

**Entwicklung und Prototyping von Open-Source-Maschinen für die digitale Fertigung**

# Case Study OLSK Small Laser

*G. Di Martino, J. C. Mariscal-Melgar, L. Lange, M. Omer, T. Redlich, J. P. Wulfsberg, D. Ingrassia*

**ZUSAMMENFASSUNG** Die Bedeutung von Open-Source-Methoden wird durch die zunehmende Dezentralisierung der digitalen Fertigung verstärkt. In diesem Beitrag wird der „OLSK Small Laser V2“ mit Schwerpunkt auf Zugänglichkeit und Kosteneffizienz untersucht. Reproduzierbarkeit ist der Schlüssel, wobei eine detaillierte Dokumentation und ein Design, das Anpassungen und Reparaturen erlaubt, die Nachhaltigkeit fördern. Der Beitrag gibt einen Überblick über die Funktionen und die Designphilosophie des OLSK Small Laser V2.

**STICHWÖRTER**

Lasertechnik, Digitalisierung, Fertigungstechnik

**OLSK Small Laser case study – Designing and prototyping open-source digital fabrication machines**

**ABSTRACT** Decentralized manufacturing and digital fabrication tools drive open-source methods' importance, as shown by the OLSK Small Laser. This paper explores OLSK Small Laser's second version development, emphasizing accessibility and cost-effectiveness. Replicability is key, with detailed documentation and design allowing customization and repairs, promoting sustainability. The article provides an overview of OLSK Small Laser V2's features and design philosophy.

## 1 Open Source Hardware und Open Source Werkzeugmaschinen

Angesichts der aktuellen Veränderungen in Gesellschaft, Umwelt und Wirtschaft erweist sich Open-Source-Hardware als potenzielle Lösungsstrategie für die neuen Herausforderungen und gewinnt zunehmend an Aufmerksamkeit in Politik, Forschung und Industrie. Seit dem Auslaufen der ersten Patente für 3D-Drucker Anfang der 2000er Jahre hat die Entwicklung, Modifikation und der Nachbau von 3D-Druckern stark zugenommen. Dieser Trend hat nicht nur die Entwicklung des 3D-Drucks vorangetrieben, sondern auch den Weg für die Entwicklung und den Nachbau verschiedener anderer digitaler Fertigungsmaschinen geebnet, darunter Lasercutter, Plotter und elektronische Geräte im weiteren Sinne [1].

Open-Source-Hardware (OSH) sind physische Güter, deren Design öffentlich zugänglich ist, um sie zu studieren, zu verändern, zu verbreiten, zu vervielfältigen und zu vertreiben [2, 3]. Der Ausgangspunkt von OSH ist komplexer als der von Open Source Software [4–6]. Im Idealfall ermöglicht OSH die gemeinsame Entwicklung und Replikation von Designs. Open Source Machine Tools (OSMT) [7] sind eine Untergruppe von OSH, die digitale Fertigungsmaschinen enthält. Diese digitalen Fertigungsmaschinen können so entwickelt werden, dass sie Maschinen darstellen, welche wiederum andere Maschinen herstellen [8]. OSMTs können auch neue Wege der Fertigung in Fablabs, Open-labs und Fab Cities [9–11] unterstützen und eröffnen sowohl Nutzern als auch Herstellern neue Perspektiven.

Kommerzielle Maschinen zeichnen sich durch geschlossene Systeme aus, bei denen die Hersteller eine strenge Kontrolle über die Hard- und Software haben. Diese Exklusivität bedeutet, dass Nutzer und Hersteller nur begrenzte Möglichkeiten haben, ihre Maschinen zu modifizieren, zu reparieren oder anzupassen.

Open-Source-Projekte bieten eine einzigartige Möglichkeit, den Zugang zu Technologie zu demokratisieren [7]. Nutzer haben die Möglichkeit, auf ihre Arbeit zuzugreifen, sie zu verändern und zu verbreiten, ohne durch proprietäre Lizzenzen eingeschränkt zu sein.

