



Medienimpulse
ISSN 2307-3187
Jg. 64, Nr. 1 2026
doi: 10.21243/mi-01-26-14
Lizenz: CC-BY-NC-ND-3.0-AT

Von der Konstruktion zur Kooperation: 3D-Druck als Lernfeld im Kontext Digitaler Grundbildung

Dominik Hagmüller

Tobias Buchner

Der Beitrag untersucht, inwiefern 3D-Druck als maker-orientiertes Lernfeld geeignet ist, die im österreichischen Primarstufenlehrplan formulierten Zielsetzungen der Digitalen Grundbildung (BMBWF, 2023) in tragfähige Unterrichtspraxis zu überführen. Ausgehend von curricularen Anforderungen (u. a. kreativer, verantwortungsvoller Technologieeinsatz, Problemlösen, Kooperation, projektorientiertes Arbeiten) sowie empirisch beschriebenen Umsetzungshemmnissen (heterogene digitale Kompetenzen von Lehrpersonen, begrenzte Fortbildungsstrukturen, infrastrukturelle und zeitliche Restriktionen) wird Maker Education als didaktischer Rahmen diskutiert, der gestaltendes, iteratives und

reflexives Lernen unterstützt. Vor diesem Hintergrund werden Erfahrungen aus einem mehrjährigen Schulentwicklungsprojekt an der Europaschule (Praxisschule der Pädagogischen Hochschule Oberösterreich) dargestellt und analytisch gerahmt. Die Ergebnisse der Studie deuten darauf hin, dass 3D-Druck als Scharnier zwischen digitaler Modellierung und materieller Produktion Lerngelegenheiten eröffnet, die digitale Gestaltungskompetenz, räumliches Denken, Fehlerkultur und kooperative Problemlösefähigkeit fördern. Besonders wirksam erweist sich Peer-Learning als Skalierungsstrategie, da es Expertise sichtbar macht, Rollenarrangements flexibilisiert und trotz begrenzter Ressourcen eine breitere curriculare Integration ermöglicht. Gleichzeitig werden transferrelevante Grenzen sichtbar: Abhängigkeit von Wartung und Infrastruktur, Bedarf an koordinierten Produktionsfenstern sowie die Notwendigkeit kuratierter Aufgaben, die fachliche Lernziele explizit mit Konstruktionslogiken verbinden. Zum Abschluss des Artikels werden praxisnahe Empfehlungen formuliert.

This article examines the extent to which 3D printing is suitable as a maker-oriented field of learning for translating the objectives of digital literacy (BMBWF, 2023) formulated in the Austrian primary school curriculum into viable teaching practice. Based on curricular requirements (including creative, responsible use of technology, problem solving, cooperation, project-oriented work) and empirically described implementation barriers (heterogeneous digital skills of teachers, limited training structures, infrastructural and time restrictions), maker education is discussed as a didactic framework that supports creative, iterative and reflective learning. Against this background, experiences from a multi-year school development project at the Europaschule (practice school of the University of Education Upper Austria) are presented and analytically framed. The results of the study indicate that 3D printing, as a hinge between digital

modelling and material production, opens up learning opportunities that promote digital design skills, spatial thinking, a culture of error and cooperative problem-solving skills. Peer learning proves to be a particularly effective scaling strategy, as it makes expertise visible, makes role arrangements more flexible and enables broader curricular integration despite limited resources. At the same time, transfer-relevant limitations become apparent: dependence on maintenance and infrastructure, the need for coordinated production windows and the necessity of curated tasks that explicitly link subject-specific learning objectives with design logic. The article concludes with practical recommendations.

1. Einleitung: Digitale Grundbildung in der Primarstufe? Curriculare Anforderungen, Herausforderungen und Möglichkeiten

Der aktuelle österreichische Lehrplan der Volksschule versteht schulische Bildung als kompetenzorientierten Prozess, der kognitive, soziale und personale Dimensionen integriert. Neben fachlichen Lernbereichen werden fächerübergreifende Kompetenzen formuliert, zu denen insbesondere die *Digitale Grundbildung* zählt (BMBWF, 2023). Digitale Grundbildung sieht als Querschnittsmaterie vor, dass Schülerinnen und Schüler digitale Technologien nicht ausschließlich rezeptiv nutzen, sondern sie aktiv, kreativ und verantwortungsvoll einsetzen – und digitale Artefakte selbst gestalten. Kinder sollen grundlegende Funktionsweisen digitaler Systeme begreifen und sich in Relation zu diesen reflektieren lernen. Dadurch soll der unterrichtliche Fokus weg von einer anwenderinnen- und anwenderbezogenen Mediennutzung hin zu einer

gestaltenden Auseinandersetzung mit Technologie verschoben werden. Im Curriculum der Primarstufe werden zudem die transdisziplinären Potenziale der genannten Querschnittsmaterie an mehreren Stellen extrapoliert, etwa in der nachfolgenden Passage:

Die Digitale Grundbildung bietet vielfache Möglichkeiten zum fächerverbindenden Unterricht, unter der besonderen Berücksichtigung der Schnittstellen von der digitalen zur analogen Welt (BMBWF, 2022, S. 3).

Zudem definiert der Lehrplan Problemlösefähigkeit, *critical thinking*, *design thinking*, Kreativität, Kooperation und projektorientiertes Arbeiten als mit Digitaler Grundbildung verwobene Bildungsziele (BMBWF, 2022, S. 3). Insgesamt soll Schule laut dem Curriculum der Primarstufe entdeckendes, eigenständiges und forschendes Lernen ermöglichen, wobei Fehler ausdrücklich als Lerngelegenheiten betrachtet werden sollen.

Die konkrete unterrichtliche Umsetzung dieser curricularen Ziele stellt jedoch nach wie vor eine Herausforderung für Schulen sowie Pädagoginnen und Pädagogen dar (Hörmann et al., 2024). Lehrkräfte verfügen häufig über heterogene digitale Kompetenzen und unterrichten teils fachfremd, während verbindliche Fortbildungsstrukturen begrenzt sind (Atzesberger et al., 2020). Zudem erschweren unklare Vorgaben im Lehrplan, Zeitressourcen und infrastrukturelle Unterschiede eine konsistente Integration in den Unterricht (Hörmann et al., 2023). Digitale Grundbildung bleibt daher oftmals von der individuellen Initiative von Lehrkräf-

ten abhängig, statt systematisch verankert zu sein – wohl auch weil Digitale Grundbildung einen relativ jungen Gegenstand darstellt und somit auch in der Aus- und Weiterbildung für Lehrkräfte erst seit Kurzem verankert ist (Hörmann et al., 2024).

Anknüpfend an die dargelegten Befunde und Problemstellungen möchten wir mit dem vorliegenden Beitrag anhand unserer Erfahrungen mit der Gestaltung von Lernumwelten, die dem Ansatz der Maker Education in der Primarstufe folgen, die Potenziale für die Erfüllung der skizzierten curricularen Vorgaben erkunden.

