematics learning in the context of 3D printing. These learning opportunities are intended to promote students' digital competences in addition to mathematical competences through exposure to a digital technology. Hence, an integration of 3D printing into regular mathematics lessons is pursued. Research questions to be pursued in the DiASper project include how these teaching concepts should be designed (design principles) so that they not only have didactic added value for regular mathematics teaching in terms of promoting mathematical and digital skills, but also give students an insight into the digital workplace.

A.d.i. Conceptual framework

A main focus of this research project is the implementation of the 3D printing process in mathematical school lessons based on the given curricula (educational plans, subject requirements, and schools' internal curricula). This approach and procedure were chosen in order to potentially increase acceptance among teachers, since it must be kept in mind that changes in new content are adopted with greater willingness by teachers if they have a focus on already existing curricular content and can thus be directly integrated into the already existing subject lessons (Lipowsky, 2009). Therefore, we chose to rely on the curriculum of the federal state of Schleswig-Holstein and Denmark to connect existing mathematical content with the four technical processes of 3D printing.

Another goal of the project is to contribute to vocational orientation and preparation with the help of the teaching concepts and by connecting the industry and schools. Therefore, the connection process starts with the general frameworks of the industry and schools. These include for instance competences that are expected from future employees or the current curriculum. The general frameworks of industry and schools result in a list of expectations and needs that have to be addressed or fulfilled by teaching ideas with the intention of their connection. Consequently, the given expectations and needs influence the development of teaching ideas. After developing a teaching idea on the basis of the given curricula, it is evaluated with the help of teachers and industry contacts²⁹ before it is tested in schools. Within these evaluation cycles, the teaching ideas are first presented to teachers. They are asked to comment on the following questions through written feedback:

- Is the concept written in a comprehensible way? (Can I, as a teacher who does not have extensive knowledge of 3D printing, understand the concept? Should aspects be emphasized more clearly or explained better?)
- Are the tasks appropriate for my students in terms of the level of challenge or is greater differentiation needed?
- When I imagine that I, as a teacher, use the exercise blocks given in the teaching concept in my mathematics lessons: Where might I need further help or support? How can this help/support look like?
- Is the connection to 3D printing actually palpable?

While the teachers' evaluation cycle focuses on the feasibility and acceptability of the teaching concept, the evaluation cycle in the industry is dedicated to the authenticity of the integration of 3D printing in the teaching concepts. Within the second evaluation cycle, industry contacts are also asked to comment on a set of questions through written feedback:

- Are the competences addressed in the teaching concept relevant for (future) employees in digital workplaces that use 3D printing and other digital production processes?
- Is there a connection between the actual authentic use of the 3D printing technology in the digital workplace and the use of 3D printing in the teaching concepts?

This concluding evaluation in the process has the purpose of combining theoretical and practical aspects, i.e. the revision of the researchers' theoretical input through practical input of teachers and industry contacts. The creation and evaluation of the teaching ideas is based on the design-based research approach and follows the known

²⁹ The project's industry contacts include contacts from various industries, including medical technology, manufacturing technology and prototype production. Most of the contacts have a focus on the vocational educational perspective, as they are active in the training of future employees.

evaluation cycles of expert feedback, where the experts both stem from schools and industry, and revision (Plomp & Nieveen, 2013).

A.d.ii. 3D printing as a learning context in mathematics education

As the teaching concepts are constructed on the basis of the given curricula, this chapter shows possible points of connection to today's lower and upper secondary mathematics education in Denmark and Germany. The connection points are divided according to the four technical processes of 3D printing (modeling, triangulation, slicing, printing process).

Modeling

Of the various modeling options, only modeling in CAD-software, in which Boolean operators are used to create digital objects, is considered in this research approach. The basis of modeling competence is the understanding of a real situation or if modeling is based on inner-mathematical condition, the understanding of an inner-mathematical situation. This given situation has to be simplified or idealized in a subsequent mental process so that it can be translated into mathematics (Stillmann, 2019). As mathematical modeling³⁰ is one of the six general subject-related skills in mathematics curriculum of the federal state of Schleswig-Holstein (MBWK SH, 2014) as well as the Danish curriculum (BUM, 2019), fostering this competence is one of the central elements in mathematics education.

In the following list elements of the curricula of Denmark and the federal state of Schleswig-Holstein are listed that can be taught using 3D printing as a learning context:

- Drawing a construction of an object that is to modeled on a piece of paper can serve as preparatory measures that can make the modeling process easier.
- To master the transition from a two-dimensional sketch or an idea to a three-dimensional model, students need the ability for spatial visualization. This competence is especially necessary when modeling in the cartographic coordinate system (e.g. when using GeoGebra).
- In order to model a closed solid, students first and foremost need knowledge about solids (e.g. polyhedron on the basis of the definition of the simplex), as basic solids (e.g. cuboids, cubes, pyramids or prisms) can be used in some CAD software in order to construct the final object.
- As already mentioned, Boolean operators are important tools in some CAD programs. With the help of the Boolean operators AND, OR and NOT applied to solids, complex objects can be constructed. The first Boolean operator (union) can already be thematized in lower secondary education as the composition of bodies with disjoint interiors. The second Boolean operator (difference)

³⁰ For further research on mathematical modeling with the help of digital tools, see for example Hankeln (2018) on mathematical modeling with a dynamic geometry software.

does not play a role in the curricula of Denmark and the federal state of Schleswig-Holstein. The third Boolean operator (intersection) is only addressed in the curricula of the lower secondary education in both Denmark and Schleswig-Holstein within the educational area of functional relationships (i.e. special intersections of two or more functions), but not in geometry. On the other hand, the geometric consideration and mathematical discussion of intersections of curves and planes are part of analytic geometry in upper secondary education in both parts of the DiASper project.

- The last mathematical elements that can be thematized within the learning context 3D printing are (point) reflection, rotation and translation. After the object is modeled, it makes sense to think about the optimal printing position of the modeled object. The search for the optimal printing position includes considerations of the object's alignment. As overhanging parts for instance can only be printed with support structures, it could be advisable to mirror or to rotate the modeled object. As a consequence, less structural support is needed during the printing process.

Triangulation

During the triangulation phase the surface of the object is covered with simple geometric shapes, usually triangles or squares. The resulting code can vary depending on the chosen format. The less extensive OFF (Object-file-format)-code can be used to consider the definition of simplexes on the basis of their vertices, as the vertices of the modeled object, each connected by an edge, are specified one by one within this format. Thus, the OFF-code uses only the coordinates of the vertices of the modeled object and can therefore be used for a simple mathematical representation of polyhedron. As a result, only polyhedron can be described with this format, as rounded surfaces cannot be grasped by the code.

Another possibility is the STL (Standard Triangulation Language)-format: Within this format, each surface of the subject is divided into triangles which are the basis for each block of the code. Every code-block of the STL-format is made up of one coordinate set for each vertex as well as the facet normal of the triangle given by the three vertices. Thus, the entirety of the code can be understood as the object resulting from the intersection of two planes each. In the upper secondary education, students learn about parametrical and coordinate descriptions (e.g. parameter form, three-point form, coordinate form or normal form) of lines and planes in the three-dimensional space. Through the previously named consideration of the STL-format as an intersection, the known plane representations can be extended by a form relevant for the digital working world. Moreover, the new form of representing planes and intersections of planes consists of known elements (points that lay on a plane as well as the surface normal).

When looking at the triangulation of rounded surface neither the consideration of the OFF-code as a mathematical representation of polyhedron nor the consideration of the STL-format as an intersection are sufficient. By addressing the triangulation of

Konzeptuelle Rahmenbedingungen

rounded surface, the students can look at limits and limit approximation processes. The finer the net of triangles describing the rounded surface, the better the coverage of it and the higher the final printing resolution. The possibility of approximating rounded surfaces by a net of triangles is based on Leibniz's infinitesimal calculus theory (i.e. that every curve is composed of infinitely many infinitesimally small rectangular pieces).

Slicing

Within the slicing process, control commands are added. Especially the travel path of the extruder head can be content in mathematics education, as the mathematically optimized print-way can be described with the help of trigonometric functions during lower secondary education. This can be done, if the mathematically optimized travel path is considered as a continuous curve which is limited to the area of the layer that is to be printed. In the case of a uniform travel path in a rectangular form, the print-way can be represented by a trigonometric function. Additionally, if the parameters are adjusted, the actual travel path can be approximated. Within the upper secondary education, functional descriptions of the travel path of non-rectangular layers can be addressed.

As the G-code also consists of information regarding the material, the constant distance of the extruder head to the previous material layer can be considered in upper secondary mathematics education in order to be able to record settings related to the movement of the print nozzle. These geometric descriptions, such as the distance of a point (e.g. the extruder head) to a plane (e.g. the last material layer), are part of the analytic geometry curricula both in Denmark and Schleswig-Holstein.

Printing process

The printing process is more of a technical than of a mathematical nature. However, it can be used as an approach for two different mathematical issues:

- Via the printing process, an enactive (i.e. action-based) approach in the sense of Bruner (1966) to Cavalieri's principle can be pursued through the layer-by-layer construction of an object in the process. Different objects which have the same area in each layer can therefore be discussed. However, the principle would then have to be formalized mathematically in further steps.
- In the preparation of teaching students about volumes, printing the same object with different diameters of the extruder head opens up the possibility of thematizing at least the upper sum, since the filling of a surface by 3D printing becomes more accurate the smaller the diameter of the nozzle. However, it is not possible to thematize the lower sum. Consequently, this would have to be substituted accordingly with the help of other enactive processes.

Digital competences in mathematics education

In addition to the mathematical content that can be taught in the learning context of 3D printing and the mathematical competences to be fostered in the emerging teaching

concepts, the implementation of 3D printing also offers opportunities to expand the students' digital competences: By working with a 3D printer, the students are confronted with a digital tool whose potential in the digital working world is currently being expanded. Likewise, the students come into contact with software (e.g. CAD and slicer software). These digital contact points can be used to promote the competences of students to use digital tools according to their needs and to use technical and/or digital tools to plan and carry out development and production processes.

A.d.iii. Example of a teaching idea

A first teaching idea has been developed whose content are composite figures which is part of the Grade 6 curriculum in Germany and Denmark (MBWK SH, 2014; BUM, 2019). In both countries you often find that three-dimensional objects are taught with the help of axonometric depictions. CAD software such as TinkerCAD³¹ also make use of this graphical procedure, but within this program students can look at an object from each side (Eryilmaz & Deniz, 2021). The composition of shapes can also be done easily through a 'drag-and-drop' function. This can be seen as an alternative to putting actual geometrically shaped objects together by hand in geometry lessons. Before teaching about composite figures, students should already have sufficient knowledge about solid geometric figures, such as prisms, cubes, cuboids, cylinders, pyramids and cones.

Every teaching idea consists of different exercise blocks with one of the four technical processes of 3D printing as the learning context. Within this example the technical process of modeling serves as the overall learning context, whereas the concept of humanoid robots is taken as the direct context of the tasks. Within this exercise block students are asked to model humanoid robots and to perform mathematical calculations on given models or those modeled by them. A first task is the construction of a digital version of a humanoid robot based on a given sketch (see figure A.1). In this task students have to master the transition from a two-dimensional sketch to a three-dimensional modeled object. To help students with this transition more information can be given. The two-dimensional sketch that is given Through the use of a two-dimensional coordinate system, the height and the width of the humanoid robot are given, but further measurements can be an example for helpful structures in the task. The information can be given as part of the task: *Aydan has made a sketch for her robotics project. The sketch shows the front of her version of a humanoid robot. Help her with constructing a digital object on the basis of her draft. Every part of the robot should have a depth of 1 cm.*

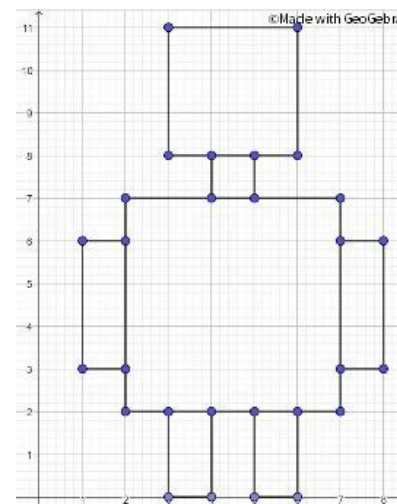


Figure A.1: Given sketch of a humanoid robot

³¹ See further <https://www.tinkercad.com>.

Konzeptuelle Rahmenbedingungen

This exercise can be used to foster both mathematical and digital competences as defined in the Danish and German mathematics curriculum (MBWK SH, 2014; BUM, 2019). As students are asked to model something on the basis of a given sketch, they are going through a modeling process³², in which the given information is taken and built into a new object which has to be constructed by the individual student. Furthermore, the sketch is a mathematical representation that has to be used in order to fulfill the task³³. Students have to take the given information (height and width of the individual elements of the robot as well as the total height) from the sketch and transfer it into a three-dimensional space. To construct a polyhedron (here: cuboids or cubes), the further information of the depth can be used, if necessary. Then, based on the sketch, the students have to assemble the resulting cuboids and cubes to resemble the sketch of the robot. Hereby, students learn to assemble individual basic geometric bodies into a composite figure. Within the task, students are asked to construct a digital object, which means that they have to work with technical elements of mathematics³⁴. Finally, through the use of a digital CAD software (e.g. TinkerCAD), students encounter a digital tool to develop and produce a digital model. They have to be able to use the elements of this digital tool and utilize it in a way that fits the task.

As already mentioned, the task can be adapted to adequately fit the students' individual current state of learning. The above mentioned task could be modified so that it is not based on a given sketch. Thus, the students would be able to work independently in a creative way. To ensure students' progress during the different modeling phase (i.e. planning, constructing a two-dimensional sketch, constructing a three-dimensional model), one can work with different requirements (e.g. requirements about mandatory body-parts) and support structures (i.e. scaffolding).

The above mentioned task can also be used to target the guiding principle of measuring (cf. MBWK SH, 2014; BUM, 2019). By adding extra information like the height of the actual built or printed robot and a question targeting the surface area, the modeling of an object can be combined with actual calculation processes: *Aydan has built her humanoid robot out of cardboard. It has a height of 1.10 m just like Aydan's younger brother. She wants to glue silver paper on its surface so that it looks like a real robot made of metal. How can she calculate, how much paper she will need? Explain and calculate afterwards.* As students are confronted with a problem of how to calculate the surface area, this task would foster their problem-solving skills as well as their mathematical modeling competence and their ability to use mathematical representations (MBWK, SH 2014; BUM, 2019).

³² Competence "Mathematical modeling": K3 - Mathematisch modellieren in the German mathematics curriculum, K2 - Modelling in the Danish mathematics curriculum.

³³ Competence "Using representations": K4 - Mathematische Darstellungen verwenden in the German mathematics curriculum, K4 - Repræsentation og symbolbehandling in the Danish curriculum.

³⁴ Competence "Using symbolic, formal and technical elements of mathematics": K5 - Mit symbolischen, formalen und technischen Elementen der Mathematik umgehen in the German mathematics curriculum, K6 - Hjælpemidler in the Danish curriculum.

A.e. Conclusion

The societal changes connected to the digitalization of the world have affected the private and especially the working world in recent decades and pose new challenges for general school education. Students need to be prepared for elements of the digitalized workplace in general education schools, as they play an integral role in preparing students for the future working world. Therefore, elements of the digitalized workplace should already be integrated into general education subject lessons. Among the innovative digital technologies, 3D printing in particular has an important role in today's digitalized world of work and the potential to remain relevant in the workplace of the future. Additive Manufacturing can be found in production as well as in planning and development processes, so that knowledge of and around 3D printing technology can be beneficial for future employees.

Previous research on 3D printing in mathematics education developed approaches how to use this technology as a vehicle for facilitating learning mathematics (cf. Section 4). Within the present research project, 3D printing will be implemented as a learning context by using the technical processes of 3D printing to address mathematical content in schools in order to enhance students' mathematical competences. In addition to the mathematical competences to be promoted, the teaching concepts also focus on digital competences through the integration of digital tools such as 3D printers and software (for example modeling or slicing software).

The example given in Section 4.3 is taken from the first developed teaching idea in the context of the DiASper project on composite figures. This teaching idea has already gone through the first evaluation cycle and is further coordinated with teachers at different schools in Denmark and Schleswig-Holstein. Initial feedback showed among other results a desire for more in-depth introductions to the various software. The teachers also indicated that a focus should be placed on the differentiability and adaptability of the teaching idea in order to accommodate heterogeneous learning groups. Further feedback from teachers will be used to derive design principles for instructional approaches in mathematics teaching that

- integrate aspects of the digital world of work into mathematics lessons in a way that is appropriate for the learner,
- focus on and promote students' mathematical and digital competences, and
- give students an insight into the digital world of work and associated skills profiles, thereby contributing to career selection and preparation.

In order to finally test these design principles to determine whether teaching ideas, based on the formulated principles, add value to mathematics teaching in schools in Denmark and Schleswig-Holstein, a pre-post testing will be conducted. The teaching concepts will initially be tested only at partner schools of the DiASper project in Schleswig-Holstein (Northern Germany) and the regions Syddanmark and Sjælland (both Southern Denmark). These schools have been equipped with 3D printers in cooperation with the project. The authors are well aware that not all schools in these regions have access to a 3D printer. However, since the teaching concepts use 3D

Konzeptuelle Rahmenbedingungen

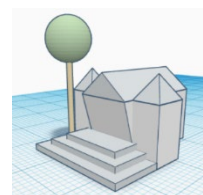
printing as a learning context for regular mathematics lessons instead of a learning content, access to a 3D printer can be deemed as not necessarily crucial, even though it can certainly be seen as beneficial.

Finally, the resulting teaching ideas and materials will be made available via an *open educational resources* (OER) platform to teachers who did not participate in the project or who do not work at a school within the project region. In the long term, all concepts will be made available to teachers via an OER platform that makes it possible to develop them further.

B THEORETISCHES UNTERRICHTSKONZEPT „ZUSAMMENGESetzte KÖRPER“

Das folgende theoretische Unterrichtskonzept ist bereits auf der Projekthomepage (<https://2023.diasper-project.eu/material/>) sowie auf der OER-Plattform fOERde-Plattform (<https://oer.uni-kiel.de/>) veröffentlicht worden.

Im Rahmen des DiASper-Projekts ist dieses Unterrichtskonzept für den Geometrieunterricht der Sekundarstufe I entstanden. Das Konzept ist für die 6.-7. Klasse und auf zwei bis vier Unterrichtsstunden ausgelegt.



B.a. Inhalt und Verknüpfung zu den Fachanforderungen

Inhalt der Unterrichtseinheit sind die geometrischen Grundkörper, die Identifikation von Grundkörpern in zusammengesetzten Körper sowie die Konstruktion von Körpern durch die Zusammensetzung von Grundkörpern (Fachanforderungen S. 29). Innerhalb der Unterrichtssequenz identifizieren die Schüler:innen die Grundkörper, aus denen ein zusammengesetztes Objekt erstellt wurde (Anforderungsbereich I). Hierfür kann die einfach und intuitiv nutzbare Software TinkerCAD³⁵ verwendet werden, die es den Schüler:innen erlaubt, das Schrägbild des Objekts, von jeder Seite zu betrachten (Fachanforderungen S. 29). Mithilfe von vorgegebenen Grundkörpern oder Objekten können die Schüler:innen anschließend selbstständig Körper zu Objekten zusammensetzen (Anforderungsbereich II). Die Anbindung der Aufgabenstellungen an reale Kontexte (z.B. Medizintechnik, Bauplanung) sowie eine Zielorientierung (z.B. das sinnvolle Modellieren eines zusammengesetzten Körpers für ein vorgegebenes Ziel) sind hierbei von Bedeutung, so dass ein mathematischer Fokus auf den Stunden liegt. Auf Basis ihrer alltagsgestützten Vorstellung können die Schüler:innen anschließend virtuelle Modelle von ihnen bekannten komplexeren Objekten aus dem Alltag erstellen (Anforderungsbereich III).