Im Folgenden wird die Entwicklung eines Lasercutters vorgestellt, einer Open-Source-Maschine auf dem neuesten Stand der Technik, die als Musterlösung für den Bedarf an zugänglichen, replizierbaren und reparierbaren Lasercuttern dient. Darüber hinaus werden die Eigenschaften der Maschine und ihr Design im Hinblick auf Replizierbarkeit beleuchtet.

## 2 Das Open Lab Starter Kit (OLSK)

Das Konzept des Open Lab Starter Kit (OLSK) wurde im Zusammenhang mit Open-Source-Hardware als Befähigungselement entwickelt. Das OLSK wurde mit dem Ziel entwickelt, die Einrichtung von FabLabs zu erleichtern, indem die mit digitalen Fertigungsmaschinen verbundenen Kosten gesenkt und ihre globale Zugänglichkeit und Replizierbarkeit verbessert werden. Das OLSK besteht aus acht computergesteuerten Maschinen. Diese Maschinen decken ein Spektrum von Technologien ab, das von Lasercuttern und CNC-Fräsen bis hin zu 3D-Druckern, Vinylschneidern und 3D-Scannern reicht [1, 12]. Bild 1 gibt einen Überblick über die im OLSK eingesetzten Maschinen.

Das Projekt ist Teil der Fab City Hamburg, die wiederum Teil der Fab City Initiative ist. Fab City ist eine globale Initiative, die ein Netzwerk von Städten und Regionen umfasst, die sich zum Ziel gesetzt haben, bis 2054 eine Kreislaufwirtschaft zu realisieren. Das übergeordnete Ziel von Fab City ist es, die lokale Produktion zu fördern und gleichzeitig den globalen Austausch zu stärken [12, 13].



**Bild 1.** The Open Lab Starter Kit – von oben links nach unten rechts: Kleiner Laser, großer Laser, große CNC, Vinyl-Cutter, kleiner 3D-Drucker, großer 3D-Drucker, kleine CNC, 3D-Scanner. Foto: InMachines Ingrassia GmbH



**Bild 2.** OLSK Small Laser V2. Foto: InMachines Ingrassia GmbH

In Anbetracht der zentralen Rolle einer umfassenden Dokumentation für die Zugänglichkeit und Replizierbarkeit von OSH [14] hat das OLSK großen Wert auf die Sammlung aller relevanten Informationen und Daten – einschließlich CAD-Zeichnungen, Schaltpläne, Montageanleitungen, PCB-Entwürfe usw. – in sorgfältig organisierten Repositories gelegt [15].

Darüber hinaus wird derzeit an der Entwicklung einer Wiki-Seite gearbeitet. Auf dieser Seite soll der Entwicklungsprozess der Maschinen detailliert beschrieben werden. Sobald diese Seite veröffentlicht ist, wird sie den Nutzern einen Einblick in die Gründe für die Entscheidungen beim Maschinendesign geben und sie in die Lage versetzen, die Maschinen an ihre spezifischen Anforderungen anzupassen.

### 3 OLSK Small Laser V2

Der OLSK Small Laser V2 stellt durch sein kompaktes Design und seine erweiterten Funktionen eine Weiterentwicklung der Desktop-Laserschneidtechnologie dar. **Bild 2** zeigt den OLSK Small Laser V2. Diese Version, die auf den Grundlagen seines Vorgängers aufbaut, verfügt über eine 40 W CO<sub>2</sub>-Laserquelle, mit der Materialien wie 10 mm Acryl, 6 mm MDF und 8 mm Sperrholz mit einer Schneidfläche von 600 x 400 mm geschnitten werden können. Sie erreicht eine Auflösung von 0,05 mm und eine maximale Geschwindigkeit von 1000 mm/s, die durch ein lineares Schienen- und Wellensystem ermöglicht wird. Die Konstruktion aus ineinandergrifffenden Aluminiumplatten für Rahmen und Gehäuse sowie einem Aluminium-Lamellenbett ist so ausgelegt, dass sie den Anforderungen kleinerer Produktionsumgebungen gerecht wird und gleichzeitig eine robuste Funktionalität bietet.