In den nachfolgenden Kapiteln dieses Artikels arbeiten wir auf Basis wissenschaftlicher Literatur zunächst die generellen Anliegen sowie empirischen Befunde zur Umsetzung von Maker Education, insbesondere 3D-Druck, in der Primarstufe heraus. Das Herzstück des Artikels bilden unsere im dritten Punkt des vorliegenden Artikels dargelegten Erfahrungen zur Implementierung von Maker Education an der Praxisschule der *Pädagogischen Hochschule Oberösterreich* dar. Dabei ziehen wir einen Bogen über die Anfänge der Beschäftigung mit Maker Education, insbesondere der Einrichtung des *Maker Education Lab*, bevor zwei zentrale Teilprojekte der digitalen Schulentwicklung ausführlicher beschrieben werden: die Unverbindliche Übung „3D-Druck in der Primarstufe“ sowie ein damit verknüpftes Peer-Learning-Programm – aus dem schließlich auch schulinterne Fortbildungen resultierten, in denen Schülerinnen und Schüler als Expertinnen und Experten, Lehrerinnen und Lehrer zu 3D-Druck lehrten. Im Rahmen unserer Ausführungen ziehen wir stets die Frage mit, welche Anknüpfungs-

punkte unser Projekt für die Umsetzung der zuvor erläuterten curricularen Vorgaben bot. Am Ende des Artikels formulieren wir Konklusionen in Bezug auf zentrale Erkenntnisse für das Etablieren von Maker Education als Digitale Grundbildung an anderen Schulen.

2. Hintergründe und Erkenntnisse aus der Forschung: Maker Education und 3D-Druck (in der Primarstufe)

Im Folgenden möchten wir in Hinführung auf die Darstellung unserer Erfahrungen mit Maker Education als fruchtbares didaktisches Medium zur Umsetzung digitaler Grundbildung zunächst wesentliche theoretische Grundlagen von Maker Education und 3D-Druck darlegen und mit empirischen Erkenntnissen zu Potenzialen und Herausforderung für deren Umsetzung im Kontext der Primarstufe verknüpfen.

2.1 Maker Education

Maker Education steht für einen pädagogischen Ansatz, in dessen Rahmen Lernende Wissen durch aktives Gestalten, Experimentieren und Problemlösen mit analogen und digitalen Materialien aneignen (Blikstein, 2018). Aufbauend auf konstruktivistischen Lerntheorien erstellen Schülerinnen und Schüler eigene Artefakte und reflektieren die dafür notwendigen Konstruktionsprozesse. Maker Education setzt sich zum Ziel, handlungsorientiertes, kollaboratives und kritisch-reflektiertes Lernen zu ermöglichen (Barberi et al., 2020). Bezogen auf Unterricht bedeutet dies eine projekt- und

prozessorientierte Ausrichtung, wobei Kooperation, Kreativität und iterative Verbesserung zentrale Rollen spielen sollen (Himpsl-Gutermann et al., 2020). Maker Education verbindet dabei fachliches Lernen mit informatischer Bildung und zielt auf das Kreieren von Selbstwirksamkeits- und Teilhabeerfahrungen, indem Lernende Technologien nicht nur nutzen, sondern als gestaltbar erfahren können sollen. Lernräume sollen demgemäß so gestaltet sein, dass sie „von Kindern und Jugendlichen selbstorganisiert aufgefüllt werden können“ (Schön et al., 2019, S. 50). Die darin stattfindenden Lernprozesse orientieren sich an Grundsätzen des gemeinschaftlichen und projektbasierten Lernens (Morgenbesser, 2019). Damit geht auch eine veränderte professionelle Rolle der Lehrpersonen einher: Diese sollten den hier dargelegten Prämissen entsprechend verstärkt die Funktion von (Lern-)Coaches einnehmen, die projektorientiert und fachübergreifend Aneignungsprozesse begleiten (Morgenbesser, 2019). Anschließend an diese Setzungen wird Maker Education auch häufig mit dem Anspruch verbunden, schulische Strukturen zu transformieren – und derart Lernumwelten zu etablieren, die anderen Logiken folgen als standardisierten Leistungsbeurteilungen und orthodox ausgerichteten Fachunterricht in Klassen (Martin, 2015). Entsprechend wird Maker Education auch als Chance für eine solche Neuausrichtung von Schule gehandelt (Blikstein, 2013).

Auf das Potenzial zur konkreten Erfüllung dieser Anliegen verweisen schließlich auch zahlreiche empirische Studien. Eine rezente Veröffentlichung zeigt etwa, dass nach den geschilderten Grund-

sätzen von Maker Education entsprechende Lernumgebungen in der Primarstufe besonders Motivation, Selbstwirksamkeit und kooperative Problemlösefähigkeit fördern können (Li et al., 2024). Kinder entwickeln dabei nicht nur fachliche Kenntnisse, sondern auch kreative Designkompetenzen und räumliches Denken, wenn sie Ideen iterativ testen und überarbeiten können (Krebs, 2026). Gleichzeitig verweisen wissenschaftliche Arbeiten jedoch auch auf mitunter erhebliche Herausforderungen. Lehrkräfte benötigen häufig didaktische und technische Unterstützung sowie zusätzliche Zeitressourcen, um Maker Education als offene Projektarbeit in Schulen zu begleiten (Halliburton et al., 2024). Zudem zeigen sich bedeutsame Spannungsfelder in Relation zu traditionellen Strukturen und Rollen von Schule. So arbeiten Sheridan und Kolleginnen wie Kollegen heraus, dass es für gelingende Maker Education in Schulen eine veränderte Lehrerinnen- und Lehrerrolle als Lernbegleitung und flexible Bewertungskriterien braucht (Sheridan et al., 2014). Weitere Schwierigkeiten betreffen mitunter die Kosten für Material und Geräte, Wartungsaufwand und Integration in bestehende Curricula (Li et al., 2025). Die erfolgreiche Umsetzung von Maker Education hängt also auch, wie der hier aus Platzgründen lediglich cursorisch gehaltene Überblick von Forschungsarbeiten zu Maker Education in der Primarstufe zeigt, stark von schulischen Rahmenbedingungen ab. Allerdings verweisen die Studien auch auf die Potenziale von Maker Education, insbesondere für die zu Beginn des Artikels dargelegten Anliegen des Curriculums Primarstufe. An diese Potenziale knüpft das im Mittelpunkt dieses Artikels stehende Schulprojekt an – mit einer

spezifischen Fokussierung auf Techniken des 3D-Drucks bzw. der additiven Fertigung.