B.b. Lernvoraussetzungen

Die Schüler:innen benötigen Wissen über die verschiedenen Körper (Prisma, Würfel, Quader, Zylinder, Pyramide, Kegel). Ebenso muss in einer einführenden oder vorge-schalteten Stunde über die Konstruktionsmöglichkeiten (beispielsweise das Ausrichten und die Zusammensetzung von Körpern) innerhalb der genutzten CAD-Software gesprochen werden, damit die Schüler:innen in der Lage sind, selber geometrische

³⁵ TinkerCAD ist eine frei verfügbare, webbasierte Anwendung, die die DSGVO erfüllt und keine Installation erfordert.

B Theoretisches Unterrichtskonzept „Zusammengesetzte Körper“

Körper zu einem Objekt zusammen zu setzen³⁶. Eine intuitiv nutzbare Software spart hier Unterrichtszeit.

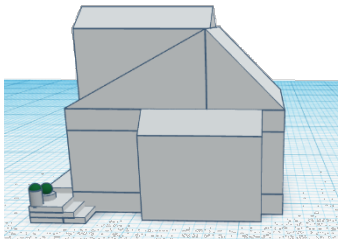
B.c. Ziele

Die Schüler:innen können reale Objekte als Zusammensetzung von geometrischen Grundkörpern modellieren. Dabei können sie die geometrischen Grundkörper, aus denen die Modelle zusammengesetzt sind, erkennen und benennen sowie aus geometrischen Grundkörpern Modelle von Objekten auf Basis von Vorgaben oder Alltagsvorstellungen mit Hilfe von Software konstruieren. Darüber hinaus wird das räumliche Vorstellungsvermögen geschult.

B.d. Vorteil des Vorgehens mit Software

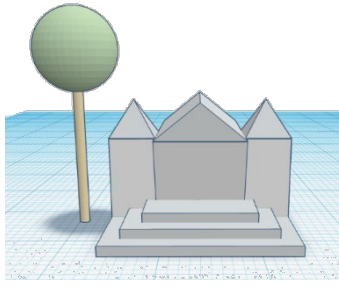
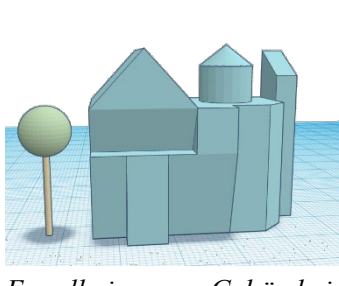
Ein tatsächliches (virtuelles) Zusammensetzen von Grundkörpern ist möglich, welches ansonsten nur mithilfe des Vorstellungsvermögens der Schüler:innen oder dem händischen Zeichnen oder Konstruieren durchführbar war. Damit können auch größere Objekte erstellt werden, die mit Hilfe der Software von allen Seiten betrachtet werden können.

B.e. Mögliche Aufgaben

Nr.	Aufgabenstellung	Schüler:innentätigkeiten	Bezug Fachanforderungen (vgl. 2.2.1)
1.1	 <p><i>Es soll ein neues Gebäude in der Stadt errichtet werden. Das Architekturbüro hat bereits das erste Modell angefertigt. Benenne die geometrischen Grundkörper, aus denen das Haus zusammengesetzt ist.</i></p>	Die SuS benennen ausgewählte Grundkörper (Quader, Würfel, Prismen, Zylinder, Kugeln, Pyramiden) und interpretieren damit das gegebene Schrägbild (FA, S. 29). Einige dieser Körper sind erst erkennbar, wenn das Objekt in TinkerCAD betrachtet und gedreht wird.	Leitidee: Raum & Form Geförderte mathematische Kompetenzen: K2 K5 K7 Geförderte digitale Kompetenzen: K1.2 K5.2

³⁶ Siehe hierfür die Aufgaben zum Kennenlernen der Software TinkerCAD.

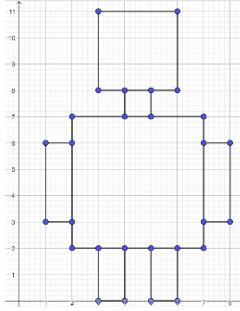
B Theoretisches Unterrichtskonzept „Zusammengesetzte Körper“

<p>1.2</p>	 <p><i>Es soll ein neues Gebäude in der Stadt errichtet werden. Das Architekturbüro hat bereits das erste Modell angefertigt. Benenne die geometrischen Grundkörper, aus denen das Haus zusammengesetzt ist.</i></p>	<p>Wie bei der Aufgabe 1.1.</p>	<p>Diese Aufgabe kann als Differenzierungsmöglichkeit eingesetzt werden. In dieser Modellierung ist das Haus aus einer geringeren Anzahl an Grundkörpern zusammengesetzt.</p>
<p>1.3</p>	 <p><i>Es soll ein neues Gebäude in der Stadt errichtet werden. Das Architekturbüro hat bereits das erste Modell angefertigt. Benenne die geometrischen Grundkörper, aus denen das Haus zusammengesetzt ist.</i></p>	<p>Wie bei der Aufgabe 1.1.</p>	<p>Diese Aufgabe kann als Differenzierungsmöglichkeit eingesetzt werden. In dieser Modellierung sind Prismen mit Quadern verbunden worden, die schwerer erkennbar sein können.</p>
<p>1.4</p>	<p><i>Wie oft findest du die verschiedenen Grundkörper im Bild?</i></p> <p># Quader = _____</p> <p># Würfel = _____</p> <p># Prismen = _____</p> <p># Zylinder = _____</p> <p># Kugeln = _____</p> <p># Pyramiden = _____</p>	<p>Die SuS benennen die Anzahl der Grundkörper in den Bildern der Aufgaben 1.1-1.3.</p>	<p>Diese Aufgabe kann als Differenzierungsmöglichkeit eingesetzt werden, damit die SuS die Grundkörper unter Anleitung entdecken können. Hierbei kann auch auf Inklusionsbeziehungen (jeder Quader ist auch ein Prisma, aber nicht jedes Prisma ein Quader; analog das Verhältnis Würfel - Quader) eingegangen werden.</p>

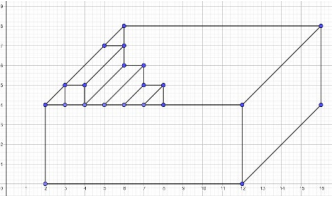
B Theoretisches Unterrichtskonzept „Zusammengesetzte Körper“

1.5	<p><i>Erstelle selber ein Gebäude aus geometrischen Grundkörpern mit Hilfe der Software. Überlege Dir zuerst, wie dein Gebäude aussehen soll und welche Grundkörper geeignet sind. Falls es sinnvoll ist, erstelle zunächst auf einem Blatt eine grobe Skizze.</i></p>	<p>Die SuS konstruieren ein eigenes Schrägbild in der CAD-Software auf Basis vorheriger gezeichneter Überlegungen. Zur Differenzierung können hier Entwurfsideen oder hinzuzufügende Elemente (Schornstein, Türme, Seitenflügel, Fenster simse, Außendekoration, ...) genutzt werden. Ausgewählte konstruierte Gebäude könnten hier ausgedruckt werden.</p>	<p>Leitidee: Raum & Form</p> <p>Geförderte mathematische Kompetenzen: K4 K5 K7</p> <p>Geförderte digitale Kompetenzen: K3.1 K5.2</p>
2.1	<p><i>Für ein Schulprojekt soll Kim einen Roboter aus Würfeln und Quadern bauen. Hilf Kim, indem du mit Hilfe der Software einen Roboter baust. Falls es sinnvoll ist, erstelle zunächst auf einem Blatt eine grobe Skizze.</i></p>	<p>Die SuS modellieren in TinkerCAD einen aus Würfeln und Quadern zusammengesetzten Körper (FA, S. 29). Dabei ist diese Aufgabe binnendifferenzierend, da alle SuS individuell ihren Fähigkeiten entsprechend modellieren können. Ausgewählte Modelle können als Anschauungsobjekte gedruckt werden (hierbei sollte der Roboter „auf dem Rücken liegend“ ausgerichtet sein).</p>	<p>Leitidee: Raum & Form</p> <p>Geförderte mathematische Kompetenzen: K4 K5 K7</p> <p>Geförderte digitale Kompetenzen: K3.1 K5.2</p>

B Theoretisches Unterrichtskonzept „Zusammengesetzte Körper“

<p>2.2</p>	<p><i>Aydan hat für das Projekt bereits eine erste Skizze angefertigt. Diese zeigt den Roboter von vorne. Hilf ihr dabei, die Skizze mit der Software als ein digitales Objekt zu konstruieren. Dabei soll der Roboter an jeder Stelle 1cm tief sein.</i></p> 	<p>Mithilfe der vorgegebenen Skizze zusammengesetzter Grundkörper (Würfel & Quader) modellieren die SuS den Roboter in der CAD-Software als 3D-Objekt. Die Aufgabe kann zur Differenzierung angepasst werden, indem verschiedene Tiefen der einzelnen Körperteile angegeben werden. Ebenso kann zur Differenzierung diese Aufgabe vor Aufgabe 2.1 genutzt werden, so dass die SuS vor dem freien Modellieren geleitet ein digitales Modell erstellen.</p>	<p>Leitidee: Raum & Form</p> <p>Geförderte mathematische Kompetenzen: K4 K5 K7</p> <p>Geförderte digitale Kompetenzen: K3.1 K5.2</p>
<p>2.3</p>	<p><i>Aydan hat ihren Roboter aus stabiler Pappe gebaut. Er ist 1,10m groß geworden, so groß wie Aydans kleiner Bruder. Sie möchte die Flächen jetzt mit silberfarbenen Papier bekleben, damit der Roboter aussieht, als ob er aus Metall ist. Wie kann sie berechnen, wie viel Papier sie braucht? Erkläre und berechne anschließend.</i></p>	<p>Die SuS bestimmen den Oberflächeninhalt des Körpers, der aus Quadern und Würfeln zusammengesetzt ist (FA, S. 27). Diese Aufgabe ist bindendifferenzierend, da die SuS sowohl mit konkreten Werten (aus der Skizze der Aufgabe 2.2) rechnen können, als auch eine Formel für die Berechnung des Oberflächeninhalts erstellen können. Unterstützend könnte hier die Hilfestellung gegeben werden, dass der in 2.2 erstellte Roboter von jeder Seite (inklusive von oben und von unten) betrachtet werden und jedes Mal der Flächeninhalt der sichtbaren Fläche berechnet werden soll.</p>	<p>Leitidee: Messen</p> <p>Geförderte mathematische Kompetenzen: K3 K4 K7</p>

B Theoretisches Unterrichtskonzept „Zusammengesetzte Körper“

<p>3.1</p>	<p><i>Hannes möchte für seine Schildkröten Scooby und Doo eine neue Badeschale herstellen. Dafür hat er bereits eine Skizze erstellt. Die Badeschale soll ein Quader sein und vier Stufen haben. Hilf ihm dabei, die Skizze mit der Software als ein digitales Objekt zu konstruieren.</i></p> 	<p>Mithilfe der vorgegebenen Skizze modellieren die SuS die Badeschale in der CAD-Software als digitales Objekt, das aus Grundkörpern (Würfel & Quader) zusammengesetzt ist.</p>	<p>Leitidee: Raum & Form</p> <p>Geförderte mathematische Kompetenzen: K4 K5 K7</p> <p>Geförderte digitale Kompetenzen: K3.1 K5.2</p>
<p>3.2</p>	<p><i>Die Badeschale für Hannes' 5cm große Wasserschildkröten muss mindestens 60 Liter fassen können. Dabei soll die Breite und der Wasserstand des Beckens sechs Mal so groß sein wie die Schildkröten. Erkläre, wie du die minimale Länge des Beckens bestimmen kannst und berechne sie anschließend.</i></p>	<p>Die SuS nutzen die ihnen bekannten Formeln zur Volumenberechnung von Würfeln und Quadern, um die fehlende Länge des Beckens zu bestimmen. Zu Differenzierungszwecken könnte zunächst das Volumen des digital erstellten Modells berechnet werden.</p>	<p>Leitidee: Messen</p> <p>Geförderte mathematische Kompetenzen: K3 K4 K5 K7</p>

B.f. Legende „Digitale Kompetenzen“

Für eine bessere Lesbarkeit wurden in der Auflistung der Aufgabenstellungen nur die Abkürzungen für die digitalen Kompetenzbereiche erwähnt. Hier sollen die angesprochenen Kompetenzen kurz erläutert werden³⁷.

- K1: Suchen, Verarbeiten und Aufbewahren
 - K1.2: Auswerten und Bewerten
- K3: Produzieren und Präsentieren
 - K3.1: Entwickeln und Produzieren
- K5: Problemlösen und Handeln
 - K5.2: Werkzeuge bedarfsgerecht einsetzen

³⁷ Für weitere Informationen siehe: MBWK SH. 2018. *Ergänzung zu den Fachanforderungen. Medienkompetenz – Lernen mit digitalen Medien. Allgemein bildende Schulen, Sekundarstufe I, Sekundarstufe II*. Kiel: Schmidt & Klaunig.

C ERSTER EVALUIERUNGSZYKLUS

Im Folgenden sollen die gesammelten Antworten der Lehrkräfte des ersten Evaluierungszyklusses in anonymisierter Form dargestellt werden. Dabei haben nicht alle Lehrkräfte auf alle Fragen geantwortet.

Frage 1:

Ist das Konzept verständlich formuliert? (Kann ich als Lehrkraft, die kein umfangreiches Wissen zum 3D-Druck hat, dieses Konzept verstehen? Müssten Aspekte deutlicher hervorgehoben oder besser erklärt werden?)

- Ja, in dem Konzept wird der 3D-Druck ja wenig beleuchtet. Die Lernvoraussetzungen sind eindeutig formuliert und passend zu den Aufgaben. Ich denke aber, dass die SuS mehr Zeit für das Kennenlernen der Software benötigen. Eine Stunde reicht dafür nicht, hierfür müssten auch Übungsaufgaben erstellt werden. Die Erfahrung aus einer 7. Klasse zeigt, dass die SuS eher 2-3 Stunden brauchen um das Programm sinnvoll nutzen zu können.
- Meiner Meinung nach ist das Konzept verständlich erklärt. Eine "tiefergehendes" Kenntnis von Tinkercad® kann vorteilhaft sein, etwa Kenntnis über das Einbinden des Lineals zur direkten Anzeige von Maßen an den Objekten. Grundsätzlich sollte das Konzept mit grundlegendem Wissen über die Software funktionieren.
- Ich finde das Konzept schlüssig erklärt. Ich habe eine gute Vorstellung, was gemacht werden soll und welche Ziele im Blick sind.
- Die Aufgaben sind verständlich formuliert. Ob man ohne Vorwissen zum 3D-Druck alles durchführen kann hängt, glaube ich, von der CAD-Software ab. Ich glaube, dass die meisten Schwierigkeiten mit der Bedienung der Software kommen werden (geschweige davon, genügend PCs dafür zu haben).

Frage 2:

Sind die Aufgaben vom Anforderungsniveau passend oder werden größere Differenzierungsmöglichkeiten benötigt?

- Wenn die SuS vorher bereits die Formen kennengelernt haben, sind die Aufgaben angemessen (Bei uns stehen die geometrischen Grundkörper erst in Klasse 9 im Fachcurriculum).
- Für Aufgabe 2.1. reicht bestimmt eine kurze Einführung in Tinkercad®. Für Aufgabe 2.2 benötigt es aber bestimmt mehrere Stunden Einführung in das Programm. Die anderen Aufgaben sind passend und machbar für die SuS.

C Erster Evaluierungszyklus

- Die Aufgaben erscheinen für eine "Durchschnittsklasse" angemessen. Insbesondere IT-affine Schüler:innen könnten über diese Herangehensweise vermutlich schnell nutzen, um eine räumliche Anschauung zu entwickeln.
- Durch die vielen individuell zu erstellenden Körper ist ausreichend Differenzierung gegeben. Es mag komisch klingen, aber ich würde das so mit meiner 8. Klasse machen und definitiv 2-4 Stunden Wiederholung vorwegschicken müssen. Dann sollte es aber machbar sein.
- Aufgabe 2.3 dürfte meine SuS schon sehr fordern. Das werden nicht alle schaffen, aber das ist auch nicht mein Anspruch. Die Berechnung von Oberflächeninhalten ist für einige nur im Bereich der einfachsten Flächen (Rechteck & Quadrat) möglich. Da würde ich spontan beim Bearbeiten Hilfestellung geben, bzw. den zusammengesetzten Körper stark vereinfachen.
- Aufgabe 3 ist nur was für meine ganz starken SuS. Die müssen aber auch mal an ihre Grenzen kommen. Würde ich so lassen.
- Zu den Aufgaben selbst habe ich nicht viel zu ergänzen oder sagen. Die Niveau ist fast überall richtig. Wie gesagt, die Schwierigkeiten werden in der Software-Bedienung sein.
- Bei Aufgabe 2, wurde ich überlegen, ob 2.1 eher am Ende kommen soll, nachdem ein Beispiel mit Aufgaben 2.2 gegeben ist. Und Aufgabe 2.3 ist zwar gut zur Oberflächeninhalt aber sie wird zu viel Rechenarbeit sein. Es dauert ziemlich lange, die gesamte Oberflächeninhalt zu berechnen. Aufgabe 3 finde ich besonders gut gelungen.

Frage 3:

Wenn ich mir vorstelle, dass ich als Lehrkraft diese Aufgabenblöcke mit meiner Lerngruppe durchführe: Wo benötige ich ggf. weitere Hilfe und Unterstützung? Wie kann diese Hilfe/Unterstützung aussehen?

- Ich persönlich hätte mit den Aufgabenblöcken als Lehrkraft keine Probleme, da ich bereits mit Tinkercad® gearbeitet habe. Auch könnte ich den Inhalt einfach vermitteln. Ich könnte mir aber vorstellen, dass eine andere Lehrkraft detaillierte Aufgaben mit Lösungen und Arbeitsschritten benötigt um die Schülerinnen und Schüler gezielt unterstützen zu können.
- Zeitliche Vergleichswerte für das Modellieren, wo muss ein Cut gesetzt werden
- Einführung für Modellierung in Tinkercad®
- Wenn ich das jetzt so durchführen sollte, würde ich mir vorher eine Einführung in Tinkercad® wünschen. Hab mir das mal angeguckt und das ist sehr intuitiv, aber ein paar Feinheiten haben sich mir nicht sofort erschlossen. Da wäre es schön, wenn man die Aufgaben vorher unter Anleitung mal durchgehen könnte, um das Programm weitgehend verstanden zu haben.
- Hilfe auch für die Lehrer wird hauptsächlich eine Einweisung zur Software. Wenn sie tatsächlich sehr intuitiv ist, dann geht's. Wenn nicht, dann ist man meist damit beschäftigt

Frage 4:

Wird in dem Konzept der Bezug zum 3D-Druck deutlich?