Der OLSK Small Laser V2 zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- **Verwendung von standardisierten und austauschbaren Komponenten**

Dieser Desktop Lasercutter besteht aus Komponenten, die auf dem Markt erhältlich und austauschbar sind. Ein solcher Ansatz rationalisiert die Herstellungsprozesse, senkt die Kosten und sorgt für einen umfassenden Zugang zu wichtigen Bauteilen, wodurch Skalierbarkeit und Kosteneffizienz gefördert werden.

- **Einfache Herstellung mit Standardmaschinen**

Der Lasercutter kann mit einer Standard-Fab-Lab-Maschine oder industriell mit üblichen Metallbearbeitungsmaschinen, zum Beispiel einem Faserlaserschneider, hergestellt werden. Außerdem kann das Gehäuse je nach lokaler Verfügbarkeit aus verschiedenen Metallen (zum Beispiel Aluminium oder Stahl) hergestellt werden.

- **Integration von Open Source Firmware**

Der Lasercutter arbeitet mit einer Open-Source-Firmware-

Architektur, die Transparenz und Zugänglichkeit in seinem Funktionsrahmen gewährleistet.

Diese Modularität ermöglicht die Überprüfung, Änderung und gemeinsame Entwicklung des Codes und fördert so ein Umfeld, das die kontinuierliche Verbesserung und Anpassung begünstigt.

#### • Nutzung von Open Source Software Paketen

Der Einsatz von Open-Source-Softwaretools wie Visicut und Universal G-Code Sender (UGS) für die G-Code-Generierung und die Maschinensteuerung unterstreicht das Streben nach Transparenz und Zugänglichkeit.

Diese Tools bieten eine robuste Plattform für die präzise Befehlsgenerierung und die nahtlose Steuerung des Lasercutters, wodurch sowohl die Benutzerfreundlichkeit als auch die Arbeitsgenauigkeit verbessert werden.

### 3.1 Leistungsfähigkeit des OLSK Small Laser V2

Wie bereits erwähnt kann der OLSK Small Laser in Bezug auf die Leistungsfähigkeit mit gängigen konventionellen Lasercuttern mithalten. Die Schnittfugenmessung spielt eine entscheidende Rolle bei der Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Lasercuttern. Bei open source Lasercuttern wird mit der Schnittfugenmessung die Genauigkeit des Laserschnitts festgestellt, was bei Projekten mit engen Toleranzvorgaben von entscheidender Bedeutung ist.

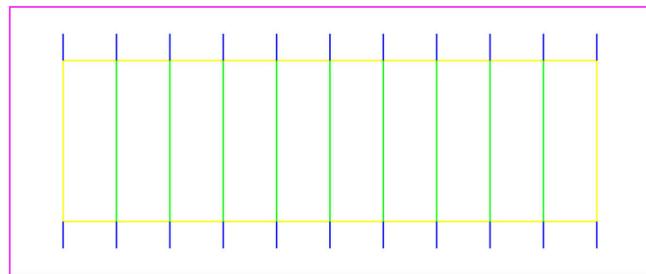
Die Leistungsfähigkeit des OLSK Small Laser V2 wird durch die Schnittfugenmessung bewertet, welche die Genauigkeit des Laserschnitts bestimmt. Dies ist besonders wichtig für Projekte mit engen Toleranzvorgaben. Die Schnittfuge, der durch den Laserstrahl verbrannte oder verdampfte Materialanteil, wird mittels eines Kerf-Tests beurteilt, bei dem ein Muster aus Rechtecken geschnitten und vermessen wird. Die Schnittfugenwerte liegen üblicherweise im Zehntelmillimeterbereich und hängen von Materialart, -dicke und den Schneidparametern ab [16].