2.2 3D-Druck und additives Fertigen als spezifische Lernfelder im Rahmen von Maker Education

3D-Druck stellt als Verfahren der additiven Fertigung einen zentralen Bereich von Maker Education dar, da diese Technik Lernenden die Möglichkeit bietet, Konstruktion, Prototyping und iteratives Problemlösen praktisch zu erfahren (Ford & Minshall, 2019). So können Schülerinnen und Schüler im Rahmen von 3D-Druck ihre Ideen entwerfen, deren Umsetzung planen, modellieren und anschließend überprüfen, ob das gedruckte Objekt funktioniert. Studien zeigen, dass derlei makerorientierte Lernsettings Kreativität, räumliches Vorstellungsvermögen und Problemlösekompetenz deutlich fördern (Fokides & Lagopati, 2024). Zugleich unterstützt 3D-Druck die auch im Lehrplan Primarstufe geforderte Selbsttätigkeit von Kindern. Schülerinnen und Schüler können im Rahmen ihrer Auseinandersetzungen mit 3D-Druck lernen, dass digitale Artefakte nicht nur virtuelle Objekte sind, sondern über digitale Technologien auch als physische Gegenstände materialisiert werden können. Dadurch wird, ebenfalls dem Anliegen des Curriculums der Primarstufe folgend, Digitale Grundbildung nicht auf Gerätebedienung reduziert, sondern mit produktiver, konkreter Gestaltung verbunden. Schließlich ermöglicht der Herstellungsprozess eines 3D-Objekts, vom Entwurf über die Übersetzung in Maschinenbefehle bis zum Druck, das Nachvollziehen algorithmischer Abläufe – ohne abstrakte Programmierkonzepte

vorauszusetzen (Blikstein, 2013). Wie erwähnt fordert der Lehrplan Primarstufe ausdrücklich fächerübergreifendes Lernen in Relation zu digitalen Technologien – und genau hier liegt, wie wir argumentieren, ein besonderes Potenzial additiver Fertigung. Denn physische Modelle ermöglichen die Visualisierung abstrakter Inhalte, etwa geometrischer Strukturen oder naturwissenschaftlicher Prozesse. Experimentelle Studien zeigen diesbezüglich, dass Schülerinnen und Schüler wissenschaftliche Konzepte signifikant besser verstehen, wenn sie durch 3D-gedruckte Modelle veranschaulicht werden (Hsiao et al., 2019). Gleichzeitig entstehen durch diesen Ansatz organisatorische und didaktische Anforderungen an Lehrpersonen, wie das Kreieren offener Aufgabenstellungen, eine individuelle Betreuung und das Erzeugen iterativer Lernprozesse. Den Anliegen von Maker Education entsprechend sollten Lehrkräfte diese Lernprozesse moderieren und Exploration unterstützen, statt sich bloß in der Rolle als Wissensvermittlerinnen und -vermittler zu sehen (Sheridan et al., 2014). Dieses Verständnis kann, wie wir im weiteren Verlauf des Artikels herausarbeiten, sehr gut von Peer-Learning-Aktivitäten unterstützt werden.

Auf Basis der zuvor erfolgten Ausführungen ist der vorliegende Artikel von der Forschungsfrage getragen, wie eine gelingende Maker Education mit einem Fokus auf 3D-Druck in der Primarstufe gestaltet werden kann und die erwähnten curricularen Anforderungen umgesetzt werden können. Zudem erläutern wir, wie

qua Peer-Learning eine innovative, schülerinnen- und schülerzentrierte Maker Education gelingen kann.

3. Maker Education an der Praxisschule der Pädagogischen Hochschule Oberösterreich – vom persönlichen Interesse über das Maker Education Lab hin zur Skalierung über Peer-Learning

Die in den vorigen Kapiteln vorgestellten Potenziale von Maker Education, insbesondere dem 3D-Druck, wurden im Rahmen eines mehrjährigen Schulentwicklungsprojekts an der Europaschule, der Praxisschule der *Pädagogischen Hochschule Oberösterreich*, aufgegriffen und umgesetzt. Diesen Prozess, aus dem schließlich das *Maker Education Lab* als auch eine breite Einbettung von Maker Education in den Unterricht der Volksschule hervorging, möchten wir im Folgenden etwas detaillierter beschreiben. Dazu gehen wir zunächst auf die Entstehungshintergründe für das Etablieren von Maker Education an der Praxisschule der *PH Oberösterreich* ein – insbesondere auf die Etablierung des *Maker Education Labs*, das zunehmend zum Gravitationszentrum digitaler Schulentwicklung wurde. Anschließend beschreiben wir zwei aufeinander aufbauende, zentrale Entwicklungsschritte bei der Implementierung von Maker Education an der Schule: *die Unverbindliche Übung „3D-Druck in der Primarstufe“* sowie die darauf basierende *Peer-Learning-Initiative*. Diese Ausführungen erfolgen stets in Referenz auf die dargelegten curricularen Vorgaben des Curriculums der Primarstufe.

3.1 Anfänge der Maker-Education an der Praxisschule

Die Auseinandersetzung mit Maker Education an der Europaschule entstand aus einer Verschränkung institutioneller und persönlicher Dynamiken. Einerseits beschäftigten wir uns bereits seit mehreren Jahren mit innovativen Lernumgebungen und stießen dabei auf Konzepte kreativer Werkstätten, Makerspaces und Labs – die uns besonders interessierten, da sie auf handlungsorientiertes, projektbasiertes und exploratives Lernen ausgerichtet sind. Die damit verbundene pädagogische Leitidee, Lernende durch gestaltendes Tun zu selbsttätigen Wissensproduzentinnen und -produzenten zu machen, korrespondierte mit dem Profil der Schule und unserem eigenen pädagogischen Selbstverständnis. Andererseits wuchs parallel dazu auf persönlicher Ebene das Interesse an additiven Fertigungstechnologien: Erste Erfahrungen und Fortbildungen mit 3D-Druckern verdeutlichten das Potenzial, digitale Konstruktion, iteratives Problemlösen und haptisch erfahrbare Produkte didaktisch zu verbinden. Aus dieser doppelten Motivation entstand die Entscheidung, makerorientierte Lernansätze und 3D-Druck systematisch zu verknüpfen und in den schulischen Kontext zu überführen.

Als Modell- und Forschungsschule bietet die Praxisschule der *Pädagogischen Hochschule Oberösterreich* einen Rahmen, in dem neue pädagogische Ansätze erprobt und wissenschaftlich begleitet werden können. Vor diesem Hintergrund setzten wir bewusst im Schuljahr 2023/24 einen damals noch wenig verbreiteten Schwerpunkt im Bereich der Digitalisierung – nicht nur als punktuelle

Techniknutzung, sondern als Ausgangspunkt für eine gestaltende, kooperative Lernkultur. Die konkrete Implementierung begann klein und teilweise etwas ungeplant: Ausgangspunkt war ein einzelner 3D-Drucker, dessen Einsatz zunächst explorativen Charakter hatte. Die hohe Motivation der Schülerinnen und Schüler, die Qualität der entstehenden Artefakte und der sichtbare Kompetenzzuwachs von Schülerinnen und Schülern führten jedoch rasch zu einer breiteren Wahrnehmung innerhalb der Schulgemeinschaft.