- Ja, der Bezug ist sichtbar. Jedoch habe ich bei den Aufgaben Zweifel an dem Mehrwert durch den 3D-Druck. Der Mehrwert besteht schon in der dreidimensionalen Zeichnung am Computer. Würde ich diese Aufgabenblöcke auf Papier bearbeiten lassen wäre das grundsätzlich auch möglich, jedoch ist dies mit der Unterstützung von Tinkercad® und dem räumlichen Zeichnen deutlich besser. Der 3D-Druck wird nur kurz als weiterführende Möglichkeit erwähnt. Hat, meiner Meinung nach, zu wenig Mehrwert.
- Der Bezug wird deutlich. Vielleicht könnte man darauf hinweisen, dass die Lehrkraft z.T. ausgedruckte Modelle in den Unterricht mitbringt. Somit könnte man eine haptische Komponente, insbesondere für schwächere Schüler:innen, oder Schüler:innen, die in dem Umgang mit der Software Probleme aufweisen, schaffen.
- Der 3D-Druck ist der eindeutige praktische Bezug zum Thema. Das Drucken einiger erstellter Körper wird ein absolutes Highlight werden!
- Der Bezug zum 3D-Druck ist erkennbar aber könnte in den Aufgaben noch mehr hervorgehoben werden.

Darüber hinaus wurden auch weitere Anmerkungen und Vorschläge von den Lehrkräften aufgenommen, die im Folgenden dargestellt werden sollen:

- Weitere einführende Stunden zur Software: Dabei könnten die SuS natürlich mit dem Geometriethema arbeiten. Spontan gedachte Beispiele (es gibt bestimmt sinnvollere Aufgaben): Zeichne einen Quader mit dem Volumen von 10mm^3 , zeichne eine Pyramide mit dem Volumen von 10mm^3 . Dann könnten beide ausgedruckt werden und verglichen werden. Oder: zeichne einen Quader und eine Pyramide, beide sollen die selbe Höhe haben. Vergleiche das Volumen beider Modelle, indem du beide mit Wasser füllst. Bei den Aufgaben gäbe es einen erheblichen Mehrwert durch den 3D-Druck, da die SuS vom reinen Zeichnen auf Papier wegkommen und die Volumenformeln "anfassen" können.
- Bei Aufgabenblock 1 könnte der Maßstab der Modelle von den Schüler:innen thematisiert werden (Das Gebäude ist doch nicht ... mm groß). Zudem kommt im folgenden Teil die Formulierung "Falls es sinnvoll ist, erstelle zunächst auf einem Blatt eine grobe Skizze.". Vielleicht könnte man das eher auf die Schüler:innen zuschneiden "Falls es für DICH sinnvoll erscheint".
- Auch schon für die fünfte Klasse vorstellbar, Leitfaden Tinkercad® für Lehrkräfte erstellen (Achtung Einführung mit den SuS soll nicht vorgreifen → Leitfaden für Tinkercad® und wie mit den SuS eingeführt werden kann)
- Achtung, kein Farbdrucker an Schulen! Farben beachten
- Aufgabe 1: guter Einstieg, Möglichkeit (durchgehen verschiedene Gebäude → das erste alleine, ein zweites mit deinem Partner), fehlt: Nutze dafür Tinkercad® (Möglichkeit Objekte zu „verstecken“ → Achte auf versteckte Objekte,

C *Erster Evaluierungszyklus*

Vogelperspektive?); Checklisten erstellen, 1.4. für jedes Bild, Überprüfung als LK schwierig für 1.1-1.3 Nummerierung der Teilkörper, Färbung der Teilkörper als Überprüfung, 1.4 Integration in 1.1-1.3; Aufgabe 2: 2.1 könnte als Einstieg schwierig sein (Was soll ich machen?) → Hilfskärtchen beispielsweise mit halbem Roboter, vielleicht mit Obergrenze an Körpern, möglicherweise mit einem Bild damit eine Vorstellung zum Roboter geben kann. Zeitlicher Aspekt; 2.2: Begriff: tief (??) check wie heißt bei Tinkercad® → Roboter (vielleicht zu 2.1 Bild → Beschriftung mit Höhe, Breite, Tiefe); Aufgabe 3: Bild beschriften (Abstand zur Seite) oder mit Grauschattierungen arbeiten, perspektivisch; 3.2 sehr schwer Kubikzentimeter zu Liter mit Tipp, hier differenzieren, zunächst ohne Treppe (Schildkröte fällt rein, deswegen Treppe), Bild beschriften; Zur Hilfe Zwischenergebnisse angeben?

- Sozialform benennen, variieren, wie wird verglichen?
- Erster Aufgabenblock super, die anderen eher für 9. Klasse denkbar (GMS!)
- Es ist ein gutes Konzept, aber der Zeitrahmen ist viel zu eng gefasst. Für die 6. Klasse kommt die Einheit evtl. etwas zu früh. Eine zweidimensionale Darstellung am Computer in die eigene räumliche Vorstellung zu übertragen bzw. umgekehrt, dürfte einigen Schülerinnen und Schülern anfänglich Schwierigkeiten bereiten.
- Der Umgang mit Tinkercad® erfordert schon erhöhte Koordinationskompetenzen, insbesondere das gegenseitige Ausrichten von Objekten. Die vorweg durchzuführende Unterrichtseinheit zur Einführung in Tinkercad® wird daher sehr viel mehr Zeit in Anspruch nehmen. Die Erstellung der zugehörigen Objekte in Tinkercad® dürfte nach der Einarbeitungsphase dann kein Problem darstellen.
- zu 2.3: Teilweise sind die zu berechnenden Flächen im Modell nicht sichtbar z.B. am Hals und zwischen den Beinen. Das verlangt große Selbstorganisation. Den Weg über den Umfang der Figur zur Berechnung der Seitenflächen werden nur wenige von selbst erkennen.

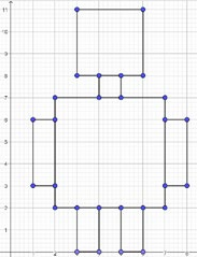
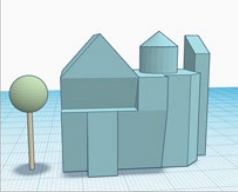
D VORSTELLUNG DES UNTERRICHTSKONZEPTS FÜR DIE INDUSTRIE-VERTRETER:INNEN

Das DiASper-Projekt möchte im Rahmen des regulären Schulunterrichts (hier: Mathematik) Aspekte der digitalen Arbeitswelt (hier: 3D-Druck) thematisieren.

In verschiedenen Klassenstufen soll dazu der 3D-Druck und seine technischen Prozesse (Modellierung, Triangulation, Slicing, Druckphase) verwendet werden, um Schülerinnen und Schülern Einblicke in dieses Verfahren zu ermöglichen.

Damit soll bereits jüngeren Schülerinnen und Schülern ein Zugang zum raumgeometrischen Modellieren mit einer Modellierungssoftware ermöglicht und der erste Schritt im 3D-Druckprozess thematisiert werden. CAD-Programme haben in der digitalen Arbeitswelt eine wichtige Bedeutung, so können insbesondere Entwürfe, die früher analog erstellt wurden (z.B. technische Zeichnungen mit Reißbrettern), digital erstellt und gespeichert werden. Ein früher Zugang zu vereinfachten oder didaktisch angepassten CAD-Programmen (hier: TinkerCAD) soll den Lernenden einen ersten authentischen Zugang zu einer solchen Modellierungssoftware ermöglichen.

In der folgenden Tabelle finden Sie als kompakten Überblick Unterrichtsaktivitäten zum geometrischen Lerninhalt „Zusammengesetzte Körper“ für die 6./7. Klasse.

	Aktionen im Unterrichtsgeschehen	Beispielbilder von Aufgaben
Umgang mit Modellierung	Erstes Kennenlernen von Modellierungssoftware, die nicht nur für den 3D-Druck, sondern auch fürs Laserschneiden, Fräsen, etc. genutzt werden kann Modellierungen auf Basis von Alltagsvorstellungen, Vorgaben und Skizzen (siehe Abbildung rechts)	
Modellierung in TinkerCAD	Identifikation von Grundkörpern in zusammengesetzten Körpern (beispielhafte Aufgabenstellung zum Bild rechts: <i>Es soll ein neues Gebäude in der Stadt errichtet werden. Das Architekturbüro hat bereits das erste Modell angefertigt. Benenne die geometrischen Grundkörper, aus denen das Haus zusammengesetzt ist.</i>) Konstruktion von Körpern durch die Zusammensetzung von Grundkörpern (hierbei eigenständige Konstruktionen sowie Konstruktionen aus realen Kontexten, wie z.B. Medizintechnik oder Bauplanung) → Modellierung auf Basis der Booleschen Operatoren (AND, OR, NOT) angewandt auf Volumenkörper (Vereinigung, Schnittmenge, Differenz)	

E PRAKTISCHES UNTERRICHTSKONZEPT „ZUSAMMENGESETZTE KÖRPER“

Das folgende praktische Unterrichtskonzept (Stundenraster + Arbeitsblätter) ist bereits auf der OER-Plattform fOERde-Plattform (<https://oer.uni-kiel.de/>) veröffentlicht worden.

E.a. Stunde 1 (45 Minuten)

Thema der Einheit: Zusammengesetzte Körper im Lernkontext 3D-Druck

Thema der Stunde: Geometrische Körper in Zusammengesetzten Körpern entdecken

Stundenziel: Indem die Schüler:innen geometrische Körper entdecken, aus denen Gebäude zusammengesetzt wurden sowie eigenständig Gebäude aus geometrischen Grundkörpern zusammensetzen, können sie digitale Werkzeuge (hier: Tinkercad®) für die dreidimensionale Zusammensetzung von Körpern nutzen.

Hauptintention der Stunde: Kennenlernen von zusammengesetzten Figuren, Erkennen von geometrischen Grundkörpern in zusammengesetzten Figuren

ZEIT	PHASE	LEHRKRÄFTEIMPULS/SCHÜLER:INNENAKTION	AKTIONS- UND SOZIALFORM	MEDIEN
10'	Einstieg	„Ordnet die gezeigten Körper den Bezeichnungen zu.“	UG	Tinkercad®
10'	Wiederholung	„Nenne Eigenschaften eines Quaders/Würfels/Zylinders/Prismas/Kegels, einer Pyramide/Kugel.“	UG	
		Quader: gegenüberliegende Flächen gleich groß & parallel Würfel: alle Flächen gleich groß & parallel zur gegenüberliegenden Pyramide: Grundfläche n-Eck, Spitze, Verbindung von Grundfläche und Spitze durch Dreiecke Kegel: Grundfläche Kreis, Spitze [...]		

E Praktisches Unterrichtskonzept "Zusammengesetzte Körper"

ZEIT	PHASE	LEHRKRÄFTEIMPULS/SCHÜLER:INNENAKTION	AKTIONS- UND SOZIALFORM	MEDIEN
15'	Erarbeitung	„In Hamburg/Kiel/NMS/... sollen neue Gebäude gebaut werden. Das Architekturbüro hat bereits eine erste Skizze erstellt. Betrachtet die Skizze und benenne die geometrischen Grundkörper, aus denen das Gebäude zusammengesetzt ist.“	EA	AB1: Geometrische Häuser
	Sicherung	„Das Architekturbüro hat ebenfalls ein erstes dreidimensionales Modell angefertigt. Betrachtete dieses und überprüfe deine Liste der geometrischen Grundkörper. Was fällt euch dabei auf?“	PL	Tinkercad®, Weibergabe der Tinkercad-Modelle über Tinkercad®-Klasse
Did. Reserve		„Baue sinnvoll die geometrischen Grundkörper an das Gebäude, die bisher nicht vertreten sind.“		Tinkercad®
10'	Übung	Es sollen weitere Gebäude gebaut werden. Auch hiervon gibt es bereits Modelle. Betrachtete mindestens eines der beiden Gebäude und benenne die geometrischen Grundkörper, aus denen dieses zusammengesetzt ist.“	EA/PA	AB2: Geometrische Häuser Tinkercad®
	Abschließende Sicherung		PL	

E Praktisches Unterrichtskonzept "Zusammengesetzte Körper"

E.b. Stunde 2 (90 Minuten)

Thema der Einheit: Zusammengesetzte Körper im Lernkontext 3D-Druck

Thema der Stunde: Konstruktion erster eigener Zusammensetzungen

Stundenziel: Indem die SuS die zunächst geleitet und anschließend frei CAD-Software Tinkercad® kennenlernen und nutzen, setzen sie geleitet und eigenständig Figuren aus geometrischen Grundkörpern zusammen.

Hauptintention der Stunde: Grundlagen Tinkercad®, Konstruktion von zusammengesetzten Körpern

ZEIT	PHASE	LEHRKRÄFTEIMPULS/SCHÜLER:INNENAKTION	AKTIONS- UND SOZIALFORM	MEDIEN
30'	Einstieg	<p>„In der letzten Stunde haben wir Modelle geometrischer Häuser betrachtet, die ein Architekturbüro geplant hat. Das Architekturbüro kann die dreidimensionalen Modelle nicht mehr finden und bittet jetzt euch, diese noch einmal nachzubauen.“</p> <p>Ggf. wenn nötig Erläuterung von Möglichkeiten in Tinkercad®</p>	EA + ggf. Abgleich von Modell und Bild durch Partner	AB3: Geometrische Häuser Tinkercad®
40'	Erarbeitung	<p>„Das Architekturbüro fragt in ganz Geesthacht nach, ob noch jemand tolle Ideen für ein geometrisches Haus hat. Für diese Ausschreibung sollen am Ende der Stunde die drei schönsten Häuser von euch ausgewählt werden. Konstruiere dein geometrisches Haus in der CAD-Software.“</p>	EA	AB4: Geometrische Häuser Tinkercad®

E Praktisches Unterrichtskonzept "Zusammengesetzte Körper"

ZEIT	PHASE	LEHRKRÄFTEIMPULS/SCHÜLER:INNENAKTION	AKTIONS- UND SOZIALFORM	MEDIEN
20'	Sicherung	<p>„In der Planung von Häusern werden oft erste kleine Modelle gedruckt, sodass man sich das Endprodukt besser vorstellen kann. Das Architekturbüro möchte für die weitere Planung die drei schönsten Häuser von euch berücksichtigen – dafür müssen wir als Klasse die drei schönsten Häuser wählen. Klebe deinen/deine Klebepunkt/e an das/die Haus/Häuser, die du am schönsten und am besten gelungen findest.“</p>	<p>Museumsrundgang</p>	<p>Post-its/Klebepunkte Tinkercad®</p> <p>ggf. Vorbereitung der nächsten Stunde: Druck der 3 Häuser</p>

E.c. Stunde 3 (45 Minuten)

Thema der Einheit: Zusammengesetzte Körper im Lernkontext 3D-Druck

Thema der Stunde: Überführung zweidimensionaler Skizzen in dreidimensionale Modelle

Stundenziel: Indem die Schüler:innen zweidimensionale Skizzen in dreidimensionale Modelle überführen, fördern sie ihr räumliches Vorstellungsvermögen.

Hauptintention der Stunde: Überführung von zweidimensionalen Skizzen in dreidimensionales Modell, Oberflächenberechnung

E Praktisches Unterrichtskonzept "Zusammengesetzte Körper"

ZEIT	PHASE	LEHRKRÄFTEIMPULS/SCHÜLER:INNENAKTION		AKTIONS- UND SOZIALFORM	MEDIEN
30'	Einführung + Erarbeitung	<p>„Für ein Schulprojekt sollen in Aydans Klasse verschiedene Roboter modelliert werden. Aydan hat dafür schon eine Skizze von vorne und von der Seite angefertigt. Die Roboter sollen anschließend im 3D-Drucker ausgedruckt werden. Hilf Aydan, indem du ihre Skizzen zu einem dreidimensionalen Modell ihres Roboters zusammenführst.“</p> <p>OBS! Achtung die Skalenwerte unterscheiden sich, hierauf aufmerksam sein.</p>	<p>SuS erhalten zwei zweidimensionale Skizzen mit verschiedenen Ansichten des Roboters. Diese müssen zusammengeführt werden zu einem dreidimensionalen Modell</p>	EA	AB1: Roboterprojekt Tinkercad®
15'	Sicherung	<p>Abgleich mit der Vorlage des dreidimensionalen Modells des Roboters</p> <p>Einführung Oberflächeninhalt von dreidimensionalen Körpern ggf. enaktiv mit Lineal aufbauen, SuS die Kanten nachmessen lassen als Vorbereitung für die Berechnungen der nächsten Stunde</p>		PA	Vorbereitung: Klassensatz Roboter Tinkercad®
Did. Reserve		<p>„Stell dir vor, wir würden als Klasse ebenfalls an diesem Roboterprojekt teilnehmen. Erläutere, welche Funktionen dein Roboter haben soll. Was würde dich in deinem Alltag unterstützen? Notiere, welche Fähigkeiten, dein Roboter haben sollte.“</p>	<p>Vorbereitende Notizen für die Modellierung in der nächsten Stunde</p>	EA	Tinkercad® AB3: Roboterprojekt

E Praktisches Unterrichtskonzept "Zusammengesetzte Körper"

E.d. Stunde 4 (90 Minuten)

Thema der Einheit: Zusammengesetzte Körper im Lernkontext 3D-Druck

Thema der Stunde: Zusammengesetzte Körper und ihre Oberflächeninhalte

Stundenziel: Indem die Schüler:innen Berechnungen an dem zuvor erstellten dreidimensionalen Modell durchführen, wiederholen sie die Oberflächenberechnung von Quadern.