Bei der Durchführung des Kerf-Tests mit dem OLSK Small Laser V2 wurden verschiedene Schnittgeschwindigkeiten getestet, um die Konsistenz der Ergebnisse zu überprüfen. Die Schnitte wurden mit maximaler Leistung (100 %) und unterschiedlichen Geschwindigkeiten (1,8 % und 0,5 %) durchgeführt. Die Ergebnisse, zeigen eine konsistente Schnittfuge von 0,10 mm bei beiden getesteten Geschwindigkeiten, was den Standardwerten aus der Literatur entspricht. Es zeigt sich, dass die Schnittfugenwerte bei Variation der Höchstgeschwindigkeit konsistent sind. Außerdem entsprechen die Schnittspaltwerte den Standardwerten aus der Literatur. **Bild 3** zeigt das Muster für den Kerf Test und **Bild 4** zeigt die Messung der Variablen.

### 3.2 Gestaltungsmethodik

Das Design des OLSK Small Laser V2 basierte zunächst auf dem Fabulaser Mini als konzeptionelle Grundlage. Dieses erste Modell diente als Grundlage für den ersten Prototypen, den OLSK Small Laser, der als Sprungbrett für die Verfeinerung des Designs diente, was schließlich zum OLSK Small Laser V2 führte.

Das Projekt durchlief eine iterative Designphase mit Schwerpunkt auf Rapid Prototyping. Das Feedback, das während der kontinuierlichen Entwicklung und bei jeder Iteration des Geräts gesammelt wurde, floss in die weiteren Optimierungen ein, wobei der Schwerpunkt auf der Erfüllung der Anforderungen und der Gewährleistung der Benutzerfreundlichkeit lag. Ein wichtiges



**Bild 3.** Muster für den Kerf Test. *Grafik: InMachines Ingrassia GmbH*

Prinzip dieses Designprozesses ist die Replizierbarkeit (Design for Replicability), mit der sichergestellt werden soll, dass jeder Aspekt des Geräts zur Förderung des Open-Source-Gedankens und zur Unterstützung der Arbeit der OSH-Gemeinschaft leicht reproduzierbar ist. Diese Designmethodik ist in **Bild 5** dargestellt.

### 3.3 Replizierbarkeit

Um die Replizierbarkeit des OLSK Small Laser V2 zu verbessern, wurde besonderes Augenmerk auf spezifische Konstruktionsprinzipien gelegt, um nicht nur den Montageprozess, sondern auch die Beschaffung der notwendigen Materialien und die Herstellung der Bauteile so weit wie möglich zu vereinfachen. Darüber hinaus haben *Liane Sayuri Honda* und *Marc Kohlen* vom Team der InMachines Ingrassia GmbH die Dokumentation mit großer Sorgfalt erstellt.

#### 3.3.1 Design

Die OLSK-Maschinen werden in öffentlich zugänglichen Versionskontrollsystmen entworfen [17], um einfachen Zugang, gemeinsame Entwicklung, Zusammenarbeit und Verzweigung von Entwürfen zu ermöglichen. Das Design der OLSK Small Laser V1 und V2 [18] basiert auf einer Kombination aus (1) parametrischem Design, (2) verfügbaren Bauteilen von Herstellern, die als STEP-Dateien importiert werden, und (3) bestehenden eigenen Designs von Bauteilen. Bei der Konstruktion der Teile wird auf die Replizierbarkeit geachtet. Tatsächlich können die Bauteile der Maschinen mit anderen OLSK-Maschinen hergestellt werden [14].

Da es sich bei der Entwicklung der Maschinen um einen Rapid-Prototyping-Prozess handelt, werden viele Teile durch „trial and error“ entwickelt, wobei auch technische Konstruktionsrichtlinien, Anforderungen und Randbedingungen für verschiedene Anwendungen berücksichtigt werden.

#### 3.3.2 Dokumentation

Die Dokumentation von OSH ist ein grundlegender Faktor, der die Replizierbarkeit von Open-Source-Maschinen stark beeinflusst [19, 20] <https://www.zotero.org/google-docs/?BXdC5a>.