3.2 Von der Initiative zur nachhaltigen Verankerung: Das Maker Education Lab als Epizentrum digitalisierungsbezogener Schulentwicklung

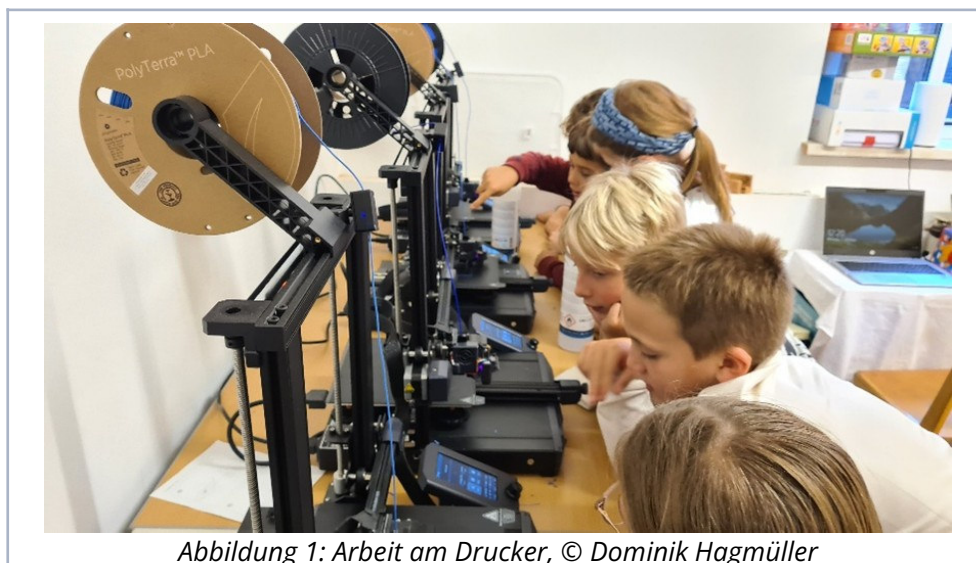


Abbildung 1: Arbeit am Drucker, © Dominik Hagmüller

Aus dem anfangs kleinen, explorativen Setting formte sich ein zunehmend gut ausgestattetes *Maker Education Lab*, das heute als zentraler Lernort für digitale Gestaltungskompetenz an der Euro-

paschule fungiert. Mit dem in der Schulöffentlichkeit zunehmend wahrnehmbaren Erfolg des Projekts wurde die Initiative in den Digitalisierungsplan der Europaschule aufgenommen. Für die Implementierung des *Maker Education Labs* wurden zunächst curriculare Anknüpfungspunkte systematisch ausgearbeitet. Dabei wurden insbesondere Bezüge zu Sachunterricht, Mathematik und technischen bzw. gestalterischen Werken hergestellt sowie Verbindungen zur Querschnittsmaterie der Digitalen Grundbildung berücksichtigt. Auf diese Weise sollte sichergestellt werden, dass die Aktivitäten des Labs nicht als isoliertes Zusatzangebot, sondern als integraler Bestandteil schulischer Lern- und Entwicklungsprozesse verankert werden. Darüber hinaus wurden klare Rollen- und Verantwortungsstrukturen definiert und im Projektverlauf regelmäßig evaluiert, angepasst und erweitert.

Die derzeitige technische Ausstattung des *Maker Education Labs* spiegelt den gewachsenen Charakter des Projekts wider und entspricht nicht dem Ausgangsniveau, mit dem die Initiative begann. Während der Beginn auf einen einzelnen 3D-Drucker beschränkt war, verfügt das Labor heute über eine breite und professionelle Infrastruktur, die unterschiedliche Bereiche der digitalen Gestaltung abdeckt.

Im Bereich der additiven Fertigung stehen aktuell folgende 3D Drucker zur Verfügung: drei *Creality Ender-3 v2*, fünf *Bambu Lab A1 mini* sowie ein *Bambu Lab P1S Combo*. Die Geräte erfüllen dabei unterschiedliche Funktionen innerhalb des Lern- und Produktionsprozesses. Während die Creality-Modelle aufgrund ihrer weit-

gehend manuellen Kalibrierung besonders zur Vermittlung grundlegender mechanischer Abläufe und eines vertieften Prozessverständnisses eingesetzt werden, dienen die Bambu-Lab-Drucker mit ihren automatisierten Funktionen und höheren Druckgeschwindigkeiten vor allem der Umsetzung von Schülerinnen- und Schülerprojekten. Auf diese Weise können sowohl basale technische Kompetenzen als auch weiterführende Gestaltungs- und Entwicklungsprozesse unterstützt werden.

Für die digitale Konstruktion und Vorbereitung der Druckaufträge werden sowohl Laptops als auch iPads eingesetzt. Bei der Softwareauswahl wurde bewusst darauf geachtet, ausschließlich Programme zu nutzen, die für Schulen keine Lizenzkosten verursachen oder über kostenlose EDU-Versionen verfügen. Dies betrifft sowohl die Slicer-Software (*PrusaSlicer*, *Bambu Studio*) als auch die Konstruktionssoftware, darunter *Tinkercad*, *Shapr3D*, *Autodesk Fusion 360 EDU*, *SculptGL* und weitere frei zugängliche Anwendungen.

Für 3D-Scanning-Prozesse kommt die Kamera *Revopoint Inspire 2* (Standard Edition) zum Einsatz, die es den Schülerinnen und Schülern ermöglicht, reale Objekte präzise zu digitalisieren und in den Gestaltungsprozess zu integrieren. Ergänzend zur digitalen Ausstattung umfasst das Labor eine Vielzahl an notwendigen Zusatzmaterialien und Werkzeugen:



Abbildung 2: Aufbau Mobil, © Dominik Hagmüller

3.3 Einführung der Unverbindlichen Übung „3D-Druck in der Primarstufe“

Aufbauend auf diesen materiellen Verankerungen sowie den damit verknüpften, beschriebenen Prozessen, wurde im Schuljahr 2023/2024 die Unverbindliche Übung „3D-Druck in der Primarstufe“ konzeptualisiert und durchgeführt. Die Übung wurde in den jahrgangsgemischten Klassen der dritten und vierten Schulstufe angeboten. Ziel war es hierbei, die bisher an der Volksschule bereits erfolgten Explorationen zum Praktizieren von Maker Education in der Primarstufe zu expandieren und systematisch mit den bereits dargestellten didaktischen und inhaltlichen Anliegen des Primarstufen-Curriculums zu verquicken. So sollte in der Übung handlungsorientiertes, fächerübergreifendes Lernen, Kooperation, iterative Entwicklung und Reflexion unter der inhaltlichen Überschrift des 3D-Drucks möglich werden. 3D-Druck sollte dabei nicht als Selbstzweck dienen, sondern gewissermaßen als vielsei-

tig didaktisierbares Medium, das digitale Gestaltung, Problemlösen und soziale Lernprozesse miteinander verbindet und damit die Zielsetzungen der Digitalen Grundbildung konkret umsetzt. Im Verlauf der einjährigen Lehrveranstaltung sollten Schülerinnen und Schüler systematisch in die praktische Nutzung additiver Fertigung eingeführt werden und dabei den vollständigen Produktionsprozess digitaler Konstruktion und physischer Herstellung mehrfach durchlaufen. Im Mittelpunkt stand dabei die kontinuierliche Arbeit mit einem FDM-3D-Drucker, wobei technische Grundlagen, Materialkunde, digitale Modellierung sowie iterative Produktentwicklung miteinander verschränkt wurden.