Hauptintention der Stunde: Oberflächenberechnung zusammengesetzter Körper

ZEIT	PHASE	LEHRKRÄFTEIMPULS/SCHÜLER:INNENAKTION	AKTIONS- UND SOZIALFORM	MEDIEN
40'	Einführung + Erarbeitung	<p>„Aydans kleines 3D-gedrucktes Robotermodell entspricht noch nicht ganz ihren Vorstellungen des Roboters. Deswegen überlegt sie, den Roboter mit Silberfolie zu bekleben. Erkläre, wie sie berechnen kann, wie viel Silberfolie sie benötigt und berechne anschließend.“</p> <p>Ggf. Vertiefung: „Erkläre, wie du aus deiner Berechnung herausfinden kannst, wie viel Papier sie braucht, wenn der Roboter 10-Mal so groß ist“</p>	EA	AB2: Roboterprojekt Tinkercad® (ggf. Hilfestellung mit fertigem Roboter) Ggf. gedruckter Roboter
Abschließende Sicherung		<p>Kopf: $3\text{cm} \times 3\text{cm} \times 2\text{cm}$, Oberfläche_{Kopf} = 42cm^2 Hals: $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 1\text{cm}$, Oberfläche_{Hals} = 6cm^2 Arme: $1\text{cm} \times 3\text{cm} \times 1\text{cm}$, Oberfläche_{Arme} = $2 \cdot 14\text{cm}^2$ Torso: $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 2\text{cm}$, Oberfläche_{Torso} = 90cm^2 Beine: $1\text{cm} \times 2\text{cm} \times 1\text{cm}$, Oberfläche_{Beine} = $2 \cdot 10\text{cm}^2$</p> <p>Doppelte Flächen: Hals-Kopf: $2 \cdot 1\text{cm} \cdot 1\text{cm} = 2 \cdot 1\text{cm}^2$ Hals-Torso: $2 \cdot 1\text{cm} \cdot 1\text{cm} = 2 \cdot 1\text{cm}^2$ Torso-Arme: $2 \cdot 2 \cdot 3\text{cm} \cdot 1\text{cm} = 4 \cdot 3\text{cm}^2$ Torso-Beine: $2 \cdot 2 \cdot 1\text{cm} \cdot 1\text{cm} = 4 \cdot 1\text{cm}^2$ Gesamtoberfläche: Oberfläche_{Gesamt} = Oberfläche_{Kopf} + Oberfläche_{Hals} + Oberfläche_{Torso} + Oberfläche_{Arme} + Oberfläche_{Beine} – Oberfläche_{Überlappungen} = 186cm^2 – $20\text{cm}^2 = 166\text{cm}^2$</p>	PL	

E Praktisches Unterrichtskonzept "Zusammengesetzte Körper"

ZEIT	PHASE	LEHRKRÄFTEIMPULS/SCHÜLER:INNENAKTION	AKTIONS- UND SOZIALFORM	MEDIEN
50'	Transfer	<p>„Überlege dir, welche Funktionen dein Roboter haben soll. Was würde dich in deinem Alltag unterstützen? Überlege dazu, welche Fähigkeiten er haben sollte und überlege dir ein zur Funktion passendes Design. Achte dabei darauf, dass dein Roboter funktionell ist. Skizziere freihand, wie dein Roboter aussehen soll, bevor du anfängst zu modellieren. Nutze gerne die Bilder zur Inspiration. Überlege dir einen passenden Namen für deinen Roboter“</p>	EA	<p>AB3: Roboterprojekt Tinkercad® ggf. Im Anschluss an diese Stunde: Druck der Roboter</p>
Did. Reserve		<p>„Überlege dir ein Tätigkeitsfeld und ein Beispiel, wie dein Roboter eingesetzt werden kann und verschriftliche dies.“</p> <p>Oder</p> <p>Kurzweiliger „Design-Wettbewerb“: Vorgabe einer Funktion (z.B. Tafel wischen), Kreation eines dazu passenden funktionellen Designs.</p> <p>Oder</p> <p>Museumsrundgang mit den modellierten Robotern.</p>		<p>AB3: Roboterprojekt</p>

E Praktisches Unterrichtskonzept "Zusammengesetzte Körper"

E.e. Stunde 5 (45 Minuten)

Thema der Einheit: Zusammengesetzte Körper im Lernkontext 3D-Druck

Thema der Stunde: Zusammengesetzte Körper und ihr Fassungsvermögen

Stundenziel: Indem die Schüler:innen zweidimensionale Skizzen in dreidimensionale Modelle überführen, fördern sie ihr räumliches Vorstellungsvermögen. Indem die Schüler:innen Berechnungen an dem zuvor erstellten dreidimensionalen Modell durchführen, wiederholen sie die Volumenberechnung von Quadern.

Hauptintention der Stunde: Überführung von zweidimensionalen Skizzen in dreidimensionales Modell, Volumenberechnung

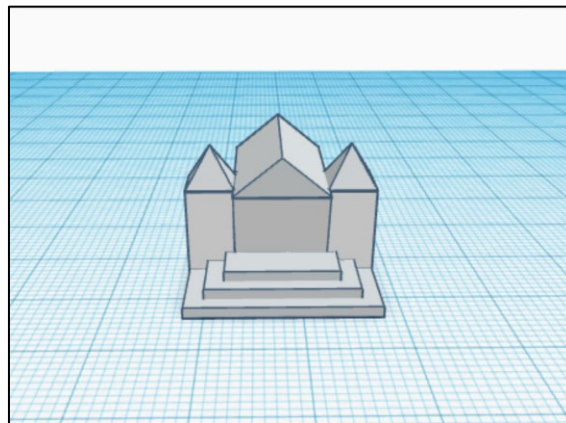
ZEIT	PHASE	LEHRKRÄFTEIMPULS/SCHÜLER:INNENAKTION	AKTIONS- UND SOZIALFORM	MEDIEN
25'	Einführung + Erarbeitung I	<p>„Hannes möchte für seine zwei Wassertankschalen eine neue Wassertankschale drucken. Diese soll aussehen, wie ein ganz normales Schwimmbecken. Er hat mit einem Spezialisten gesprochen. Dieser hat ihm folgende Bedingungen für die Innenmaße des Beckens gesagt: Das Becken muss innen fünf Mal so breit und hoch sein wie seine Wassertankschalen sind. Und es soll doppelt so tief wie hoch sein.“</p> <p>Hilf Hannes und konstruiere das Becken für seine Wassertankschalen.“</p> <p>OBS! Es gibt hierfür zwei Herangehensweisen, das Zusammenbauen von 5 Quadern oder die Nutzung eines Quaders und einer Bohrung.</p>	EA/PA	<p>AB1: Wassertankschale für Wassertankschalen Tinkercad® Ggf. zur Unterstützung: Modell des Beckens</p>

E Praktisches Unterrichtskonzept "Zusammengesetzte Körper"

ZEIT	PHASE	LEHRKRÄFTEIMPULS/SCHÜLER:INNENAKTION		AKTIONS- UND SOZIALFORM	MEDIEN
20'	Erarbeitung II Abschließende Sicherung	„Erkläre, wie du berechnen kannst, wie viel Wasser Hannes benötigt, um das Becken randvoll zu füllen.“	Berechnung des Fassungsvermögens des inneren Quaders. Maße: $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 60\text{cm}$, $\text{Volumen}_{\text{Becken}} = 54000\text{cm}^3 \hat{=} 54 \text{ Liter}$	in-EA PL	ABI: Badeschale für Schildkröten
Did. Reserve		„Hannes möchte gerne noch 4 Treppenstufen an der kurzen Seite des Beckens einfügen. Diese sollen jeweils 3cm tief sein. Er beschließt, dass sie über die ganze Höhe des Beckens verlaufen und jeweils gleich hoch sein sollen. Berechne, wie viel Wasser Hannes jetzt braucht.“	Maße der obersten Stufe: $30\text{cm} \times 30 \cdot 4 = 7,5\text{cm} \times 3\text{cm}$, $\text{Volumen}_{\text{kleinste Stufe}} = 675\text{cm}^3$ Zweimal (Dreimal, Viermal) die kleinste Stufe zusammengesetzt ergibt die zweite (dritte, vierte) Treppenstufe. Es folgt: $\text{Volumen}_{\text{Stufen}} = 675\text{cm}^3 + 2 \cdot 675\text{cm}^3 + 3 \cdot 675\text{cm}^3 + 4 \cdot 675\text{cm}^3 = 6750\text{cm}^3$ $\hat{=} 6,75 \text{ Liter}$ Er braucht nun also 47,25 Liter.	EA	ABI: Badeschale für Schildkröten

AB1: Geometrische Häuser

Es soll ein neues Gebäude in der Stadt errichtet werden. Das Architekturbüro hat bereits das erste Modell angefertigt. **Benenne** die geometrischen Grundkörper, aus denen das Haus zusammengesetzt ist.



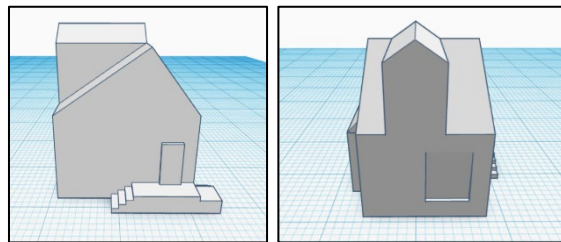
Wie oft findest du die verschiedenen Grundkörper ...

	... im Bild?	... im Modell?
Anzahl der Quader	= _____	= _____
Anzahl der Würfel	= _____	= _____
Anzahl der Prismen	= _____	= _____
Anzahl der Zylinder	= _____	= _____
Anzahl der Kugeln	= _____	= _____
Anzahl der Pyramiden	= _____	= _____
Anzahl der Kegel	= _____	= _____

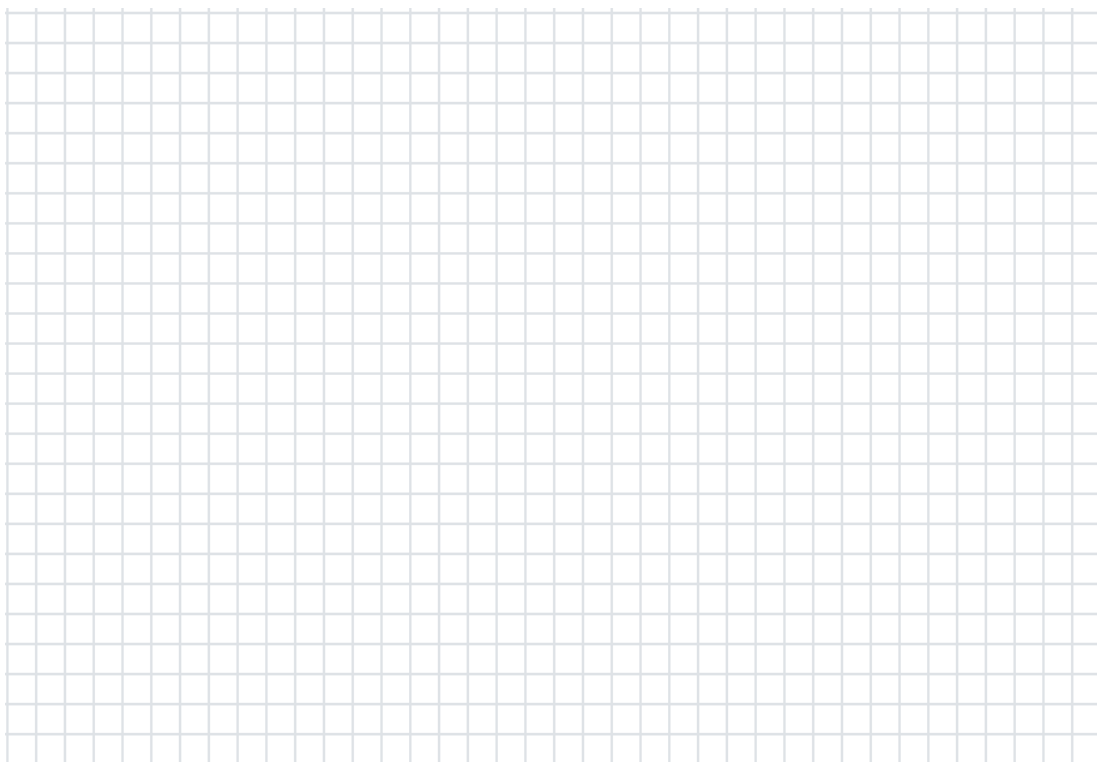
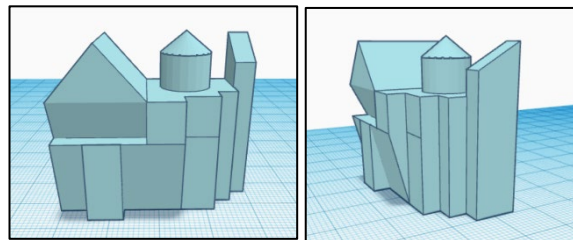
AB2: Geometrische Häuser

Es sollen weitere Gebäude errichtet werden. Auch hierfür hat das Architekturbüro bereits das erste Modell angefertigt. **Benenne** die geometrischen Grundkörper, aus denen das Haus zusammengesetzt ist.

Gebäude Nr. 2



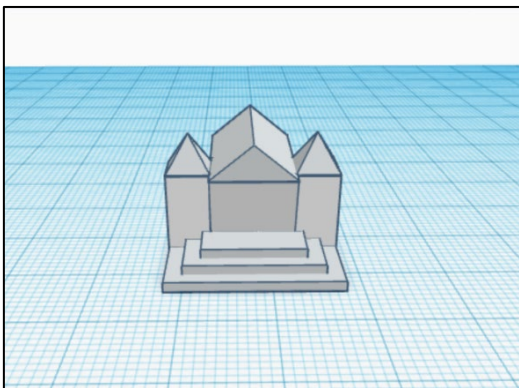
Gebäude Nr. 3



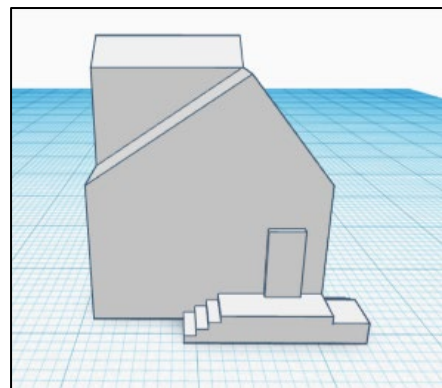
AB3: Geometrische Häuser

Nach einer Panne kann das Architekturbüro die dreidimensionalen Modelle, die bereits erstellt wurden, nicht mehr finden.

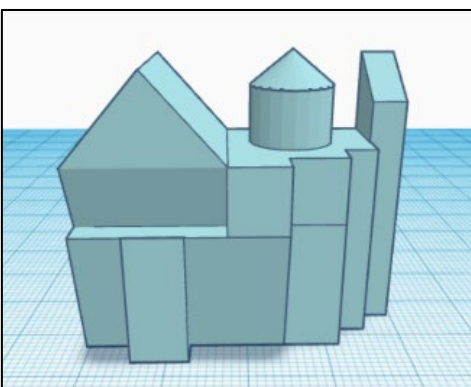
Deswegen bitten sie euch, jeweils eines aus den Abbildungen, die glücklicherweise noch vorliegen, nachzubauen. Wähle dafür eines der Gebäude aus und konstruiere es in der Software. Neben den drei Gebäuden, die du bereits kennst, ist in der Zwischenzeit ein viertes dazu gekommen.



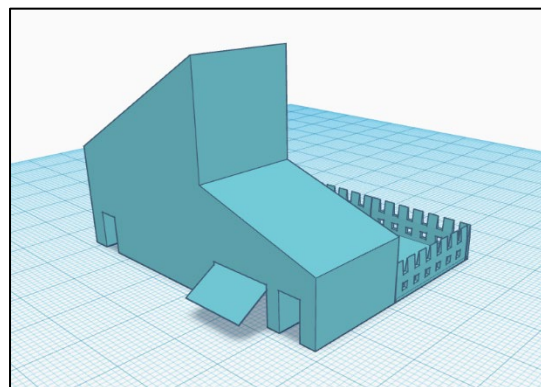
Gebäude Nr. 1



Gebäude Nr. 2



Gebäude Nr. 3



Gebäude Nr. 4

AB4: Geometrische Häuser



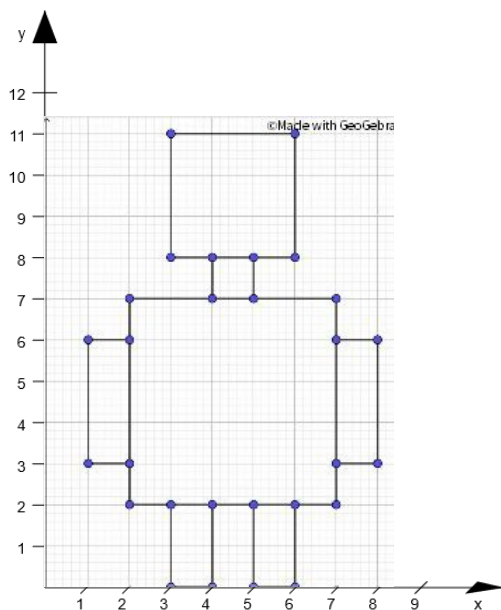
Das Architekturbüro fragt in ganz Kiel nach, ob noch jemand tolle Ideen für ein geometrisches Haus hat. Es soll hierfür eine Ausschreibung geben. Die drei schönsten Häuser sollen anschließend an das Architekturbüro weitergegeben werden.

Erstelle selber ein Gebäude aus geometrischen Grundkörpern mit Hilfe der Software. Nutze hierfür nur geometrische Grundkörper.

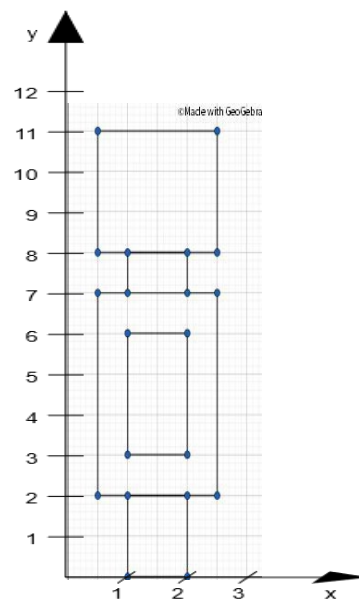
Im Anschluss an die Konstruktion der Gebäude sollen in der Klasse die drei schönsten Gebäude gewählt werden.

AB1: Roboterprojekt

Für ein Schulprojekt soll Aydan einen Roboter aus Würfeln und Quadern bauen. Sie hat bereits zwei Skizzen angefertigt. Die erste zeigt den Roboter von vorne, die zweite von der Seite. Hilf ihr dabei, die Skizze mit der Software als ein digitales Objekt zu konstruieren.