Nach Antoniou et al. [14] beeinflussen vier wesentliche Faktoren die Replizierbarkeit eines Projektes:

- Qualität der Dokumentation: Die Qualität der Dokumentation steigt mit der Standardisierung der Dokumentation (zum Beispiel nach DIN SPEC), ihrer Genauigkeit, Stringenz und Vollständigkeit sowie ihrer Dynamik, die die Zusammenarbeit und Synchronisierung erleichtern.

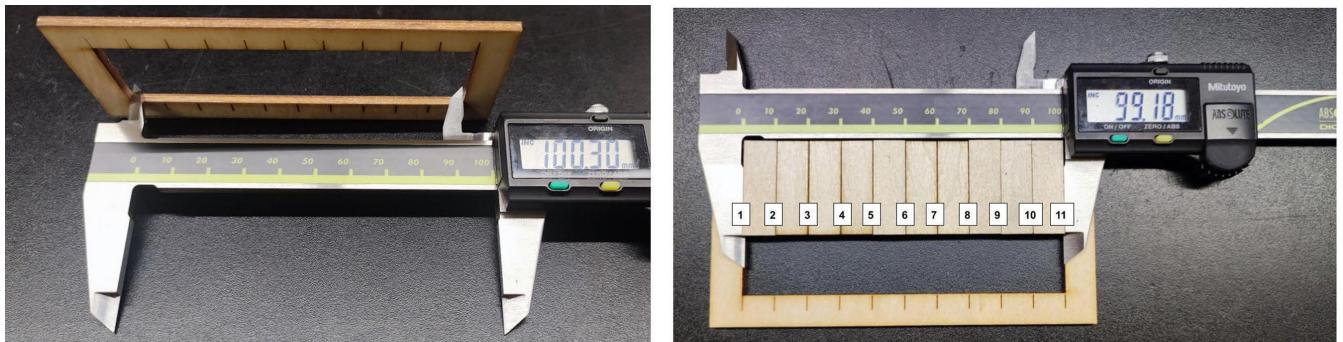


Bild 4. Messung der Variablen. Foto: InMachines Ingrassia GmbH

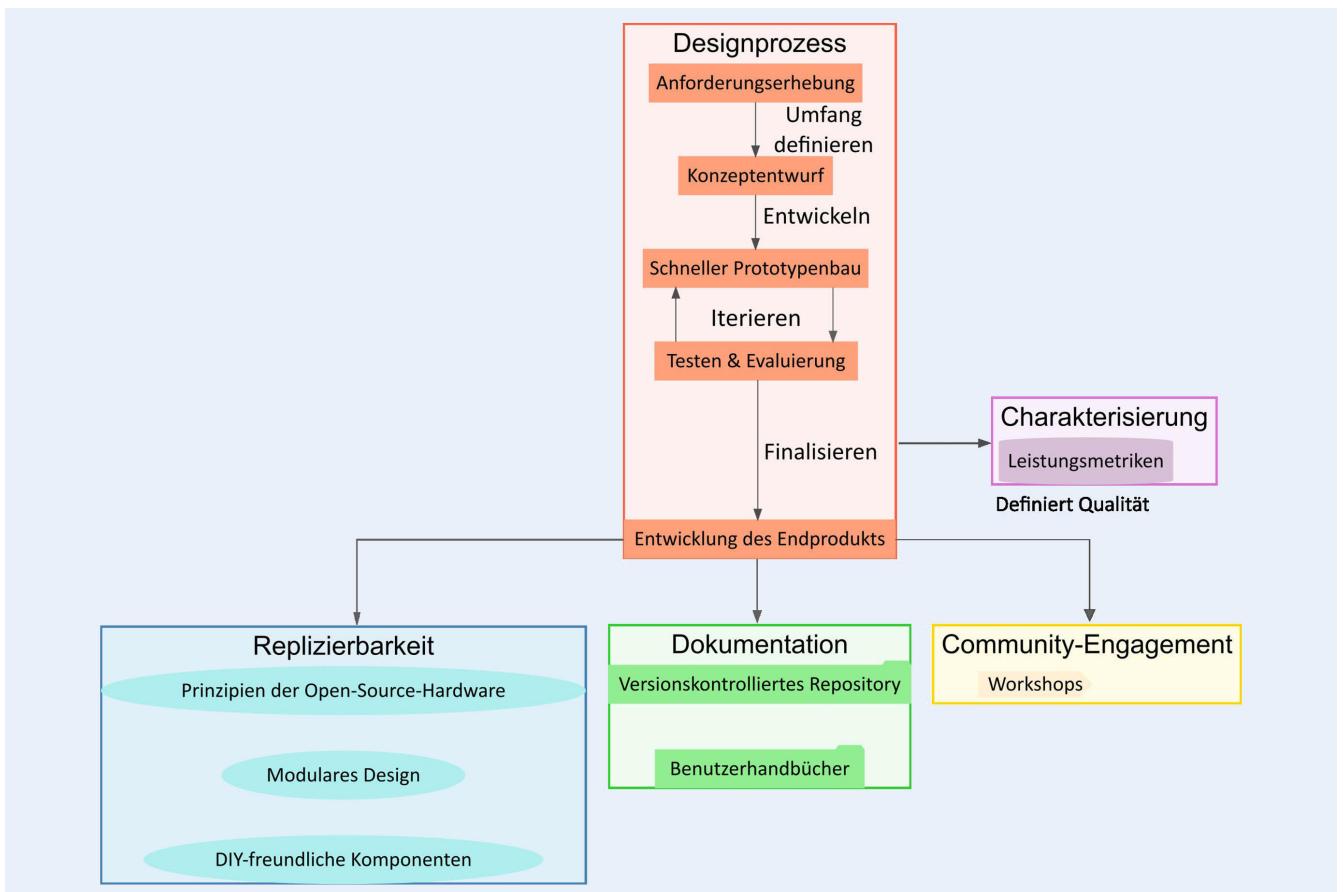


Bild 5. Vereinfachte Darstellung der Gestaltungsmethodik. Grafik: New Production Institute (J.C. Mariscal-Melgar)

nisation der Dokumentation mit aktuellen Hardware-Design Versionen beschreibt [1, 14].

- Vollständigkeit der Dokumentation: Eine vollständige Dokumentation sollte auch eine ausreichende Beschreibung möglicher kritischer Fehlerereignisse und Maßnahmen zur Fehlerbehebung enthalten. Darüber hinaus sollten genügend Informationen gespeichert werden, um eine Person für den Bau der Hardwareversion zu schulen [1, 14].
- Zugänglichkeit der Dokumentation, der Werkzeuge und des Materials: Dieser Punkt umfasst die Zugänglichkeit der Arbeitsschutz-Projektdokumentation, auch automatisiert durch die Integration von Metadaten, die Zugänglichkeit der benötigten Materialien und Komponenten sowie der benötigten Werkzeuge und Geräte [1, 14].