Zum Auftakt der unterrichtlichen Umsetzung erfolgte eine Einführung in die Funktionsweise des 3D-Druckers. So lernten die Schülerinnen und Schüler den mechanischen Aufbau des Druckers. Neben der technischen Funktionsweise wurden auch praktische Rahmenbedingungen vermittelt, etwa ein geeigneter Standort ohne Luftzug, ein stabiler Untergrund sowie Sicherheitsaspekte aufgrund der hohen Temperaturen von Düse und Druckplatte.

Im Anschluss lernten die Schülerinnen und Schüler den grundlegenden Produktionsablauf kennen. Ausgangspunkt hierfür war stets ein digitales 3D-Modell. Dieses konnte selbst konstruiert oder aus einer Online-Bibliothek bezogen werden. Das digitale Modell wurde anschließend in eine Slicer-Software übertragen und dort weiterverarbeitet. Zu Beginn nutzten die Schülerinnen und Schüler den *PrusaSlicer*, eine frei verfügbare und plattformübergreifende Open-Source-Anwendung. Die Software erwies

sich als didaktisch günstig, da sie für unterschiedliche 3D-Druckermodelle geeignet ist und über gestufte Modus-Einstellungen („Simple“, „Advanced“, „Expert“) verfügt. Dadurch konnten wir den Funktionsumfang schrittweise erweitern und den Lernprozess an den Kompetenzzuwachs der Kinder anpassen.

Die darauffolgenden Einheiten waren stets von der praktischen Tätigkeit geprägt, ein einfach zu kalibrierendes Objekt zu slicen. Dieser Schritt diente nicht der Gestaltung, sondern der technischen Einweisung. Die Schülerinnen und Schüler lernten derart, das Druckbett zu nivellieren, den richtigen Drucker auszuwählen, Filamentparameter festzulegen und die Slicer-Einstellungen anzupassen. Bereits in dieser Phase erwies sich die Wahl des geeigneten 3D-Druckers als didaktisch bedeutsam. Viele aktuelle Modelle verfügen über weitreichende Automatisierungsfunktionen, etwa automatische Nivellierungssysteme, die zentrale Vorbereitungsschritte selbstständig übernehmen. Dadurch entfällt für die Lernenden allerdings ein wichtiger Teil des technischen Verständnisses, da grundlegende Justierungs- und Kalibrierungsprozesse nicht mehr manuell durchgeführt werden müssen. Um den Schülerinnen und Schülern ein vertieftes Prozessverständnis zu ermöglichen und ihnen grundlegende mechanische Arbeitsschritte zugänglich zu machen, wurde daher zu Beginn bewusst ein *Creali-ty Ender 3 v2* eingesetzt. Außerdem wurden Informationen zum Druckprozess abgelesen, etwa geschätzte Druckdauer, Materialverbrauch in Gramm und Meter sowie Kosten des Drucks. Durch diesen ersten Druck wurde erkennbar, dass das physische Ergeb-

nis unmittelbar von digitalen Parametern abhängt. Parallel dazu erfolgte eine Einführung in die verwendeten Materialien. Verarbeitet wurden unterschiedliche Filamente, darunter *PLA*, *PETG*, *ABS* sowie flexible Kunststoffe wie *TPU*.

Nachdem derlei grundlegende Druckvorgänge von den Schülerinnen und Schülern beherrscht wurden, begann die Arbeit mit der Konstruktionssoftware (*Tinkercad* und *Autodesk*). Zunächst wurden einfache Formen erzeugt, indem elementare Volumenkörper wie Quader, Zylinder oder Kugeln kombiniert wurden. Die Kinder veränderten Größe, Position und Ausrichtung, schnitten Volumen heraus oder verbanden mehrere Körper. Später wurden komplexere Programme eingesetzt (wie *Shapr3D* und *Autodesk Fusion 360*, die präzisere Konstruktionen ermöglichten. Hierzu gehörten parametrische Skizzen, Extrusionen, Abrundungen und symmetrische Muster. Die Kinder entwickelten dadurch ein Verständnis dafür, dass ein digitales Modell aus mathematisch beschriebenen Geometrien besteht und nicht aus frei gezeichneten Linien.

Ein weiterer Schritt bestand in der Digitalisierung realer Gegenstände. Mithilfe fotogrammetrischer Software (z. B. *Widar*) wurden Objekte aus einer Reihe von Fotografien rekonstruiert. Dabei berechnet das Programm räumliche Strukturen und erzeugt daraus ein dreidimensionales Modell, das anschließend gedruckt werden kann. Der Druck ist somit nicht nur auf selbst entworfene Objekte beschränkt, sondern umfasst auch die Reproduktion vorhandener Formen.

Als wesentlicher Schwerpunkt des Unterrichts wurde der Umgang mit Fehlversuchen gesetzt. Schließlich können Drucke sich leicht von der Druckplatte lösen, Schichten können verrutschen oder Bauteile instabil sein. Die Lernenden wurden dann dazu eingeladen, die Ursachen zu erkunden und auf Basis ihrer Thesen die Konstruktion anzupassen oder Slicer-Parameter wie Schichtdicke, Füllstruktur oder Temperatur zu modifizieren. Häufig entstanden so mehrere Versionen eines Objekts, bevor ein funktionsfähiger Prototyp erreicht wurde. Der Produktionsprozess wurde damit zu einer Abfolge von Entwurf, Test und Überarbeitung. Ein wichtiger Teil des Lernprozesses bestand darin, dass die Schülerinnen und Schüler typische technische Probleme des 3D-Drucks – etwa eine fehlerhafte Nivellierung, eine verstopfte Nozzle oder Störungen am Hotend – eigenständig identifizieren und beheben mussten. Um solche problemlösenden Lerngelegenheiten zu ermöglichen, wurde bewusst auf weniger automatisierte und kostengünstige Druckermodelle zurückgegriffen. Nur so konnten die Kinder zentrale mechanische Arbeitsschritte selbst ausführen. Darüber hinaus durften sie unter Aufsicht des Erstautors den Drucker bei Defekten teilweise zerlegen und Ersatzteile montieren, wodurch ein vertieftes Verständnis der Gerätefunktionalität entstand. Bei der Geräteauswahl sollte daher insbesondere die Verfügbarkeit günstiger Ersatzteile berücksichtigt werden.