*Aydans Roboter
von vorne*

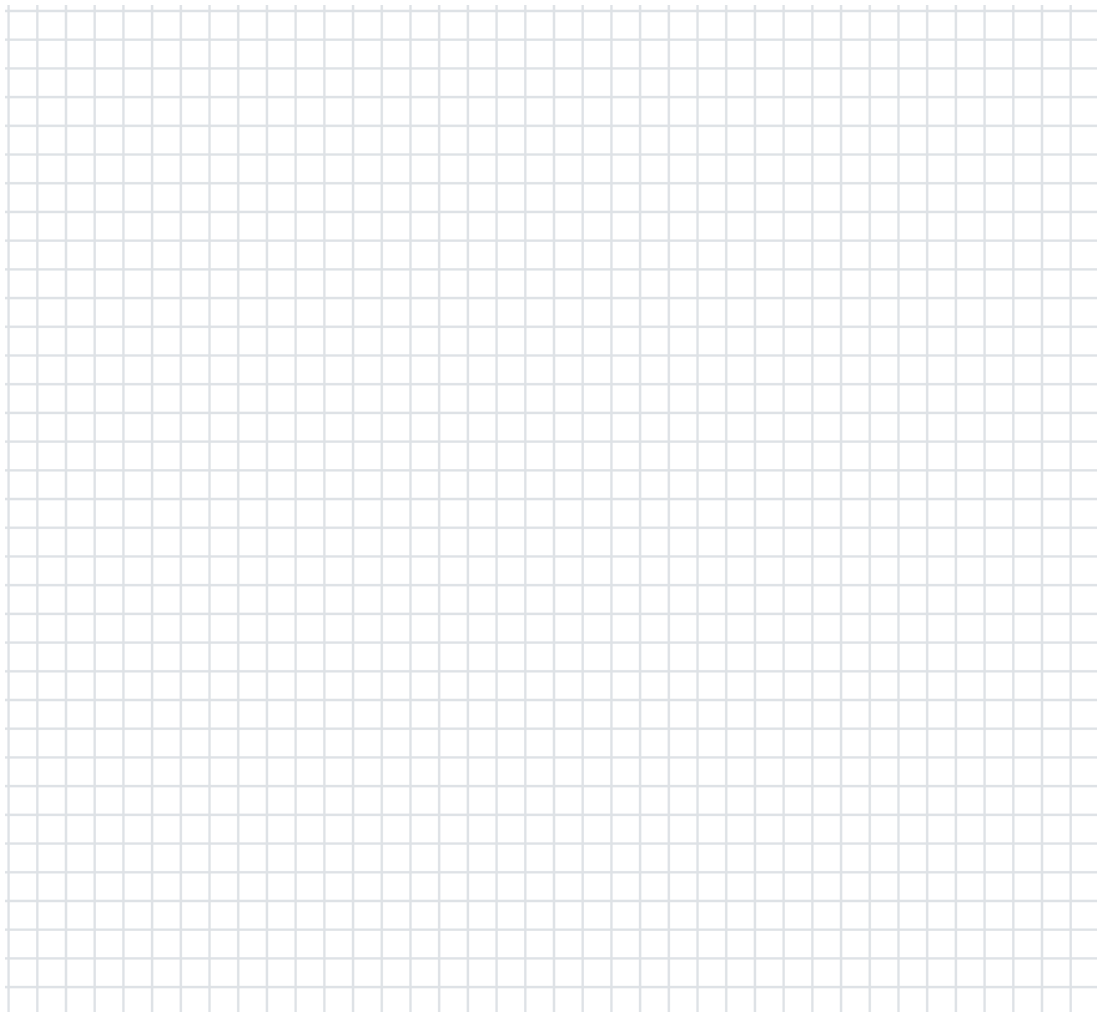
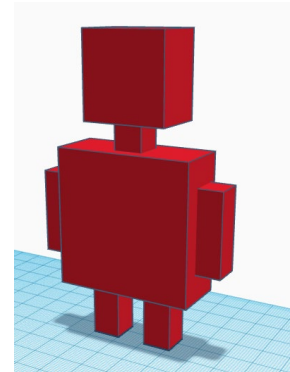


*Aydans Roboter
von der Seite*

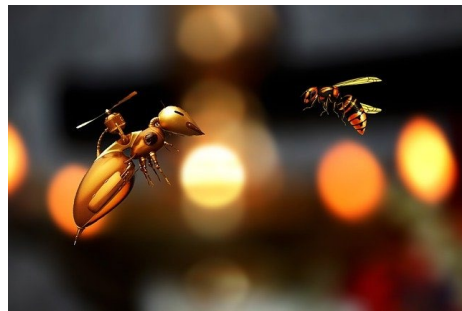
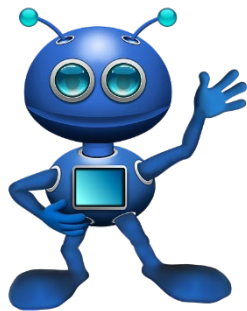
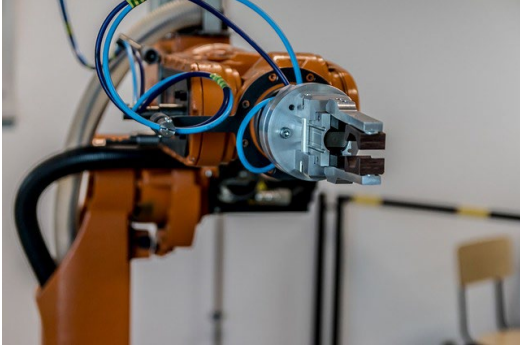
AB2: Roboterprojekt

Aydans kleines 3D-gedrucktes Robotermodell entspricht noch nicht ganz ihren Vorstellungen des Roboters. Deswegen überlegt sie, den Roboter mit Silberfolie zu bekleben.

Erkläre, wie sie berechnen kann, wie viel Silberfolie sie benötigt und **berechne** anschließend.



AB3: Roboterprojekt



Aydan fragt dich, wie dein Roboter für das Schulprojekt aussehen soll. Erstelle zunächst einen kurzen Steckbrief von deinem Roboter, in dem du Name, Aufgabe und Fähigkeiten deines Roboters auflistest. Konstruiere deinen Roboter anschließend mit einem funktionellen Design in der Software.

Name:

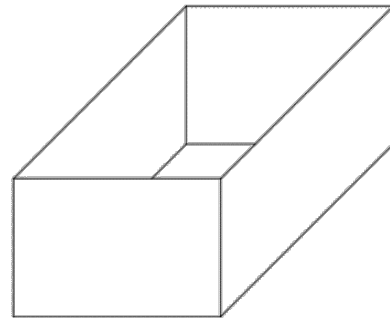
Funktion (Wozu wird er eingesetzt?):

Fähigkeiten (Was kann er exakt?):

AB1: Badeschale für Schildkröten

Hannes möchte für seine zwei 5cm langen Wasserschildkröten eine neue Badeschale drucken. Diese soll aussehen, wie ein ganz normales Schwimmbecken. Er hat mit einem Spezialisten gesprochen. Dieser hat ihm folgende Bedingungen für die Innenmaße des Beckens gesagt: Das Becken muss innen **fünf Mal so breit und hoch** sein wie seine Schildkröten es sind. Und es soll **doppelt so tief** wie hoch sein.

- a) Hilf Hannes und konstruiere das Becken für seine Schildkröten. Trage dafür zunächst die Maße des inneren Quaders in die Skizze ein.



- b) Hannes überlegt: Wie viel Wasser braucht er, um das Becken randvoll zu füllen? **Erkläre**, wie du auf ein Ergebnis kommen kannst und **berechne** anschließend.

Wenn du schon fertig bist:

Hannes möchte gerne noch vier Treppenstufen an einer der kurzen Seiten einbauen. Die Stufen sollen jeweils 3cm tief und alle gleich hoch sein. Die Stufen sollen die ganze Breite des Beckens ausfüllen. Konstruiere die Treppen in deinem Modell und **berechne**, wie viel Wasser er nun braucht.

F SUMMATIVE MEHRWERTSEVALUIERUNG DER INTERVENTIONSGRUPPE

Der folgende Beitrag wurde am 15.01.2023 eingereicht und nach einem Peer-Review-Prozess in der untenstehenden Fassung am 07.2023 in **M. Ayalon, B. Koichu, R. Leikin, L. Rubel, & M. Tabach (Eds.). Proceedings of the 46th Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education, Vol. 4). PME 46** veröffentlicht.

Learning about digital technologies of the working world in regular math classes? Teaching Composite Bodies with 3d print as a Learning Context

Mira H. Wulff, Anika Radkowitsch, Aiso Heinze

Abstract: A result of the digitalization of the working world is a change of competence profiles graduates need to enter the workplace. Consequently, relevant digital technologies should be integrated into the classroom providing opportunities for students to gain digital experiences. To facilitate teachers' acceptance of such instructional innovations, digital tools can be used as learning context instead of learning content. Following a design-based research approach, we developed a prototypical math unit using 3D print as learning context. Results of an evaluation with 101 German students in grade 5 to 7 indicate that the teaching unit has a significant effect on behavioural and cognitive components of students' 3D print-related self-concept and that the learning context of 3D print does not distract students from learning mathematics.

F.a. Introduction

The digital transformation of the workplace and consequently the rapid development of digital technologies leading to changes in professions is one of today's central challenges. Competence profiles of (future) employees are changing due to the transformation from mechanical or analogue to digital, automatized processes (e. g., Grundke et al., 2017). Consequently, (future) employees need different knowledge than before to be able to work with new machinery and technologies. In addition to subject-specific competences, this includes general digital-technological basic knowledge to ensure that students are able to enter the digitalized workplace. Therefore, not only extracurricular learning opportunities, but also innovative teaching concepts in general education schools are needed. An implementation of innovative concepts in regular general education is, however, only possible if both subject-related and workplace-related competences are focussed. Within the Danish-German DiASper project

(Digital Working World from School Perspective) 3D print was chosen as an example of a relevant technology in the modern world of work that is connected both to the curricular contents of mathematics and the digital technologies of the workplace. The decisive factor for technologies collected under the umbrella term “3D print” is the differentiation from existing formative and subtractive production processes, resulting from the additive construction of an object (e. g., Barnatt, 2016). Goal of the project is to create learning opportunities for regular mathematics classes that facilitate an exploration of the 3D printing process, including an early vocational orientation, without interfering with the learning of mathematics. Using a design-based research (DBR) approach, a prototypical unit for mathematics class has been developed (Wulff et al., in press). This unit comprises seven geometry lessons and uses the modeling phase of the 3D printing process as a *learning context* for the *learning content* of composite bodies. The unit has been evaluated and progressively adapted after expert surveys with industrial representatives and mathematics teachers as well as in a laboratory context with 16 students.

This paper presents first results of the ongoing empirical evaluation study examining the effects of the prototypical teaching unit on students’ attitudes towards 3D print as a digital tool in grades 5 through 7 in German secondary schools.

F.b. Theoretical Background

F.b.i. 3D print in mathematics education

According to the NCTM (2000), mathematics instruction in secondary education should, among other things, enable students to transition into the professional world. Using 3D printing in regular mathematics education can follow several approaches: The technology can be used as *learning content* (i. e., learning about the technology or materials needed for 3D printing), as a tool for *visualization* (i. e., visualizing (complex) mathematics for educational needs) or as *learning context* (i. e., focusing on subject-specific content in the context of 3D printing). Within the two main approaches in international research, 3D printing or parts thereof are mainly used as a didactical tool for visualization: Either using 3D printed objects for visualization aspects (e. g., Dilling, in press) or using the modeling aspect of the digital technology (i. e., the use of a CAD software) in geometry lessons (e. g., Lavicza et al., 2020) as well as art-related mathematical projects (e. g., Menano et al., 2019).

F.b.ii. Students’ attitudes: 3D printing related self-concept

According to Rosenberg & Hovland (1960), attitudes have three components: behaviour, affect, and cognition. Based on this division, Janneck et al. (2014), among others, defined a computer-related self-concept (i.e., attitudes related to one’s own person in dealing with a computer), subdivided into a behavioural, an affective, and a cognitive component: The behavioural component describes the concrete experiences with the digital technology, the affective component encompasses emotional motives while dealing with computers and the cognitive component refers to the subjectively perceived competence and self-efficacy with regard to computers as well as strategies for

dealing with the digital technology. Based on the computer-related self-concept defined by Jannek et al. (2014), the 3D printing related self-concept is for this paper understood as being composed of the previously mentioned three components. The affective and the cognitive components are both further divided into five sub-components: positive feelings, fearfulness, understanding, designing, and tool perspective for the affective and 3D print related subjectively perceived competences, self-efficacy, internal attribution, external control beliefs, and strategies for the cognitive sub-components.

Within this paper, five of these sub-components are considered, as they are deemed of high relevance for a (future) engagement with said digital technology: *The behavioural component*, the affective sub-components (*positive feelings* and *fearfulness*) as well as the cognitive sub-components (*3D print related subjectively perceived competences* and *3D print related self-efficacy*). These sub-components combine all three components and it is assumed that, in addition to the possibility of direct confrontation with 3D printing and, thus, a build-up of action experience, an increase in positive feelings and a reduction in fearfulness of digital technology are of particular relevance for (future) engagement (Wakefield, 2015). Furthermore, the cognitive sub-components are focused, since perceived competence and self-efficacy affect behaviour (Bandura, 1978).

F.b.iii. Curriculum contents related to composite bodies

The learning content *composite bodies* is part of the German mathematical curriculum for lower secondary education (MBWK, 2014). Students are expected to be able to deal mathematically with composite solids in a variety of ways. Thus, they should be able to construct composite bodies from basic solids and name basic solids in composite bodies. These constructions are to be executed both by drawing and digitally supported. In addition, computational aspects are to be focussed on: Equivalent to previous calculations on basic solids, students should be able to perform surface and volume calculations on simple composite bodies (i. e., didactically adapted composite bodies composed of a reasonable amount of previously known basic solids).

F.c. Research Questions

The present paper reports first results of the last step of the DBR process, that is, the evaluation of the developed teaching unit. The main goal of the unit is (i) to facilitate an examination of the 3D printing process including an early vocational orientation and (ii) to not neglect the learning of mathematical competences. For this purpose, an intervention study in a pre-post-design investigating the 3D related self-concept and competences regarding composite bodies was conducted.

Within the lessons, 3D printing itself was not the subject matter, but only a vehicle for mathematical learning. More specifically, students worked on various tasks to construct prescribed (composite) bodies by using the CAD software TinkerCAD. They were informed that (i) the goal of the lesson was to learn the curricular geometric content composite bodies and (ii) they would apply a professional CAD software for a digital construction process that corresponds to the modeling phase of the 3D printing

process. Students constructed various composite bodies and also calculated the surface area and volume. Of course, in the end, students were allowed to start the 3D printer to print a 3D object they had designed according to their own ideas.

The following research questions were focused:

(RQ1) To what extent does the teaching unit on composite bodies using 3D printing as learning context influence students’ 3D printing related self-concept?

(RQ2) To what extent does the teaching unit on composite bodies using 3D print as learning context affect students’ mathematical learning of composite bodies?

Regarding RQ1, it was expected that students’ fearfulness would decrease after the initial contact with the digital technology. Furthermore, an increase of the other components regarding students’ self-concept was anticipated. With RQ2, we wanted to check whether the learning context of 3D printing interferes with the acquisition of competences of composite bodies. We expected that the learning context is not distracting from learning about the mathematical content within the unit.

F.d. Method

To answer these questions, $N = 101$ (58 f, 42 m, 1 n. n.) students in grade 5 to 7 ($n_5 = 23$; $n_6 = 57$; $n_7 = 21$) from four Northern German secondary schools answered two online surveys (data collection is ongoing). In between the two surveys, students were instructed in the unit on composite bodies using the learning context of 3D printing. In collaboration with each individual teacher, the unit was adapted to fit the learning groups’ individual needs (e. g., more or less support for students).

Within the survey, students were questioned regarding the previously mentioned aspects of their 3D print related self-concept. To assess their 3D printing related self-concept, students were asked to evaluate 28 statements on a 4-point Likert scale (“disagree” to “agree”). Table F.1 shows the internal consistencies of the five used subscales. A series of one-sided paired-samples t -tests were conducted to compare pre- and post-test data. Effect sizes were measured by Cohen’s d for t -tests to show change in students’ self-concept after the intervention.

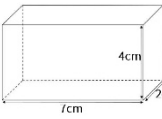
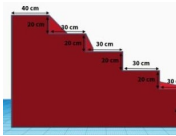
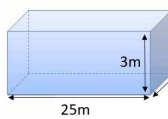
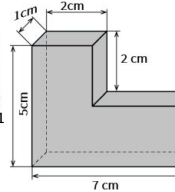
Table F.1: Reliability coefficients Cronbach’s Alpha (scales with three or more items) and Spearman Brown (scale with two items).

Variable and example item	Item count	Reliability (pre-test)	Reliability (post-test)
Behavioural – action experience (I have a lot of practical experience in working with 3D printers.)	3	.62	.58

Affective – positive feelings (3D printing technology fascinates me.)	2	.75	.82
Affective – fearfulness (I have inhibitions about using 3D printers.)	3	.83	.86
Cognitive – 3D print related perceived competences (I am more confident in using 3D printers than the average person my age.)	3	.92	.92
Cognitive – 3D print related self-efficacy (When I face problems in the 3D printing process, I find ways to solve them.)	4	.86	.94

Furthermore, each survey contained three (pre-test) or four (post-test) respectively mathematical tasks related to the mathematical content to be fostered (naming geometric bodies of a composite body, surface area calculation, volume calculation). The mathematical tasks were used to check whether the mathematical content was learned during the teaching unit. For this purpose, one task per mathematical content and survey was created and used as an indicator in the pre- and post-surveys respectively. In task 1, a building was shown from four perspectives (front, right, back, and left). Students were asked to name the basic geometric bodies (e. g., prism, sphere, cylinder) of which the building was composed. In the pre-test four and in the post-test 5 bodies had to be named. To ensure comparability, the scoring was normalized (pre: 0.25 and post: 0.2 points per correctly named body). In task 2 and 3, respectively, students were given an inner-mathematical or contextualized task in which they had to provide the surface area or volume of a basic solid or a composite body. Table F.2 gives an impression of the figures. For complexity reasons, students were asked to choose from eight given answers in an MC-design. Each of the eight answers could be achieved by a mathematical composition of the figure's given dimensions. Two values each corresponded and differed only in the dimension of the unit (e. g., 750 cm² vs. 750 cm³ for task 3 in the pre-test). Students got one point for the correct solution and 0.5 points if the number was correct but the dimension was wrong. Since the tasks are different in each survey, the responses are not directly comparable. A comparison with a control group is planned. Consequently, only a pre-post comparison within the experimental group is carried out for this paper.

Table F.2: Sample images from the tasks used in the pre-test and post-test.

Task 1 (basic bodies)		Task 2 (surface area)		Task 3 (volume)	
Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
back view:	right view:				

F.e. Results

As shown in Table F.3, results of paired-samples *t*-tests reveal a significant difference in the behavioural and cognitive components of the 3D print-related self-concept for all students between pre- and post-test. The differences correspond to small to medium effect sizes. The data also show a weak significant difference within students' positive feelings towards 3D print.

Table F.3: Comparisons of descriptive statistics and paired samples *t*-test of pre- and post-test scores (***p* < .001, **p* < .01, #*p* < .10).

	Pre-test Mean (<i>SD</i>)	Post-test Mean (<i>SD</i>)	<i>t</i> (<i>p</i>)	Cohen's <i>d</i>
Behavioural – action experience	1.68 (0.60)	2.11 (0.70)	6.75*** (<.001)	.71
Affective – positive feelings	2.55 (0.93)	2.71 (0.80)	1.59# (.06)	.19
Affective – fearfulness	2.38 (0.89)	2.27 (0.86)	-1.16 (.13)	-.13
Cognitive – 3D print related perceived competences	1.87 (0.83)	2.21 (0.86)	3.28*** (<.001)	.39
Cognitive – 3D print related self-efficacy	2.06 (0.87)	2.35 (0.88)	2.66** (.005)	.34

As shown in Table F.4, results of the paired-samples *t*-tests reveal a significant difference between pre- and post-test in all mathematical tasks with small effect sizes. However, there is a negative effect regarding the tasks related to volume calculation.

Table F.4: Comparisons of descriptive statistics and paired samples *t*-test of Pre- and Post-test scores (***p* < 0.01).

	Pre-test Mean (<i>SD</i>)	Post-test Mean (<i>SD</i>)	<i>t</i> (<i>p</i>)	Cohen's <i>d</i>
Naming geometric bodies	.61 (.26)	.73 (.19)	3.06** (.002)	.41
Surface calculation	.07 (.22)	.20 (.38)	2.64** (.005)	.31
Volume calculation	.53 (.43)	.37 (.41)	-2.70** (.004)	-.31

F.f. Discussion

The present study reports first results of an evaluation study as a last step of a DBR project that developed a prototypical teaching unit on composite bodies connected to the learning context 3D print. The motivation of the project is the need for a basic preparation of students for digital workplace technology (Grundke et al., 2017; NCTM, 2000). The results in Table 3 show that the teaching unit positively affected the surveyed components of students' 3D printing-related self-concept (RQ1). This is relevant for later contact and engagement with the technology in the context of the working world (Wakefield, 2015). In summary, it can be said that students gain initial experience in dealing with 3D printing technology with the help of the teaching unit which positively affects their self-concept. It must be noted that actual skills in dealing with the 3D printer were not tested, but only the subjective individual attitudes of the students to 3D printing. However, these are considered vital for future engagement (Bandura, 1978).