- Einfachheit der Herstellung: Dieser Faktor bestimmt, welche Kenntnisse und Fähigkeiten erforderlich sind, welche Materialien und Werkzeuge benötigt werden und welche Prozesse für die Montage des OSH-Designs durchgeführt werden müssen [1, 14].

Ohne eine ausführliche Dokumentation der verschiedenen grundlegenden Aspekte einer Maschine ist der Nachbau nur einer begrenzten Gruppe von Personen zugänglich, die über ein hohes Maß an technologischer Kompetenz, Fachwissen und Erfahrung sowie Zugang zu Materialien verfügen. Wenn alle Schritte, die zur Herstellung der Hardware notwendig sind, im Detail erklärt werden, werden die Benutzer in der Lage sein, die Technologie zu verstehen und nach ihren Bedürfnissen zu modifizieren, da sie

## STEP 9.3 COMPLETING THE FRAME - MIDDLE

Step 9/33 20min



**R29.** Use 2x Templates 2 to measure the distance to the back profile and tighten all the B-screws.  
**H1.** How to insert T-nuts? p.8

Laser V2 vielversprechende Ergebnisse, die eine Grundlage für die weitere Verfolgung der Open-Source-Hardware-Prinzipien und Reproduzierbarkeitsfaktoren gemäß der Literatur bilden.