Im Verlauf des Schuljahres wurde der Komplexitätsgrad der Konstruktionen sukzessive erhöht. In weiterer Folge wurden vollständige Produktentwicklungen durchgeführt. Die Schülerinnen und

Schüler entwarfen eigene Gegenstände, beispielsweise technische Lösungen für Bewässerungssysteme oder Aufbewahrungsbehälter, und fertigten funktionsfähige Prototypen an. Durch diese Themen konnte der 3D-Drucker fächerübergreifend im Unterricht eingesetzt werden und den Schülerinnen und Schülern Möglichkeiten für dessen Einsatz zum Schaffen nachhaltiger Lösungen verdeutlicht werden.

Während die beschriebenen Unterrichtssequenzen verdeutlichen, wie tiefgreifend sich 3D-Druck als Lernfeld auch im Altersbereich von Lernenden in der Primarstufe verankern lässt, zeigte sich im Schulalltag zugleich, dass technische Fertigkeiten und konstruktive Prozesse nur einen Teil des Potenzials ausmachen. Entscheidend wurde zunehmend die Frage, wie Schülerinnen und Schüler ihr erworbenes Wissen weitergeben, teilen und in sozialen Lernprozessen verankern. Aus dieser Entwicklung heraus entstand ein weiterer Bestandteil des Projekts – die Etablierung peerorientierter Lernformen, in denen Kinder nicht nur selbst gestalten, sondern auch zu Lehrenden werden.

3.4 Peer-Learning: Kinder bringen Kindern 3D-Druck bei

Ein zentraler Bestandteil des Projekts an der Europaschule war die systematische Implementierung von Peer-Learning-Formaten. Peer-Learning steht für eine Bildungsstrategie, bei der Lernende aktiv voneinander lernen, indem sie Verantwortung für ihre eigene Ausbildung übernehmen und durch gegenseitige Unterstützung, sowohl ihre Lernergebnisse als auch ihre sozialen Kompetenzen verbessern (Chunn & Cennamo, 2022). Peer-Learning wur-

de nicht ergänzend, sondern als wesentlicher Bestandteil der Umsetzung im Kontext der digitalen Grundbildung konzipiert. Den Ausgangspunkt hierfür bildete die im vorigen Kapitel beschriebene Unverbindliche Übung „3D-Druck in der Primarstufe“ – in deren Rahmen sich eine kleinere Gruppe von Schülerinnen und Schülern aus mehreren Klassen herauskristallisierte, die ein vertieftes Interesse an Maker Education aufwiesen:



Abbildung 3: Arbeit am Drucker, © Dominik Hagmüller

Diese wurden schließlich in weiteren Sessions als Makerexpertinnen und -experten ausgebildet. Dabei handelte es sich ausschließlich um Kinder der Volksschule, die trotz ihres jungen Alters eine hohe Lernbereitschaft und Verantwortungsübernahme zeigten. Besonders wichtig war uns, dass die Gruppe der Expertinnen und Experten geschlechtergerecht und möglichst vielfältig zusammengesetzt war.

Die Auswahl erfolgte daher nicht nur anhand fachlicher Kriterien, sondern auch mit dem bewussten Ziel, stereotypen Zuschreibungen im Technikbereich entgegenzuwirken.

Die ausgewählten Kinder durchliefen über das Schuljahr hinweg den gesamten Prozess digitaler Konstruktion, additiver Fertigung, Fehleranalyse und iterativer Verbesserung. Sie eigneten sich dadurch sowohl technisches als auch prozessbezogenes Wissen an, das über basale Medienkompetenzen hinausging. Darüber hinaus wurden die angehenden Expertinnen und Experten auch in grundlegende didaktische und pädagogische Prinzipien eingeführt. In Vorbereitungseinheiten wurde mit ihnen besprochen, wie sie Lernprozesse ihrer Mitschülerinnen und -schüler begleiten können, welche Kommunikationsformen unterstützend wirken und wie sie sicherstellen können, dass alle Kinder aktiv einbezogen werden. Ein besonderer Fokus lag dabei auf Aspekten der Inklusion: Die Expertinnen und Experten lernten, Unterricht so anzuleiten, dass unterschiedliche Lernvoraussetzungen, individuelle Zugänge und verschiedene Unterstützungsbedarfe berücksichtigt werden.

Gerade die Betonung eines inkludierenden, gemeinschaftlichen Lehrens erwies sich als zentraler Bestandteil des Programms. Die Schülerinnen und Schüler entwickelten dadurch nicht nur technische Expertise, sondern auch ein Bewusstsein dafür, dass Lernprozesse erfolgreich sind, wenn alle Kinder, möglichst ihren Fähigkeiten, Interessen oder Lernstilen entsprechend Zugang zu

den Inhalten haben und sich als aktiver Teil der Lerngemeinschaft erleben.

Um diese Aufgaben kompetent ausführen zu können, wurden die Kinder zudem mit der oben genannten Maker-Struktur und den Abläufen vertraut gemacht.

Im nächsten Schritt präsentierten die Expertinnen und Experten den 3D-Drucker in ihren eigenen Klassen und führten erste Druckvorgänge gemeinsam mit ihren Mitschülerinnen und -schülern durch:



Abbildung 4: Präsentation Klasse, © Dominik Hagmüller

Die Rolle der Lehrpersonen verschob sich dabei deutlich: Pädagoginnen und Pädagogen agierten primär als Lernbegleiterinnen und -begleiter, griffen nur punktuell unterstützend ein und überließen die Anleitung weitgehend den Expertinnen und Experten. Diese Phase diente dazu, dass die Kinder Sicherheit in ihrer neuen Rolle als Lehrende entwickelten, erste didaktische Entschei-

dungen trafen und Erfahrungen im gemeinsamen Problemlösen sammelten.

Die konkrete Einbettung in den Unterricht erfolgte dabei auf vielfältige Weise. Zu Beginn fand in fast allen Klassen ein Einführungsworkshop statt, dessen Aufbau weitgehend standardisiert war und die grundlegenden Funktionen des 3D-Druckers sowie erste einfache Konstruktionsschritte vermittelte. Anschließend wurde der 3D-Druck zunehmend in den regulären Unterricht integriert. Die Expertinnen und Experten passten ihre Einheiten jeweils an das aktuelle Thema der Klasse an und entwickelten kleinere unterrichtsbezogene Sequenzen, die als Teil einer oder mehrerer Unterrichtseinheiten durchgeführt wurden. Je nach Bedarf und Komplexität des Vorhabens übernahmen sie entweder kurze Impulse innerhalb einer Unterrichtsstunde oder gestalteten vollständige Unterrichtsstunden, in denen Konstruktions- und Druckprozesse vertieft erarbeitet wurden.