Since 3D printing was implemented as a learning context and not as learning content, the acquisition of competences related to the mathematical content of the unit is also of central importance and must not be neglected (RQ2). Nevertheless, our results suggest that students gained mathematical competences in two of three content domains (Table 4). This is although all three tasks within the post-test can be considered more difficult than the pre-test tasks from a mathematics-didactic perspective. In task 1, one more body had to be named for the normalized full score (1) than in the pre-test. In tasks 2 and 3 of the post-test, figures composed of cuboids (staircase and L-shaped body) were considered instead of cuboids (pre-test). This could explain the difficulty students had in completing the volume task in the post-test.

F.f.i. Limitations

Data for the present study were collected in the school year 2021/22, when schools were still reeling from the aftermath of school closures due to the Covid-19 pandemic. This may have had implications for students' prior knowledge regarding geometric solids. Furthermore, the unit was taught by the regular teachers. Although the unit was previously discussed with the teachers there may have been differences in the frequency of exposure to the technology and the 3D printer between the classes. Finally, in this preliminary analysis, the check of whether the learning context 3D print interferes with the learning of geometry relies only on pre-post-data of the intervention group and the comparison within pairs of different pre-post-tasks was used as a preliminary approach. The data collection is ongoing and data from a control group that received conventional instruction on the content of composite figures without 3D printing will be collected. Then a comparison of the pre-post-item pairs in an experimental design will be possible which yields more reliable results.

F.f.ii. Outlook

Despite the limitations, the first promising results suggest a positive evaluation of the developed teaching unit in which students were able to gain experiences with 3D printing and to develop positive attitudes toward it, but which also does not neglect the

mathematical content. We expect that these findings will be confirmed when analysing the full sample which also includes control group data. Within the project, further teaching units on mathematical content (e. g., plane representations, perspectives) were constructed within the design-based research project. In future steps, these will also be evaluated like the unit presented in this paper. In summary, we think that an implicit encounter with 3D printing as a learning context coupled with existing regular mathematical teaching content leads to a sustainable encounter with the digital technology without restricting mathematics learning. Using 3D print as a learning context (instead of a learning content) is an approach that (i) allows students to gain experiences with relevant workplace-related digital technologies and (ii) is more likely accepted by mathematics teachers as it allows them to achieve the intended mathematical learning objectives in the classroom.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1: Modellierung eines Hauses mittels der direkten Modellierungssoftware Tinkercad®.....	7
Abbildung 2.2: Darstellung einer Triangulierung des zuvor konstruierten Hauses. ...	8
Abbildung 2.3: STL-Code eines Quaders mit den Seitenlängen $a = 1$, $b = 2$, $c = 3$, das durch den erstellten Code mathematisch eindeutig in einem dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem platziert ist. Die Festlegung eines Eckpunktes auf den Ursprung $(0,0,0)$ ist dabei nicht notwendig.	9
Abbildung 2.4: Darstellung des gesliceten Modells, in dem die Teilung in Scheiben sowie die innere Struktur sichtbar ist.....	10
Abbildung 2.5: Mittels Filamentdruck 3D-gedrucktes dreidimensionales Modell des Hauses.....	11
Abbildung 2.6: TPACK-Modell nach Mishra & Koehler (Abb. aus Koehler et al., 2014).....	19
Abbildung 3.1: Abbildung des im Rahmen des Forschungsvorhabens durchlaufenen Designprozess von Unterrichtskonzepten. Die ausgegrauten Felder werden in den Kapiteln 6 und 7 betrachtet.....	27
Abbildung 6.1: Weiterführung des in Kapitel 3 definierten Designprozesses der Unterrichtskonzepte, in dem die Einbindung der zu erstellenden Unterrichtsideen und -konzepte in das bestehende mathematische Fachcurriculum von zentraler Bedeutung ist.....	56
Abbildung 6.2: Weiterführung des in Abschnitts 6.1 definierten Designprozesses der Unterrichtskonzepte, in dem die praktische Unterrichtsexpertise der Lehrkräfte genutzt wird, um die erstellten Unterrichtskonzepte hinsichtlich ihrer theoretischen Einsetzbarkeit zu evaluieren.	61
Abbildung 6.3: Weiterführung des in Abschnitts 6.3.1 definierten Designprozesses der Unterrichtskonzepte, in dem Akteure der Industrie, Handwerk und Wirtschaft in die Evaluierung des erstellten prototypischen Unterrichtskonzeptes eingebunden wurden, um die Authentizität der Einbindung der 3D-Druck-Technologie zu gewährleisten.	63
Abbildung 6.4: Ergänzung des in Abschnitt 6.3.2 definierten Designprozesses der Unterrichtskonzepte um den Akteur „Schüler:innen“, die in diesem Evaluierungszyklus als relevanter Akteur des Designprozesses betrachtet werden, da	

Abbildungsverzeichnis

sie mittels der entwickelten Unterrichtskonzepte im Kontext Schule Mathematik lernen und erste Erfahrungen mit der 3D-Druck-Technologie sammeln können sollen.
.....65

Abbildung 9.1: Mittelwerte der Prä-Befragung sowie der letzterhobenen Befragung (5 Post-Datensätze, 19 Follow-up-Datensätze) der unterdurchschnittlichen Gruppe ($[0; MW - SD[$ mit $n_u = 4$), der durchschnittlichen Gruppe ($[MW - SD; MW + SD]$ mit $n_d = 16$) und der überdurchschnittlichen Gruppe ($[MW + SD; 4]$ mit $n_{\bar{u}} = 4$).
.....100

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 4.1: Kategoriensystem zur Forschungsfrage 1 mit Beispielaussagen aus den Interviews, der absoluten Anzahl der zugeordneten Aussagen sowie der Anzahl der Interviews, die Aussagen der jeweiligen Kategorie vorweisen. Beispielaussagen aus Interviews mit dänischen Repräsentant:innen wurden durch die Erstautorin übersetzt.	37
Tabelle 4.2: Kategoriensystem zur Forschungsfrage 2 mit Beispielaussagen aus den Interviews, der absoluten Anzahl der zugeordneten Aussagen sowie der Anzahl der Interviews, die Aussagen der jeweiligen Kategorie vorweisen. Beispielaussagen aus Interviews mit dänischen Repräsentant:innen wurden durch die Erstautorin übersetzt.	38
Tabelle 5.1: Reliabilitätskoeffizienten Cronbachs Alpha (Skalen mit 3-4 Items) und Spearman Brown (Skalen mit 2 Items) der Skalen aus der Online-Lehrkräftebefragung.	49
Tabelle 5.2: Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe sowie der vier Teildatensätze über die Lehrkräfte a) an deutschen Schulen (in Deutschland und Dänemark), b) an dänischen Schulen (in Deutschland und Dänemark) sowie c) die Lehrkräfte, die Zugang zu einem 3D-Drucker haben und d) die Lehrkräfte, denen kein 3D-Drucker zugänglich ist (tvb = task value beliefs, SWE = Selbstwirksamkeitserwartung).	51
Tabelle 5.3: Korrelationstabelle verschiedener Variablen (tvb = task value beliefs, SWE = Selbstwirksamkeitserwartung) mit der Intention, den 3D-Druck im Mathematikunterricht der Sek. I bzw. II einzusetzen. Korrelationswerte mit * sind signifikant mit $p < 0,05$	52
Tabelle 6.1: Übersicht über mathematische Inhalte in den einzelnen Schritten des 3D-Druck-Prozesses.	55
Tabelle 6.2: Übersicht über die Verknüpfungspunkte zwischen der Mathematik hinter den 3D-Druck-Prozessen und mathematischen curricularen Inhalten der Sekundarstufe I und II. Die angegebenen Seitenzahlen beziehen sich auf die Fachanforderungen Mathematik des Landes Schleswig-Holstein (MBWK SH, 2014).	57
Tabelle 6.3: Mittelwerte, Standardabweichungen, Wilcoxon-Rang sowie Effektstärke (mittels Cohens d) der Konstrukte der Stichprobe im vierten Evaluierungszyklus. Fett hinterlegte Konstrukte weisen eine signifikante Veränderung auf (Likert-Skala: 1 =	

Tabellenverzeichnis

„stimme gar nicht zu“, 4 = „stimme voll zu“; (***) $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$, # $p < .10$).....	68
Tabelle 7.1: Übersicht über die erhobenen Konstrukte, die für die Beantwortung der Forschungsfragen relevant sind sowie deren interne Konsistenz, dargestellt mittels Cronbach's Alpha (für Skalen mit drei oder mehr Items) und Spearman Brown (für Skalen mit zwei Items).	74
Tabelle 7.2: Beispielbilder der dargestellten geometrischen Grundkörper und zusammengesetzten Körper der Aufgaben 1 bis 3 in der Prä- und Post-Befragung. .	76
Tabelle 7.3: Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe sowie der beiden Teilstichproben der Interventions- und Kontrollgruppe für die Skalen zu dem 3D-Druck bezogenen Selbstkonzept, zu dem Interesse an ICT, zu der subjektiv wahrgenommenen ICT-Kompetenz und zu der instrumentellen Motivation (Likert-Skalen von 1 = „stimme gar nicht zu“ bis 4 = „stimme voll zu“). Die grau unterlegten Werte werden aufgrund geringer interner Konsistenz nicht weiter betrachtet, sollen hier aber dennoch berichtet werden.....	77
Tabelle 7.4: Prä-Post-Vergleiche mittels t-Tests für gepaarte Stichproben der Gesamtstichprobe sowie der beiden Teilstichproben der Interventions- und Kontrollgruppe für die Skalen zu dem 3D-Druck bezogenen Selbstkonzeptes, zu dem Interesse an ICT, zu der subjektiv wahrgenommenen ICT-Kompetenz und zu der instrumentellen Motivation sowie Betrachtung des Einflusses der Gruppenzugehörigkeit (Interventions- oder Kontrollgruppe) durch ANCOVAs unter Festhalten des Werts der Prä-Befragung auf den Wert der Post-Befragung (***) $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$, # $p < .10$; SWE = Selbstwirksamkeitserwartung).....	78
Tabelle 7.5: Mittelwerte und Standardabweichungen der Gesamtstichprobe sowie der beiden Teilstichproben der Interventions- und Kontrollgruppe zu den Skalen zu dem globalen und raumgeometrischen Selbstkonzept sowie zu der Selbsteinschätzung der zu fördernden digitalen Kompetenzen (vgl. MBWK SH, 2018) (Likert-Skalen von 1 = „stimme gar nicht zu“ bis 4 = „stimme voll zu“).	79
Tabelle 7.6: Prä-Post-Vergleiche mittels t-Tests für gepaarte Stichproben der Gesamtstichprobe sowie der beiden Teilstichproben der Interventions- und Kontrollgruppe für die Skalen zu der Selbsteinschätzung der zu fördernden digitalen Kompetenzen sowie Betrachtung des Einflusses der Gruppenzugehörigkeit (Interventions- oder Kontrollgruppe) durch ANCOVAs unter Festhalten des Werts der Prä-Befragung auf den Wert der Post-Befragung (vgl. MBWK SH, 2018; (***) $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$).	80
Tabelle 7.7: Prä-Post-Vergleiche mittels t-Tests für gepaarte Stichproben der Gesamtstichprobe sowie der beiden Teilstichproben der Interventions- und Kontrollgruppe zu den mathematischen Kompetenzaufgaben (***) $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$, # $p < .10$).	81

Tabelle 7.8: Betrachtung des Einflusses der Gruppenzugehörigkeit (Interventions- oder Kontrollgruppe) unter Festhalten des Werts der Prä-Befragung auf den Wert der Post-Befragung (# $p < .10$).	81
Tabelle 9.1: Übersicht über die genutzten Skalen mit Beispielitem sowie ihrer internen Konsistenz, die mittels des Reliabilitätskoeffizienten Cronbachs Alpha (Skalen mit 3-4 Items) und Spearman Brown (Skalen mit 2 Items) angegeben wird. Dabei wird die interne Konsistenz der Skalen der Prä-Befragung der Experimentalgruppe ($n_1 = 24$) und der Vergleichsgruppe ($n_C = 166$) gemeinsam betrachtet, während die Skalen der Post-Befragung ($n_2 = 24$) und Follow-up-Befragung ($n_3 = 24$) jeweils nur von der Experimentalgruppe betrachtet werden. Bei den Skalen zu den task value beliefs Interesse und Nutzen sowie den Selbstwirksamkeitserwartung entspricht der erst angegebene Wert der internen Konsistenz der Skalen der Lehrkräfte, die bereits die 3D-Druck-Technologie als Lernkontext eingesetzt haben ($n_{Prä} = 14$, $n_{Post} = 7$, $n_{Follow-up} = 6$) und der zweite Wert der internen Konsistenz der Skalen der Lehrkräfte, die noch nicht die 3D-Druck-Technologie eingesetzt haben.....	97
Tabelle 9.2: Mittelwerte und Standardabweichungen der Prä-Befragung sowie der letzterhobenen Befragung (5 Post-Datensätze, 19 Follow-up-Datensätze) nach Aufteilung der Stichprobe $n = 24$ mittels des Konstrukts SWE TPACK um Gruppenvergleiche zu ermöglichen. Angabe der Mittelwerte und Standardabweichungen der Vergleichsgruppe (tvb = task value beliefs, SWE = Selbstwirksamkeitserwartung).	100
Tabelle 9.3: Vorher-Nachher-Gruppenvergleich über die Prä- sowie 5 Post und 19 Follow-up-Datensätze der Lehrkräfte, die an den Fortbildungen teilnahmen mittels Kruskal-Wallis-Tests. (** $p < .001$, * $p < .01$, * $p < .05$, # $p < .10$, tvb = task value beliefs, SWE = Selbstwirksamkeitserwartung)	101

LITERATURVERZEICHNIS

- Ackeren, I., Aufenanger, S., Eickelmann, B., Friedrich, S., Kammerl, R., Knopf, J., Mayrberger, K., Scheika, H., Scheiter, K., & Rohs, M. (2019). Digitalisierung in der Lehrerbildung. Herausforderungen, Entwicklungsfelder und Förderung von Gesamtkonzepten. *DDS – Die Deutsche Schule*, *111*(1), 103-119. <https://doi.org/10.31244/dds.2019.01.10>
- Aguilar, G. D. (2020). Modelos en GeoGebra para el plano y el espacio. Impresión de materiales 3D para su uso en el aula. *Revista Do Instituto GeoGebra Internacional De São Paulo*, *9*(1), 132–146. <https://doi.org/10.23925/2237-9657.2020.v9i1p132-146>
- Angeli, C., & Valanides, N. (2009). Epistemological and methodological issues for the conceptualization, development, and assessment of ICT-TPCK: Advances in technological pedagogical content knowledge (TPCK). *Computers & Education*, *52*, 154-168. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2008.07.006>
- Autodesk (2024). *Tinkercad*. Autodesk. <https://www.tinkercad.com/>
- Baas, M., Admiraal, W., & van den Berg, E. (2019). Teachers' Adoption of Open Educational Resources in Higher Education. *Journal of Interactive Media in Education*, *2019*(1), 1–11. <https://doi.org/10.5334/jime.510>
- Bandura, A. (1978). Reflections on Self-Efficacy. *Advances in Behavior Research and Therapy*, *1*, 237-269. [https://doi.org/10.1016/0146-6402\(78\)90012-7](https://doi.org/10.1016/0146-6402(78)90012-7)
- Barlovic, U., Burkard, C., Hollenbach-Biele, N., Lepper, C., & Ullrich, D. (2022). *Berufliche Orientierung im dritten Corona-Jahr. Eine repräsentative Befragung von Jugendlichen 2022*. Bertelsmann Stiftung. Abgerufen am 23.08.2024 unter <https://www.bertelsmann-stiftung.de/de/publikationen/publikation/did/berufliche-orientierung-im-dritten-corona-jahr-all>. <https://doi.org/10.11586/2022070>
- Barnatt, C. (2016). *3D Printing: Third Edition*. CreateSpace.
- Bauer, J., & Kenton, J. (2005). Toward Technology Integration in the Schools: Why It Isn't Happening. *Journal of Technology and Teacher Education*, *13*, 519-546.
- Becker, S., Meßinger-Koppelt, J., & Thyssen, C. (Hrsg.) (2020). *Digitale Basiskompetenzen*. Abgerufen am 23.08.2024 unter https://www.nationales-mintforum.de/fileadmin/medienablage/content/themen/aktuelles/2018/aktuelle-studien/2020/JHS_Digitale_Basiskompetenzen_web_srgb.pdf.
- Becker, M., Daube, C. H., & Reinking, E. (2023). *Industrie 5.0, IUCF. Working Paper, No. 4/2023*, ZBW - Leibniz Information Centre for Economics, Kiel, Hamburg.
- Bedewy, S., Choi, K., Lavicza, Z., Fenyvesi, K., & Houghton, T. (2021). STEAM Practices to Explore Ancient Architectures Using Augmented Reality and 3D Printing with GeoGebra. *Open Education Studies*, *3*(1), 176-187. <https://doi.org/10.1515/edu-2020-0150>
- Bundesverband Informationswissenschaft, Telekommunikation und neue Medien (BITKOM) (2015). *Digitale Schule – vernetztes Lernen. Ergebnisse*

Literaturverzeichnis

- repräsentativer Schüler- und Lehrerbefragungen zum Einsatz digitaler Medien im Schulunterricht. Bitkom.
- Bundesverband Informationswissenschaft, Telekommunikation und neue Medien (BITKOM) (2021). *Corona führt zu Digitalisierungsschub in der deutschen Industrie*. Bitkom.
- Bundesverband Informationswissenschaft, Telekommunikation und neue Medien (BITKOM) (2023). *Digitalisierung der Wirtschaft*. Bitkom
- Blichfeldt, H., Berg, S., Stampe, I., & Knudsen, M. P. (2020). *Udbredelsen af 3D print og Additive Manufacturing i dansk industry: Resultaterne fra den danske screening – 2019*. Syddansk Universitet. Institut for Marketing og Management. Abgerufen am 23.08.2024 unter https://am-hub.dk/wp-content/uploads/2019/01/Screening_AM-Rapport_SDU.pdf
- Booss, B., & Krickeberg, K. (Eds.) (1976). *Mathematisierung der Einzelwissenschaften: Biologie - Chemie - Erdwissenschaften - Geschichtswissenschaft - Linguistik - Medizin - Pädagogik - Physik - Psychologie - Rechtswissenschaft - Soziologie - Theologie - Wirtschaftswissenschaft*. Birkhäuser Verlag. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-0348-5508-2>
- Borko, H., & Putnam, R. T. (1995). Expanding a teacher's knowledge base: A cognitive psychological perspective on professional development. In T. R. Guskey, & M. Huberman (Hrsg.), *Professional development in education: New paradigms and practices* (S. 35-65). Teachers College Press.
- Børne- og Undervisningsministeriet (BUM) (2019). *Matematik læseplan*. Abgerufen am 23.08.2024 unter <https://emu.dk/grundskole/matematik/faghaefte-faelles-maal-laeseplan-og-vejledning>
- Bos, W., Eickelmann, B., Gerick, J., Goldhammer, F., Schaumburg, H., Schwippert, K., Senkbeil, M., Schulz-Zander, R., & Wendt, H. (Eds.) (2014). *ICILS 2013. Computer- und informationsbezogene Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern in der 8. Jahrgangsstufe im internationalen Vergleich*. Waxmann. <https://doi.org/10.25656/01:11459>
- Bruner, J. S. (1966). *Toward a theory of instruction*. Belkapp Press.
- Buhl, H. M., Bonanati, S., & Eickelmann, B. (2021). *Schule in der digitalen Welt*. Hogrefe Verlag.
- Bundesagentur für Arbeit (2021). *Klassifikation der Berufe 2010 – überarbeitete Fassung 2020. Band 1: Systematischer und alphabetischer Teil mit Erläuterungen*. Bundesagentur für Arbeit.
- Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) (2016). *Digitalisierung am Arbeitsplatz. Aktuelle Ergebnisse einer Betriebs- und Beschäftigtenbefragung*. Abgerufen am 23.08.2024 unter <https://www.bmas.de/DE/Service/Publikationen/Forschungsberichte/fb468-digitalisierung-am-arbeitsplatz.html>
- Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) (2020). *Digitalisierung im Arbeitsalltag von Beschäftigten: Konsequenzen für Tätigkeiten, Verhalten und Arbeitsbedingungen*. Abgerufen am 23.08.2024 unter <https://www.bmas.de/DE/Service/Publikationen/Forschungsberichte/fb-555-digitalisierung-im-arbeitsalltag-von-beschaeftigten.html>
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2019). *Verwaltungsvereinbarung DigitalPakt Schule 2019 bis 2024*. Abgerufen am 23.08.2024 unter https://www.digitalpaktschule.de/files/VV_DigitalPaktSchule_Web.pdf