Der OLSK Small Laser V2 unterstreicht die Rolle von Open-Source-Hardware bei der Förderung der digitalen Fertigung. Das Projekt demonstriert ein Innovationsmodell, das Feedback aus der Community, iteratives Design und transparente Kommunikation integriert. Das Ergebnis ist ein Lasercutter, der mit kommerziellen Modellen konkurrieren kann und gleichzeitig Zugänglichkeit, Reproduzierbarkeit und Nachhaltigkeit fördert. Ein entscheidender Aspekt bei der Entwicklung des OLSK Small Laser V2 war seine Open-Source-Philosophie. Die Veröffentlichung der Designdateien und der Dokumentation erleichtert eine breite Beteiligung und ebnnet den Weg für Modifikationen durch die Benutzer, was zu den allgemeinen Zielen der Demokratisierung der Technologie und der Förderung des gemeinschaftlichen Fortschritts beiträgt. Die Designstrategie, die sich auf die Replizierbarkeit durch die Verwendung bestehender Bauteile konzentriert, steht im Einklang mit dem Ziel, die weltweite Reproduktion und Anpassung zu erleichtern. Dieser Ansatz unterstützt die Dezentralisierung der Fertigung, indem er den Nutzern die Möglichkeit gibt, das Design und die Anwendung der digitalen Fertigungsmaschinen zu beeinflussen. Der Ansatz der Open-Source-Entwicklung, der Einbeziehung der Öffentlichkeit und der Dokumentation könnte sich auf die künftige Forschung in Bereichen wie zum Beispiel den Lehr- und Lernmitteln, der ökologischen Nachhaltigkeit und dem weltweiten Zugang zur Technologie auswirken. Darüber hinaus wird eine Neubewertung der Produktionsparadigmen angeregt, indem ein Wandel hin zu stärker integrativen und partizipativen Produktions- und Innovationsmodellen gefördert wird.

## DANKSAGUNG

Wir bedanken uns für die Unterstützung der dtec.bw-Forschungsprojekte „Fab City – Dezentrale digitale Produktion für urbane Wertschöpfung“ und „Digital Urban Production – Förderung lokaler Produktionen“, die vom dtec.bw – Forschungszentrum Digitalisierung und Technik der Bundeswehr gefördert werden. Das dtec.bw wird von der Europäischen Union – NextGenerationEU – finanziert.