Auf diese Weise entstand eine flexible, kontextsensitive Unterrichtspraxis, in der der 3D-Druck nicht als Zusatzangebot, sondern als integraler Bestandteil fachlicher Lernprozesse genutzt wurde:

Bemerkenswert war, dass die Expertinnen und Experten nicht nur Mitschülerinnen und -schüler unterrichteten, sondern auch Lehrpersonen. Da im Digitalisierungskonzept der Europaschule vorgesehen ist, additive Fertigung im Unterricht systematisch zu verankern, mussten auch Pädagoginnen und Pädagogen die Funktionsweisen des 3D-Drucks erlernen. In mehreren Fällen wurden die

Expertinnen und Experten zu SCHILF-Fortbildungen eingeladen – wodurch sich das traditionelle Verhältnis zwischen Lehrenden und Lernenden sichtbar umkehrte: Kinder übernahmen die Rolle der Wissensvermittelnden, während Erwachsene zu Lernenden wurden.



Abbildung 5: Unterstützung in der Klasse, © Dominik Hagmüller

Dieses Peer-Learning-Modell führte schließlich zu einer deutlichen Stärkung der Selbstwirksamkeitserfahrungen der Schülerinnen und Schüler. Viele Kinder entwickelten ein ausgeprägtes Verantwortungsbewusstsein gegenüber ihren Lernenden und waren stolz darauf, ihr Wissen nicht nur im eigenen Klassenkontext, sondern auch in öffentlichen Settings zu präsentieren. Expertinnen und Experten repräsentierten die Schule auf externen Veranstaltungen – etwa bei der *Langen Nacht der Forschung* oder am *IKT-Forum* der *Johannes Kepler Universität Linz* – und erklärten dort so-

3D DRUCK-VERFAHREN

unterschiedliche Verfahren für Kunststoffe, Metalle und Keramiken

FFF / FDM

Fused Filament Fabrication

Fused Deposition Modeling

Diagram labels: Filament, Extruder, Hotend, Build Volume, Base

Source: <https://www.3dprinting.com/3d-printing-101>

Abbildung 6: Vortrag JKUe, © Dominik Hagmüller

Die beschriebenen Peer-Learning-Prozesse zeigen unserer Ansicht nach, dass Kinder nicht nur komplexe technische Inhalte erfolgreich vermitteln können, sondern dabei weitreichende Selbstwirksamkeits-, Kooperations- und Verantwortungserfahrungen sammeln. Zugleich verdeutlichen sie, wie stark sich Rollenbilder

verschieben, wenn Lernende als Expertinnen und Experten agieren und digitale Technologien zu gemeinsam geteilten Lerngegenständen werden. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welche Schlüsse aus den Erfahrungen des Projekts für die zukünftige Gestaltung Digitaler Grundbildung in der Schule gezogen werden können.

4. Konklusionen: 3D-Druck als Motor für digitale Schulentwicklung und ‚Scharnier‘ zwischen digitaler und analoger Welt

Das Projekt an der Europaschule zeigt exemplarisch, wie Maker Education mit Fokus auf 3D-Druck die im Curriculum der Primarstufe formulierten Ziele der Digitalen Grundbildung in konkrete Lernsettings übersetzen kann. Durch die systematische Einführung in additive Fertigung – von der digitalen Modellierung über das Slicen bis zur iterativen Fehleranalyse – wurden fachliche, prozessuale und metakognitive Kompetenzen aufgebaut. Entscheidend war dabei nicht die Technologie als Selbstzweck, sondern ihre Funktion als didaktisches Medium für problemlösendes, kooperatives und reflektiertes Lernen.

Besonders wirksam erwies sich unserer Meinung nach das in der vorigen Sektion des Artikels beschriebene Peer-Learning: Ausgebildete Schülerinnen- und Schüler-Expertinnen und -Experten planten und leiteten Unterrichtssequenzen, unterstützten Mitschülerinnen und -schüler beim Konstruieren und Drucken und traten – situativ und in Fortbildungsformaten (SCHILF) – als Leh-

rende gegenüber Pädagoginnen und Pädagogen auf. Diese Verantwortungsübernahme verschob traditionelle Rollenarrangements und förderte intrinsische Motivation über Klassengrenzen hinweg.

Aus den Erfahrungen möchten wir für Umsetzung von Digitaler Grundbildung an anderen Schulen drei zentrale Aspekte ableiten: 1. Design vor Device, 2. Rollenflexibilität und 3. Peer-Learning als Skalierung:

1. *Design vor Device*: Lernumgebungen, in denen Kinder vollständige Produktionszyklen mehrfach durchlaufen, fördern nachhaltige Kompetenzentwicklung stärker als reine Gerätebedienung.
2. *Rollenflexibilität*: Wenn Lehrpersonen bewusst in eine coachende Rolle wechseln und Expertise an Lernende zurückspiegeln, entstehen Lerngelegenheiten für soziale, kommunikative und organisationale Kompetenzen – auch aufseiten der Pädagoginnen und Pädagogen.
3. *Peer-Learning als Skalierungsstrategie*: In heterogenen Schulstrukturen erlaubt ein Expertinnen- und Expertenmodell die Ausweitung digitaler Gestaltungsangebote trotz begrenzter Personal- und Zeitressourcen. Es trägt Wissen klassen- und schulstufenübergreifend und stabilisiert eine Kultur des Teilens.

Gleichzeitig werden Grenzen sichtbar, die für einen Transfer des Konzepts in andere schulische Kontexte von Bedeutung sind. Hierzu zählen insbesondere die Abhängigkeit von einer verlässlichen technischen Infrastruktur sowie deren kontinuierlicher Wartung, der Bedarf an koordinierten Zeitfenstern für Produktion und Iteration, die Notwendigkeit kuratierter Aufgabenstellungen, welche fachliche Lernziele explizit mit konstruktionsbezogenen

Logiken verbinden, sowie die Etablierung institutioneller Strukturen zur Anerkennung der Expertise von Schülerinnen und Schülern. Darüber hinaus traten im Verlauf der Umsetzung auch Herausforderungen auf. So umfasste dies die zeitintensive Begleitung paralleler Konstruktions- und Druckprozesse, wiederkehrende technische Justierungen sowie einen erhöhten Abstimmungsbedarf, wenn mehrere Klassen das Maker-Education-Lab nutzten. Zudem erforderte die Arbeit in offenen, iterativen Lernsettings insbesondere zu Beginn eine enge pädagogische Unterstützung, um Frustrationen zu vermeiden und konstruktive Problemlösestrategien aufzubauen.

Für Schulen, die vergleichbare Vorhaben planen, lassen sich daraus mehrere konkret umsetzbare Handlungsschritte ableiten.