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2016). *Digitale Bildung. Der Schlüssel zu einer Welt im Wandel*. Zarbock. Abgerufen am 23.08.2024 unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/digitale-bildung-der-schluessel-zu-einer-welt-im-wandel.html>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019). *Leitbild 2030 für Industrie 4.0. Digitale Ökosysteme global gestalten*. Abgerufen am 23.08.2024 unter https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Leitbild-2030-f%C3%BCr-Industrie-4.0.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- Calvino, F., Criscuolo, C., Marcolin, L., & Squicciarini, M. (2018). A taxonomy of digital intensive sectors. *OECD Science, Technology and Industry Working Papers 2018(14)*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/f404736a-en>
- Cammarano, A., Varriale, V., Michelino, F., & Caputo, M. (2024). A Framework for Investigating the Adoption of Key Technologies: Presentation of the Methodology and Explorative Analysis of Emerging Practices. *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 71, 3843-3866, <https://doi.org/10.1109/TEM.2023.3240213>
- Chen, A., Martin, R., Ennis C. D., & Sun, H. (2008). Content Specificity of Expectancy Beliefs and Task Values in Elementary Physical Education. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 79(2), 195-208. <http://dx.doi.org/10.1080/02701367.2008.10599483>
- Cheng, L. (2019). *3D Printing Integration in K-12 Science Classrooms: The Relationship with Students' STEM Motivation, 21st Century Skills, and Interest in STEM Careers* (Dissertation, University of Florida). Abgerufen am 23.08.2024 unter https://ufdcimages.uflib.ufl.edu/UF/E0/05/43/05/00001/CHENG_L.pdf
- Chi, M. T. H., & Wylie, R. (2014). The ICAP framework: Linking cognitive engagement to active learning outcomes. *Educational Psychologist*, 49, 219–243. <https://doi.org/10.1080/00461520.2014.965823>
- Dagdilelis, V. (2018). Preparing teachers for the use of digital technologies in their teaching practice. *Research in Social Sciences and Technology*, 3(1), 109-121. <https://doi.org/10.46303/ressat.03.01.7>
- Deci, E. L. & Ryan, R. M. (Hrsg.) (2002). *Handbook of self-determination research*. University of Rochester Press
- Deeken, M., & Fuchs, T. (2018). *Agiles Management als Antwort auf die Herausforderungen der Digitalisierung. Praktische Erkenntnisse und Gestaltungshinweise für die Bankenbranche*. Springer Gabler.
- Deeken, C., Neumann, I. & Heinze, A. (2020) Mathematical Prerequisites for STEM Programs: What do University Instructors Expect from New STEM Undergraduates?. *Int. J. Res. Undergrad. Math. Ed.* 6, 23–41. <https://doi.org/10.1007/s40753-019-00098-1>
- Demir, K. A., Döven, G., & Sezen, B. (2019). Industry 5.0 and Human-Robot Co-Working. *Procedia Computer Science*, 158, 688-695. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.104>
- Dilling, F. (2023). 3D-Printing in Calculus Education – Concrete Ideas for the Hands-on Learning of Derivatives and Integrals. In F. Dilling, F. Pielsticker, & I. Witzke (Hrsg.), *Learning mathematics in the context of 3D printing: Proceedings of the International Symposium on 3D Printing in Mathematics Education* (S. 51-72).

- (MINTUS - Beiträge zur mathematisch-naturwissenschaftlichen Bildung). Springer Spektrum.
- Dilling, F., Marx, B., Pielsticker, F., Vogler, A., & Witzke, I. (2021). *Praxishandbuch 3D-Druck im Mathematikunterricht. Einführung und Unterrichtsentwürfe für die Sekundarstufen I und II*. Waxmann.
- Dilling, F., & Witzke, I. (2019). Was ist 3D-Druck? Zur Funktionsweise der 3D-Druck-Technologie. *Mathematik Lehren*, 217, 10-12.
- Dilling, F., & Witzke, I. (2020). Die 3D-Druck-Technologie als Lerngegenstand im Mathematikunterricht der Sekundarstufe 2. *MNU Journal* 2020(4), 317-320.
- Ebbinghaus, H. (1885). *Über das Gedächtnis. Untersuchungen zur experimentellen Psychologie*. Duncker & Humblot.
- Eder, F., & Bergmann, C. (2015). Das Person-Umwelt-Modell von J. L. Holland: Grundlagen - Konzepte - Anwendungen. in C. Tarnai, & F. G. Hartmann (Hrsg.), *Berufliche Interessen. Beiträge zur Theorie von J. L. Holland* (S. 11–30). Waxmann Verlag.
- Eickelmann, B., Bos, W., Gerick, J., Goldhammer, F., Schaumburg, H., Schwippert, K., Senkbeil, M., & Vahrenhold, J. (Hrsg.) (2019). *ICILS 2018 #Deutschland. Computer- und informationsbezogene Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern im zweiten internationalen Vergleich und Kompetenzen im Bereich Computational Thinking*. Waxmann.
- Eickelmann, B., Lorenz, R., Endberg, M., & Domke, M. (2022). Digitalisierungsbezogene Fortbildung und professionelle Lerngelegenheiten von Lehrpersonen der Sekundarstufe 1 in Deutschland und im Bundesländervergleich. In R. Lorenz, S. Yotyodying, B. Eickelmann & M. Endberg (Hrsg.), *Schule digital – der Länderindikator 2021. Lehren und Lernen mit digitalen Medien in der Sekundarstufe 1 in Deutschland im Bundesländervergleich und im Trend seit 2017* (S. 187-209). Waxmann.
- Emmermann, L., Groth, T., & Halverscheid, S. (2016). Polytope mit dem 3D-Drucker herstellen. Räumliches Denken und Operieren mit Koordinaten in Klasse 7. In: *Praxis der Mathematik* 69 (2016), 31-34.
- Erneuerung der „Gemeinsame Erklärung zur regionalen Zusammenarbeit zwischen dem Land Schleswig-Holstein und der Region Syddanmark“. (2021). Abgerufen am 23.08.2024 unter https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/D/daenemark_zusammenarbeit/Downloads/gemeinsame_erklaerung_sh_syddanmark.pdf?__blob=publicationFile&v=1.
- Ertmer, P. A. (1999). Addressing first- and second-order barriers to change: Strategies for technology integration. *Educational Technology Research and Development*, 47, 47-61. <https://doi.org/10.1007/BF02299597>.
- Ertmer, P. A., Ottenbreit-Leftwich, A. T., Sadik, O., Sendurur, E., & Sendurur, P. (2012). Teacher beliefs and technology integration practices: A critical relationship. *Computers & Education*, 59(2), 423-435. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compedu.2012.02.001>.
- Eryilmaz, S. & Deniz, Gülhanım (2021). Effect of Tinkercad on Students' Computational Thinking Skills and Perceptions: A Case of Ankara Province. *The Turkish Online Journal of Educational Technology* 20(1), 25-38.

- Espera, A. H., Dizon, J. R. C., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2019). 3D-printing and advanced manufacturing for electronics. *Progress in Additive Manufacturing* 2019(4), 245-267. <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00077-7>
- European Commission (2022). *The Digital Economy and Society Index (DESI)*. Abgerufen am 23.08.2024 unter <https://ec.europa.eu/newsroom/dae/redirection/document/88764>
- Fastermann, P. (2014). *3D-Drucken. Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert*. Springer.
- Fernández-Batanero, J. M., Montenegro-Rueda, M., Fernández-Cerero, J., & García-Martínez, I. (2020). Digital competences for teacher professional development. Systematic review. *European Journal of Teacher Education*, 45(4), 513–531. <https://doi.org/10.1080/02619768.2020.1827389>
- Figueiredo, A. D. & Afonso, A. P. (2005). Context and Learning: A Philosophical Framework. In Figueiredo, A. D. & Afonso, A. P. (Hrsg.), *Managing Learning in Virtual Settings: The Role of Context* (S. 1-22). Information Science Publishing. <https://doi.org/10.4018/978-1-59140-488-0.ch001>
- Fishbein, M., & Ajzen, I. (2010). *Predicting and changing behavior: The reasoned action approach*. Psychology Press.
- Fraillon, J., Ainley, J., Schulz, W., Friedman, T., & Duckworth, D. (2020). *Preparing for Life in a Digital World. IEA International Computer and Information Literacy Study 2018. International Report*. Springer.
- Frey, A., Taskinen, P., Schütte, K., Prenzel, M., Artelt, C., Baumert, J., Blum, W., Hammann, M., Klieme, E. & Pekrun, R. (2009). *Pisa 2006 Skalenhandbuch: Dokumentation der Erhebungsinstrumente*. Waxmann.
- Gantenbrink, S., & Tibbe, T. (2024). Kollaborative Nutzung und Weiterentwicklung von Open Educational Resources. Eine Studie zu Gelingensbedingungen am Beispiel der inklusionsbezogenen Lehrer:innenbildung in NRW im Projekt InDigO. *MedienPädagogik* 62 (InDigO): 163–186. <https://doi.org/10.21240/mpaed/62/2024.07.10.X>.
- GeoGebra (2024). <https://www.geogebra.org/>
- Giek, T., & Seifried, J. (2023). Schulische Berufsorientierung. *Zeitschrift für Berufs- und Wirtschaftspädagogik* 119(1), 111-135. <https://doi.org/10.25162/zbw-2023-0005>
- Goldhammer, F., Gniewosz, G., & Zylka, J. (2017). ICT Engagement in learning environments. In S. Kuger, E. Klieme, N. Jude, & D. Kaplan (Hrsg.), *Assessing contexts of learning world-wide—extended context assessment framework and documentation of questionnaire material*. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-45357-6_13
- Gräsel, C., Schledjewski, J., & Hartmann, U. (2020). Implementation digitaler Medien als Schulentwicklungsaufgabe. *Zeitschrift für Pädagogik* 66(2), 208-224. <https://doi.org/10.25656/01:23629>
- Grundke, R., Jamet, S., Kalamova, M., Keslair, F., & Squicciarini, M. (2017). Skills and global value chains: A characterization. *OECD Science, Technology and Industry Working Papers 2017(05)*, OECD Publishing.
- Guicciardini, N. (1999). Newton's Method and Leibniz's Calculus. In H. N. Jahnke (Hrsg.), *A History of Analysis* (S. 73-104). American Mathematical Society. <https://doi.org/10.1090/hmath/024>

- Hagl, R. (2015). *Das 3D-Druck-Kompendium. Leitfaden für Unternehmer, Berater und Innovationstreiber*. Springer Fachmedien.
- Hankeln, C. (2018). *Mathematisches Modellieren mit dynamischer Geometrie-Software. Ergebnisse einer Interventionsstudie* (Dissertation, Westfälische Wilhelms-Universität Münster). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-23339-6>
- Härtig, H., Kampschulte, L., Lindmeier, A., Ostermann, A., Ropohl, M., & Schwane-wedel, J. (n.d.). *Einsatz digitaler und analoger Medien im mathematisch-naturwis-senschaftlichen Unterricht*. <https://www.ipn.uni-kiel.de/de/forschung/pro-jekte/alte-projekte/miu/broschuere-miu-medieneinsatz-an-schulischen-lernorten-v5-1>
- Härtwig, C., & Saponova, A. (2020). Keine Angst vor der Digitalisierung! Zum Stand digitalisierter Arbeitsanforderungen in verschiedenen Industriebranchen und Tätig-keitsfeldern sowie Zusammenhänge zwischen Belastung, Ressourcen und Bean-spruchungsfolgen in Deutschland, *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 75, 58-73, <https://doi.org/10.1007/s41449-020-00205-y>
- Harwardt, M., & Schmutte, A. M. (2020). Die Welt verändert sich rapide – „Industrie 4.0“ und die digitale Transformation. In: M. Harwardt, P. F.-J. Niermann, A. M. Schmutte & A. Steuernagel (Hrsg.), *Führen und Managen in der digitalen Trans-formation*. Springer Fachmedien.
- Helfrich-Schkarbanenko, A. (2023). *Mathematik und ChatGPT. Ein Rendezvous am Fuße der technologischen Singularität*. Springer Spektrum.
- Hellwagner, T., Söhnlein, D., & Weber, E. (2023). *Modeling Migration Dynamics in Stochastic Labor Supply Forecasting*. (IAB-Discussion Paper 05/2023). Institute for Employment Research of the Federal Employment Agency (IAB) <https://doi.org/10.48720/IAB.DP.2305>
- Hermeier, B., Heupel, T., & Fichtner-Rosada, S. (2019). *Arbeitswelten der Zukunft. Wie die Digitalisierung unsere Arbeitsplätze und Arbeitsweisen verändert*. Springer Gabler.
- Hew, K. F., & Brush, T. (2007). Integrating Technology into K-12 Teaching and Learning: Current Knowledge Gaps and Recommendations for Future Research. *Education Technology Research and Development*, 55, 223-252. <http://dx.doi.org/10.1007/s11423-006-9022-5>.
- Hörnberger, K. (2023). LEGO®-Robotik im Mathematikunterricht. *MNU Jour-nal* 2023(2), 143-147.
- Hughes, J. (2005). The Role of Teacher Knowledge and Learning Experiences in Forming Technology-Integrated Pedagogy. *Journal of Technology and Teacher Education*, 13(2), 277-302.
- Janneck, M., Vincent-Höper, S., & Ehrhardt, J. (2014). The computer-related self concept: A gender-sensitive study. *International Journal of Social and Organizational Dynamics in IT*, 3(3), 1–16. <http://dx.doi.org/10.4018/ijsoedit.2013070101>.
- Jonas, K., Stroebe, W., & Hewstone, M. (Hrsg.) (2014). *Sozialpsychologie*. Springer, 6. Auflage
- Junk, S. (2017). *Onshape – kurz und bündig. Praktischer Einstieg in Cloud-basiertes CAD und 3D-Druck*. Springer Fachmedien.
- Kaiser, F.-J. (1979). Berufswahlunterricht. In: Bundesanstalt für Arbeit (Hrsg.), *Hand-buch zur Berufswahlvorbereitung*. Medialog.

- Kaiser, G., Blum, W., Borromeo Ferri, R., & Greefrath, G. (2023). Anwendungen und Modellieren. In: Bruder, R., Büchter, A., Gasteiger, H., Schmidt-Thieme, B., Weigand, HG. (Hrsg.), *Handbuch der Mathematikdidaktik*. 2. Auflage. Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-66604-3>
- Kaiser, S., Kozica, A., Littig, B., Müller, M., Rauch, R., & Thiemann, D. (2021). Di-giTraIn 4.0: Ein Beratungskonzept für die Transformation in eine digitale Arbeitswelt. In W. Bauer, S. Mütze-Niewöhner, S. Stowasser, C. Zanker & N. Müller (Hrsg.), *Arbeit in der digitalisierten Welt. Praxisbeispiele und Gestaltungslösungen aus dem BMBF-Förderschwerpunkt*. Springer.
- Kirchner, S. (2015). Konturen der digitalen Arbeitswelt. *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie*, 67(4), 763-791. <https://doi.org/10.1007/s11577-015-0344-3>
- Kirkpatrick, D. L. (1959/60). Techniques for evaluating training programs Part I, II, III and IV. *Journal of the American Society of Training Directors*, 13(11), 13(12), 14(1) and 14(2).
- Krisch, O., Kastl, P., & Romeike, R. (2017). 3D-Druck als Motivation für die Einführung in die Programmierung in der Realschule. In: I. Diehelm (Hrsg.), *Informatische Bildung zum Verstehen und Gestalten der digitalen Welt, Lecture Notes in Informatics (LNI)*. Gesellschaft für Informatik.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2004). *Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz*. Abgerufen am 23.08.2024 unter https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Konzeption-Entwicklung.pdf.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2017a). *Empfehlung zur Beruflichen Orientierung an Schulen*. Abgerufen am 23.08.2024 unter https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2017/2017_12_07-Empfehlung-Berufliche-Orientierung-an-Schulen.pdf.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2017b). *Bildung in der digitalen Welt*. Abgerufen am 23.08.2024 unter https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/PresseUndAktuelles/2017/Strategie_neu_2017_datum_1.pdf.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2019). *Ländergemeinsame inhaltliche Anforderungen für die Fachwissenschaften und Fachdidaktiken in der Lehrerbildung*. Abgerufen am 23.08.2024 unter https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2008/2008_10_16-Fachprofile-Lehrerbildung.pdf.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2021). *Lehren und Lernen in der digitalen Welt. Die ergänzende Empfehlung zur Strategie „Bildung in der digitalen Welt“*. Abgerufen am 23.08.2024 unter https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2021/2021_12_09-Lehren-und-Lernen-Digi.pdf.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2022). *Bildungsstandards für das Fach Mathematik Erster Schulabschluss (ESA) und Mittlerer Schulabschluss (MSA)*. Abgerufen am 23.08.2024 unter https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2022/2022_06_23-Bista-ESA-MSA-Mathe.pdf.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2023). *Vereinbarung zur Gestaltung der gymnasialen Oberstufe und der Abiturprüfung*. Abgerufen am 23.08.2024 unter https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/1972/1972_07_07-VB-gymnasiale-Oberstufe-Abiturpruefung.pdf.