## L i t e r a t u r

- [1] Lange, L. et al.: Community-based replication of Open Source Machine Tools. In: dtec.bw-Beiträge der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg: Forschungsaktivitäten im Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr dtec.bw – Band 1 2022, S. 76–81
- [2] OSHWA: OSH Definition. Stand: 2024. Internet: [www.oshwa.org/definition/](http://www.oshwa.org/definition/). Zugriff am 12.03.2024
- [3] Opensource.com: What is open hardware?, Stand: 2024. Internet: [www.opensource.com/resources/what-open-hardware](http://www.opensource.com/resources/what-open-hardware). Zugriff am 12.03.2024
- [4] Bonvoisin, J.; Mies, R.: Measuring openness in open source hardware with the open-O-meter. Procedia CIRP 78, 6th CIRP Global Web Conference, 2018, S.388–393
- [5] Bonvoisin, J.; Mies, R.; Boujut, J.-F.; Stark, R.: What is the “Source” of Open Source Hardware? Journal of Open Hardware, 1(1): 5 (2017), S.1–182017
- [6] Gupta, G.; Nowatzki, T.; Gangadhar, V.; Sankaralingam, K.: Open-source hardware: Opportunities and challenges. ArXiv Prepr. ArXiv160601980 (2016)
- [7] Omer, M.; Kaiser, M.; Moritz, M.; Buxbaum-Conradi, S.; Redlich, T.; Wulfberg, J. P.: Democratizing manufacturing – conceptualizing the potential of open source machine tools as drivers of sustainable industrial development in resource constrained contexts. Conference on Production Systems and Logistics, 3rd CPLS, Hannover 2022, S.256–266
- [8] Gershenfeld, N.; Euchner, J.: Atoms and Bits: Rethinking Manufacturing. Research-Technology Management, 58 (2015), S.16–23
- [9] Redlich, T., Buxbaum-Conradi, S.; Basmer-Birkenfeld, S.-V.; Moritz, M.; Krenz, P.; Osunyomi, B. D.; Wulfberg, J. P.; Heubischl, S.: OpenLabs – open source microfactories enhancing the FabLab idea. 49th Hawaii International Conference on System Sciences, 49th HICSS, Koloa 2016, S.707–715
- [10] Mariscal-Melgar, J.C.; Omer, M.; Moritz, M.; Hijma, P.; Redlich, T.; Wulfberg, J. P.: Distributed manufacturing: A high-level node-based concept for open source hardware production Conference on Production Systems and Logistics, 3rd CPLS, Hannover 2022, S.795–808
- [11] Buxbaum-Conradi, S.; Koppe, J.; Moritz, M.; Redlich, T.; Wulfberg, J. P.: A living lab approach to explore new forms of open, distributed manufacturing in an urban context. In: dtec.bw-Beiträge der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg: Forschungsaktivitäten im Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr dtec.bw – Band 1 2022, S.82–90
- [12] InMachines Ingrassia GmbH website – OLSK page. Stand: 2024. Internet: [www.inmachines.net/open-lab-starter-kit](http://www.inmachines.net/open-lab-starter-kit). Zugriff am 12.03.2024
- [13] Diez, T.: Fab City whitepaper: locally productive, globally connected self-sufficient cities. (2016)
- [14] Antoniou, R.; Pinquié, R.; Boujut, J.-F.; Ezoji, A.; Dekoninck, E.: Identifying the Factors Affecting the Replicability of Open Source Hardware Designs. International Conference on Engineering Design (ICED21), Gothenburg 2021, S.1817–1826
- [15] Open Lab Starter Kit Repositories. Stand: 2024. Internet: [www.github.com/Open-Lab-Starter-Kit](http://www.github.com/Open-Lab-Starter-Kit). Zugriff am 12.03.2024
- [16] Molenaar, J., Ingrassia, D.: Mastering digitally controlled machines: laser cutters, 3D printers, CNC mills, and vinyl cutters to make almost anything. New York: Apress 2024. S.44
- [17] Hildebrandt, L.; Zadow, S.; Lange, L.; Langhammer, M.; Moritz, M.; Redlich, T.; Wulfberg, J. P.: What are the Role and Capabilities of Fab Labs as a Contribution to a Resilient City? Insights from the Fab City Hamburg. Conference on Production Systems and Logistics, 3rd CPLS, Hannover 2022, S.192–205
- [18] InMachines Ingrassia GmbH: OLSK Small Laser V2. Stand: 2023. Internet: [www.doi.org/10.5281/zenodo.10217432](https://doi.org/10.5281/zenodo.10217432). Zugriff am 12.03.2024
- [19] Gibb, A.: Building open source hardware: DIY manufacturing for hackers and makers. Addison-Wesley Professional 2014. S.70
- [20] Ackermann, J.R.: Toward open source hardware. University of Dayton Law Review 34:2 (2009), S. 183–222



**Gaia di Martino, M. Sc.**

Foto: Autorin

gaia.dimartino@hsu-hh.de

**J. C. Mariscal-Melgar, M. Sc.**

**Luisa Lange, M. Sc.**

**Mohammed Omer, M. Sc.**

**Dr. Tobias Redlich**

**Prof. Dr. Jens P. Wulfsberg**

**Danielle Ingrassia, B.Sc.**

Helmut-Schmidt-Universität/UniBw H

New Production Institute

Laboratorium Fertigungstechnik

Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg

<https://newproductioninstitute.de>

**LIZENZ**



Dieser Fachaufsatzt steht unter der Lizenz Creative Commons  
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)