Erstens empfiehlt sich der Aufbau eines Stufenplans, der von grundlegenden Kompetenzen – etwa Kalibrierung, Sicherheitsaspekten und den Grundlagen der Arbeit mit Slicer-Software – schrittweise zu eigenständigen Produktentwicklungen mit dokumentierten Iterationsprozessen führt. In der Einstiegsphase sollten dabei bewusst einfache, nicht automatisierte Geräte eingesetzt werden, um ein vertieftes Prozessverständnis zu fördern.

Zweitens sollte ein Expertinnen- und Expertenprogramm institutionell verankert werden. Dieses umfasst die Auswahl, Qualifizierung, kontinuierliche Begleitung sowie die koordinierte Einsatzplanung von Schülerinnen und Schülern. Zugleich ist eine sichtbare Anerkennung dieser Rolle sowohl innerhalb der Schule als auch in schulischen Fortbildungsformaten (SCHILF) anzustreben.

Drittens ist eine curriculare Verankerung sicherzustellen, indem fächerübergreifende Aufgabenformate mit klar definierten Kompetenzrastern entwickelt werden, die fachliche, digitale und soziale Kompetenzen gleichermaßen berücksichtigen. Die Bewertungskriterien sollten sich dabei nicht primär am Endprodukt orientieren, sondern an der Qualität des Arbeitsprozesses, an Problemlösefähigkeit sowie an kooperativen Arbeitsformen. Viertens sind Aspekte von Ökologie und Verantwortung systematisch zu integrieren. Die Auswahl geeigneter Materialien (etwa *PLA*, *PETG*, *TPU* oder *ABS*), ein reflektiertes Kosten- und Ressourcenbewusstsein sowie eine nachhaltige Nutzung sollten als bewertete Entscheidungsschritte in den Arbeitsprozess eingebunden werden.

Das Projekt legt nahe, dass der 3D-Druck als eine Art ‚Scharnier‘ zwischen digitaler und analoger Welt fungieren kann – und dies nicht ausschließlich im Technik- oder Sachunterricht, sondern als potenziell kulturprägende Praxis für die Schule als Institution insgesamt.

Literatur

Atzesberger, S., Steiner, M., Fischer, O., Himpsl-Gutermann, K., Sankofa, M., & Szucsich, P. (2020). *Digitale Grundbildung als Herausforderung für Schulentwicklung*. *Journal für Schulentwicklung*, 24(04/2020), 33–38.

Barberi, A., Swertz, C., Himpsl-Gutermann, K., & Grünberger, N. (2020). Editorial: Making und Makerlabs. *Medienimpulse*, 58(4). <https://doi.org/10.21243/mi-04-20-27>

Bers, M. U. (2018). *Coding as a playground: Programming and computational thinking in the early childhood classroom*. Routledge.

Blikstein, P. (2013). Digital fabrication and 'making' in education: The democratization of invention. *FabLabs: Of machines, makers and inventors*, 4(1), 1–21.

Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung (2022). *Verordnung der Bundesministerin für Bildung, Wissenschaft und Forschung, mit der der Lehrplan der Mittelschule und der allgemeinbildenden höheren Schule geändert wird (Digitale Grundbildung) (BGBl. II Nr. 267/2022)*. <https://www.ris.bka.gv.at/eli/bgbl/II/2022/267>

Chun, J., & Cennamo, K. (2022). A theoretical model of peer learning incorporating scaffolding strategies. *International Journal of Teaching and Learning in Higher Education*, 33(3), 385–397.

Ford, S., & Minshall, T. (2019). Invited review article: Where and how 3D printing is used in teaching and education. *Additive Manufacturing*, 25, 131–150. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.028>

Halliburton, P., Georgiou, H., & Nielsen, W. (2024). Makerspaces: Building confidence in STEM for primary preservice teachers. *Research in Science Education*, 54, 573–594. <https://doi.org/10.1007/s11165-022-10087-1>

Himpsl-Gutermann, K., Ruge, W. B., Adorjan, C., Krisper-Ullyett, L., Macher, S., Lehner, E., Morgenbesser, H., Pollek, C., Mühlbacher, D., Stemmer, B., Stemmer, H., & Barberi, A. (2020). Medienbildung, Making und Schulentwicklung: Erfahrungen zur Implementierung von Maker Labs an Schulen. *Medienimpulse*, 58(4). <https://doi.org/10.21243/mi-04-20-26>

Hsiao, H.-S., Chen, J.-C., Lin, C.-Y., Zhuo, P.-W., & Lin, K.-Y. (2019). Using 3D printing technology with experiential learning strategies

to improve students' comprehension of abstract scientific concepts. *Journal of Computer Assisted Learning*, 35(2), 178–187. <https://doi.org/10.1111/jcal.12319>

Hörmann, C., Kuka, L., Schmidthaler, E., & Sabitzer, B. (2024). *Digital education training for teachers—Learnings from Austria*. *Frontiers in Education*, 9, Article 1490123. <https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1490123>

Hörmann, C., Schmidthaler, E., & Sabitzer, B. (2023). *Introducing Digital Education as a Mandatory Subject: The Struggle of the Implementation of a New Curriculum in Austria*. In Proceedings of the 15th International Conference on Computer Supported Education. <https://www.scitepress.org/Papers/2023/118370/118370.pdf>

Krebs, A.-K. (2026). "It looks like my die has a favorite number"—Maker education for 21st century skills in primary science education. *Frontiers in Education*, 10, Article 1732650. <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1732650>

Li, J., Goei, S. L., van Joolingen, W. R., & Raijmakers, M. (2025). Shaping maker education through design thinking: A lesson study perspective. *Thinking Skills and Creativity*, 59, 101957. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2025.101957>

Li, S.-J., Zhong, H.-M., Wang, Q., & Fan, C. (2024). Transforming maker mindsets: A qualitative study in primary education. *Thinking Skills and Creativity*, 44, 101590. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2024.101590>

Martin, L. (2015). The promise of the maker movement for education. *Journal of Pre-College Engineering Education Research*, 5(1), 30–39. <https://doi.org/10.7771/2157-9288.1099>

Schön, S., & Ebner, M. (2017). Von Makerspaces und FabLabs – Das kreative digitale Selbermachen und Gestalten mit 3D-Druck & Co. In P. Arnold, L. Killian, A. Thillosen & G. Zimmer (Hrsg.), *Hand-*

buch E-Learning: Lehren und Lernen mit digitalen Medien. Bertelsmann

Sheridan, K., Halverson, E., Litts, B., Brahms, L., Jacobs-Priebe, L., & Owens, T. (2014). Learning in the Making: A Comparative Case Study of Three Makerspaces. *Harvard Educational Review*, 84(4), 505–531. <https://doi.org/10.17763/haer.84.4.brr34733723j648u>

Ugaldi, F., Dulnuan, A., Canuto, P. P., Hiteg, D., & Hiteg, N. (2025). Impact of 3D-printed models on elementary students' space science learning: Mixed methods action research study. *STEM Education*, 5(6), 1102–1131. <https://doi.org/10.3934/steme.2025047>