- Lage, M. J., Platt, G. J., & Treglia, M. (2000). Inverting the classroom: A gateway to creating an inclusive learning environment. *The Journal of Economic Education*, 31(1), 30-43. <http://dx.doi.org/10.1080/00220480009596759>
- Lavicza, Z., Haas, B., & Kreis, Y. (2020). Discovering Everyday Mathematical Situations Outside the Classroom with MathCityMap and GeoGebra 3D. In M. Ludwig et al. (Hrsg.), *Research on Outdoor STEM Education in the digital Age: Proceedings of the ROSETA Online Conference in June 2020* (S. 23-30). WTM.
- Leiner, D. J. (2024). SoSci Survey (Version 3.5.07) [Computer software]. Verfügbar unter <https://www.sosicisurvey.de>.
- Lipowsky, F. (2009). Unterrichtsentwicklung durch Fort- und Weiterbildungsmaßnahmen für Lehrpersonen. *Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung*, 27(3), 346-360. <https://doi.org/10.25656/01:13705>
- Lipowsky, F., & Rzejak, D. (2021). Fortbildungen für Lehrpersonen wirksam gestalten. Ein praxisorientierter und forschungsgestützter Leitfaden. Bertelsmann Stiftung. Abgerufen am 23.08.2024 unter <https://www.bertelsmann-stiftung.de/de/publikationen/publikation/did/fortbildungen-fuer-lehrpersonen-wirksam-gestalten>.
- Lorenz, R., & Eickelmann, B. (2022). Veränderungen durch die Corona-Pandemie mit Blick auf die Nutzung digitaler Medien in der Sekundarstufe 1 im Bundesländervergleich – technische Ausstattung, Unterrichtsorganisation und Leistungsbewertung. In R. Lorenz, S. Yotyodying, B. Eickelmann & M. Endberg (Hrsg.), *Schule digital – der Länderindikator 2021. Lehren und Lernen mit digitalen Medien in der Sekundarstufe 1 in Deutschland im Bundesländervergleich und im Trend seit 2017* (S. 161-186). Waxmann.
- Maaz, K., & Diedrich, M. (2020). Schule unter Pandemiebedingungen: "Lockdown" - "Hybridmodell" - "Normalbetrieb" - In: *Aus Politik und Zeitgeschichte* (2020) 51, 15-21. <https://doi.org/10.25656/01:23317>
- MacDonald, C., & Hinterseer, A.-L. (2020). Entdeckendes Lernen im Mathematikunterricht: Mit Robotik zu den negativen Zahlen. *Mathematik im Unterricht*, 11(2020), 57-70. <https://doi.org/10.25598/miu/2020-11-6>
- Mann, A., Denis, V., Schleicher, A., Ekhtiari, H., Forsyth, T., Liu, E., & Chamber, N. (2020). *Dream Jobs? Teenagers' Career Aspirations and the Future of Work*. OECD
- Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken* (12., überarb. Aufl.). Beltz
- Menano, L., Fidalgo, P., Santos, I. M., & Thormann, J. (2019). Integration of 3D printing in Art Education: A Multidisciplinary Approach. *Computers in the Schools*, 36(3), 222-236. <http://dx.doi.org/10.1080/07380569.2019.1643442>
- Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur des Landes Schleswig-Holstein (MBWK SH) (2014). Fachanforderungen Mathematik. Allgemeinbildende Schulen, Sekundarstufe 1, Sekundarstufe 2. MBWK SH.
- Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur des Landes Schleswig-Holstein (MBWK SH) (2018). Ergänzung zu den Fachanforderungen Medienkompetenz – Lernen mit digitalen Medien. Allgemeinbildende Schulen, Sekundarstufe 1, Sekundarstufe 2. MBWK SH.
- Mishra, P. & Koehler, M. J. (2006). Technological pedagogical content knowledge: A framework for teacher knowledge. *Teachers College Record*, 108 (6), 1017-1054. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-9620.2006.00684.x>

- Koehler, M.J., Mishra, P., Kereluik, K., Shin, T.S., Graham, C.R. (2014). The Technological Pedagogical Content Knowledge Framework. In: Spector, J., Merrill, M., Elen, J., Bishop, M. (Hrsg.) *Handbook of Research on Educational Communications and Technology* (S. 101-111). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3185-5_9
- Moise, E. (1952). Affine structures in 3 -manifolds. V. The triangulation theorem and Hauptvermutung. *Ann. of Math.* (2)56. 96–114.
- Mulhern, G., & Wylie, J. (2006). Mathematical Prerequisites for Learning Statistics in Psychology: Assessing Core Skills of Numeracy and Mathematical Reasoning among Undergraduates. *Psychology Learning & Teaching*, 5(2), 119–132. <https://doi.org/10.2304/plat.2005.5.2.119>
- Mußmann, F., Hardwig, T., Riethmüller, M., & Klötzer, S. (2021). *Digitalisierung im Schulsystem 2021. Arbeitszeit, Arbeitsbedingungen, Rahmenbedingungen und Perspektiven von Lehrkräften in Deutschland*. <https://doi.org/10.3249/ugoe-publ-10>
- National Council of Teachers of Mathematics (NCTM) (2000). *Principles and Standards for School Mathematics*. National Council of Teachers of Mathematics.
- Newhouse, C. (2001). Development and Use of an Instrument for Computer-Supported Learning Environments. *Learning Environments Research*. 4, 115-138. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1012411332666>
- Nieveen, N., & Folmer, E. (2013). Formative Evaluation in Educational Design Research. In: Plomp, T. & Nieveen, N. (Hrsg.), *Educational Design Research. Part A: An introduction* (S. 152-169). Netherlands Institute for Curriculum Development (SLO).
- Niss, M. (1994). Mathematics in Society. In R. Biehler, R. W. Scholz, R. Strässer, & B. Winkelmann (Hrsg.), *Didactics of Mathematics as a Scientific Discipline* (S. 367–378). Kluwer Academic Publishers.
- Ng, O.-L. (2017). Exploring the use of 3D Computer-Aided Design and 3D printing for STEAM Learning in Mathematics. *Digit Exp Math Educ* 2017(3), 257-263. <https://doi.org/10.1007/s40751-017-0036-x>
- OECD (2021). *Zurück in die Zukunft: Vier OECD-Szenarien für Schule und Bildung*. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/4d027cb3-de>.
- Osbahr, L. (2023). *3D-Druck als Lernkontext im Mathematikunterricht am Beispiel der Tessellierung. Erstellung und Evaluation einer Unterrichtseinheit zum Inhalt Simplex-Eckpunktmodelle in der Sekundarstufe I* (Masterarbeit, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel).
- Ostermann, A., Ghomi, M., Mühling, A., & Lindmeier, A. (2022) Elemente der Professionalität von Lehrkräften in Bezug auf digitales Lernen und Lehren von Mathematik. In G. Pinkernell, F. Reinhold, F. Schacht, & D. Walter (Hrsg.), *Digitales Lehren und Lernen in der Schule* (S.59–89). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-65281-7_4.
- Ostermann, A., Lindmeier, A., Härtig, H., Kampschulte, L., Ropohl, M., & Schwane-wedel, J. (2021). *Mathematik-spezifische Medien nutzen: Was macht den Unterschied – Lehrkraft, Schulkultur oder Technik?*. 2021. 199-217. [10.31244/dds.2021.02.07](https://doi.org/10.31244/dds.2021.02.07).
- Otto, D. (2022). Die Förderung von Open Educational Resources (OER) in der Hochschule. *Zeitschrift für Hochschulentwicklung*, 17(2), 217–236. <https://doi.org/10.3217/zfhe-17-02/12>

- Otto, D. (2024). Von der (normativen) Idee zur (pädagogischen) Praxis. Eine kritische Betrachtung von 20 Jahren OER aus der Perspektive einer gestaltungsorientierten Bildungsforschung. *MedienPädagogik* 62 (InDigO): 25–39. <https://doi.org/10.21240/mpaed/62/2024.07.02.X>.
- Otto, D., Schröder, N., Diekmann, D., & Sander, P. (2021). Offen gemacht: Der Stand der internationalen evidenzbasierten Forschung zu Open Educational Resources (OER). *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft* 24, 1061–1085. <https://doi.org/10.1007/s11618-021-01043-2>
- Petko, D., Prasse, D., & Cantieni, A. (2018). The interplay of school readiness and teacher readiness for educational technology integration: A structural equation model. *Computers in the Schools*, 1-18. <http://dx.doi.org/10.1080/07380569.2018.1428007>
- Pinto, M., & Leite, C. (2020). Digital technologies in support of students learning in Higher Education: literature review. *Digital Education Review*. <https://doi.org/10.1344/der.2020.37.343-360>
- Plomp, T. (2013). Educational Design Research: An introduction. In Plomp, T. & Nieveen, N. (Hrsg.), *Educational Design Research. Part A: An introduction* (S. 10-51). Netherlands Institute for Curriculum Development (SLO).
- Plomp, T. & Nieveen, N. (2013). *Educational Design Research. Part A: An introduction*. Netherlands Institute for Curriculum Development (SLO).
- Reinhold, F., Walter, D., & Weigand, H.-G. (2023). Digitale Medien. In: Bruder, R., Büchter, A., Gasteiger, H., Schmidt-Thieme, B., Weigand, HG. (Hrsg.), *Handbuch der Mathematikdidaktik* (S. 523-559). 2. Auflage. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-66604-3>
- Reintjes, C., Porsch, R. & Brahm, G. (Hrsg.) (2021). *Das Bildungssystem in Zeiten der Krise. Empirische Befunde, Konsequenzen und Potenziale für das Lehren und Lernen*. Waxmann. <https://doi.org/10.31244/9783830993629>
- Reißig, B. (2023). Übergänge von der Schule in den Beruf und Herausforderungen für die berufliche Orientierung. In: K. Böllert, J. Demski, & O. Bokelmann, (Hrsg.), *Ganztagsbildung. Soziale Arbeit als Wohlfahrtsproduktion, vol 26* (S. 143-158). Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-41848-9_9
- Rodrigues, A. L. (2020). Digital technologies integration in teacher education: the active teacher training model. *Journal of E-Learning and Knowledge Society*, 16(3), 24-33. <http://dx.doi.org/10.20368/1971-8829/1135273>
- Rohenroth, D., Neumann, I., & Heinze, A. (2023a). High school students' perceptions on the relevance of mathematics in higher education. In: M. Ayalon, B. Koichu, R. Leikin, L. Rubel, M. Tabach (Hrsg.), *Proceedings of the 46th Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education* (Band 4), PME.
- Rohenroth, D., Neumann I. & Heinze, A. (2023b) Mathematical prerequisites for non-STEM programs. *Frontiers in Education*. 8:1089509. <https://doi.org/10.3389/educ.2023.1089509>
- Rohleder, B. (2021). *Industrie 4.0 – so digital sind Deutschlands Fabriken*. Abgerufen am 23.08.2024 unter https://www.bitkom.org/sites/default/files/2021-04/bitkom-charts-industrie-4.0-07-04-2021_final.pdf.
- Rosenberg, M. J. & Hovland, C. I. (1960) Cognitive, Affective and Behavioral Components of Attitudes. In: M.J. Rosenberg & C.I. Hovland (Hrsg.), *Attitude*

- Organization and Change: An Analysis of Consistency among Attitude Components* (S. 1-14). Yale University Press.
- Saner, P. (2022). *Datenwissenschaften und Gesellschaft: Die Genese eines transversalen Wissensfeldes*. transcript Verlag.
- Schall, M., & Howe, F. (2024). *Berufliche Handlungskompetenz von betrieblichem Ausbildungspersonal: Ein Kompetenzmodell für die Erstellung von Kompetenzprofilen und die Entwicklung von Bildungsangeboten*. Verlag Barbara Budrich.
- Schmid, U., Goertz, L., Radomski, S., Thom, S., & Behrens, J. (2017). *Monitor Digitale Bildung. Die Hochschulen im digitalen Zeitalter*. Bertelsmann Stiftung.
- Schulgesetz Schleswig-Holstein (SchulG SH). (2007). Abgerufen am 23.08.2024 unter <https://www.gesetze-rechtsprechung.sh.juris.de/bssh/document/jlr-SchulGSH2007rahmen/part/X>.
- Schuur, R., & Janssen, B. (2018). Adoption of Sharing and Reuse of Open Resources by Educators in Higher Education Institutions in the Netherlands: A Qualitative Research of Practices, Motives, and Conditions. *The International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 19(3). <https://doi.org/10.19173/irrodl.v19i3.3390>
- Selwyn, N. (2013). *Education in a Digital World. Global Perspectives on Technology and Education*. Routledge.
- Shulman, L. S. (1986). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, 15 (2), 4-14.
- Simon, M. A. (1995). Reconstructing mathematics pedagogy from a constructivist perspective. *Journal for Research in Mathematics Education* 26, 114-145. <http://dx.doi.org/10.2307/749205>
- Ständige Wissenschaftliche Kommission der Kultusministerkonferenz (SWK). (2022). *Digitalisierung im Bildungssystem: Handlungsempfehlungen von der Kita bis zur Hochschule. Gutachten der Ständigen Wissenschaftlichen Kommission der Kultusministerkonferenz (SWK)*. SWK. <https://doi.org/10.25656/01:25273>
- Starke-Meyerring, D., & Wilson, M. (2008). *Designing globally networked learning environments: visionary partnerships, policies and pedagogies*. Sense.
- Stillmann, G. A. (2019). State of the Art on Modelling in Mathematics Education – Lines of Inquiry. In G. A. Stillmann & J. P. Brown (Hrsg.), *Lines of Inquiry in Mathematical Modelling Research in Education* (S. 1-20). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14931-4_1
- Sun, Y., & Li, Q. (2017). The application of 3D printing in mathematics education. *12th International Conference on Computer Science and Education (ICCSE)*, 47-50. <https://doi.org/10.1109/ICCSE.2017.8085461>
- Taskinen, P., Asseburg, R. & Walter, O. (2008). Wer möchte später einen naturwissenschaftsbezogenen oder technischen Beruf ergreifen? Kompetenzen, Selbstkonzept und Motivationen als Prädiktoren der Berufserwartungen in PISA 2006. In M. Prenzel & J. Baumert (Hrsg.), *Vertiefende Analysen zu PISA 2006* (S. 79-105). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Unfried, A., Faber, M., Stanhope, D. S., & Wiebe, E. (2015). The Development and Validation of a Measure of Student Attitudes Toward Science, Technology, Engineering, and Math (S-STEM). *Journal of Psychoeducational Assessment*, 33(7), 622-639. <https://doi.org/10.1177/0734282915571160>

- Van den Akker, J. (2013). Curricular Development Research as a Specimen of Educational Design Research. In: Plomp, T. & Nieveen, N. (Hrsg.), *Educational Design Research. Part A: An introduction* (S. 52-71). Netherlands Institute for Curriculum Development (SLO).
- Vanscoeder, J. (2014). 3D Printing As A Tool For Teaching And Learning In STEAM Education. In M. Searson & M. Ochoa (Hrsg.), *Proceedings of SITE 2014. Society for Information Technology & Teacher Education International Conference* (pp. 188-191). Association for the Advancement of Computing in Education (AACE).
- Vogelsang, C., Finger, A., Laumann, D., & Thyssen, C. (2019). Vorerfahrungen, Einstellungen und motivationale Orientierungen als mögliche Einflussfaktoren auf den Einsatz digitaler Werkzeuge im naturwissenschaftlichen Unterricht. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 25(3), 115-129. <http://dx.doi.org/10.1007/s40573-019-00095-6>
- Wakefield, R. L. (2015). The Acceptance and Use of Innovative Technology: Do Positive and Negative Feelings Matter? *The DATABASE for Advances in Information Systems* 46(4), 48-67. <http://dx.doi.org/10.1145/2843824.2843828>
- Walker, D. (1990). *Fundamentals of curriculum*. Harcourt, Brace, College.
- Wigfield, A. (1994). Expectancy-value theory of achievement motivation: A developmental perspective. *Educational Psychology Review*, 6(1), 49-78. <https://doi.org/10.1007/BF02209024>
- Wigfield, A., & Eccles, J. S. (1992). The development of achievement task values: A theoretical analysis. *Developmental Review*, 12(3), 265-310. [https://doi.org/10.1016/0273-2297\(92\)90011-P](https://doi.org/10.1016/0273-2297(92)90011-P)
- Wilcoxon, F. (1945). Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin*, 1(6), 80-83. <https://doi.org/10.2307/3001968>
- Willinsky, J. (2009). Forward. In C. Vrasidas, M. Zembylas & G. Glass (Hrsg.), *ICT for education, development and social justice* (pp. xi-xiv). Information Age.
- Winter, H. (1995). Mathematikunterricht und Allgemeinbildung. *Mitteilungen der Gesellschaft für Didaktik der Mathematik*, 21(61), 37-46
- Witzke, I., & Heitzer, J. (2019). 3D-Druck: Chance für den Mathematikunterricht? Zu Möglichkeiten und Grenzen eines digitalen Werkzeugs. In: *Mathematik Lehren* 217 (2019), 2-9.
- Wozney, L. & Venkatesh, V., & Abrami, P. (2006). Implementing Computer Technologies: Teachers' Perceptions and Practices. *Journal of Information Technology for Teacher Education*, 14, 173-207.
- Wulff, M. H., Radkowitzsch, A., Wilken, M., & Heinze, A. (2023a). Wie sehen Lehrkräfte die Nutzung des 3D-Drucks als Lernkontext im Mathematikunterricht der Sekundarstufe? in F. Dilling, D. Thurm, & I. Witzke (Hrsg.), *Digitaler Mathematikunterricht in Forschung und Praxis: Tagungsband zur Vernetzungstagung 2022 in Siegen* (S. 263-273). (Mathematiklernen mit digitalen Medien; Band 3). WTM. <https://doi.org/10.37626/GA9783959872041.0.26>
- Wulff, M. H., Wilken, M., & Heinze, A. (2023b). Increasing the skills on occupationally relevant digital technologies among students in Southern Denmark and Northern Germany: 3D printing as a learning context in regular mathematics class. In F. Dilling, F. Pielsticker, & I. Witzke (Hrsg.), *Learning mathematics in the context of 3D printing: Proceedings of the International Symposium on 3D Printing in Mathematics Education* (S. 51-72). (MINTUS - Beiträge zur mathematisch-

naturwissenschaftlichen Bildung). Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-658-38867-6_3

- Wulff, M. H., Radkowitzsch, A., & Heinze, A. (2023c). Learning about digital technologies of the working world in regular math classes? Teaching composite bodies with 3D print as a learning context. In M. Ayalon, B. Koichu, R. Leikin, L. Rubel., & M. Tabach (Hrsg.), *Proceedings of the 46th Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education*, Vol. 4. PME 46
- Yotyodying, S., & Lorenz, R. (2022). Einschätzung der IT-Ausstattung und des IT-Supports der Schulen der Sekundarstufe 1 aus Lehrkräfteperspektive im Bundesländervergleich und im Trend seit 2017. In R. Lorenz, S. Yotyodying, B. Eickelmann & M. Endberg (Hrsg.), *Schule digital – der Länderindikator 2021. Lehren und Lernen mit digitalen Medien in der Sekundarstufe 1 in Deutschland im Bundesländervergleich und im Trend seit 2017* (S. 41-61). Waxmann. <https://doi.org/10.25656/01:24606>
- Zhao, Y., & Frank, K. A., (2003). An ecological analysis of factors affecting technology use in schools. *American Educational Research Journal*, 40, 807-840. <http://dx.doi.org/10.3102/00028312040004807>
- Zimbardo, P., & Gerrig, R. (2003). *Psychologie*. (7., neu übersetzte und bearbeitete Auflage). Springer.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von der Beratung durch die Betreuerinnen und Betreuer meines Projekts, in Inhalt und Form selbstständig verfasst habe. Die Arbeit ist unter Einhaltung der Regeln guter wissenschaftlicher Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft entstanden. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Die vorliegende Arbeit wurde weder im Ganzen noch in Teilen an einer anderen Stelle im Rahmen eines Prüfungsverfahrens vorgelegt. Teile dieser Arbeit wurden bereits in Form von Zeitschriftenartikeln oder Buchkapiteln publiziert oder wurden zur Publikation eingereicht. Mit wurde kein akademischer Grad entzogen.

Kiel, den 29.08.2024

Mira Hykkelbjerg Wulff