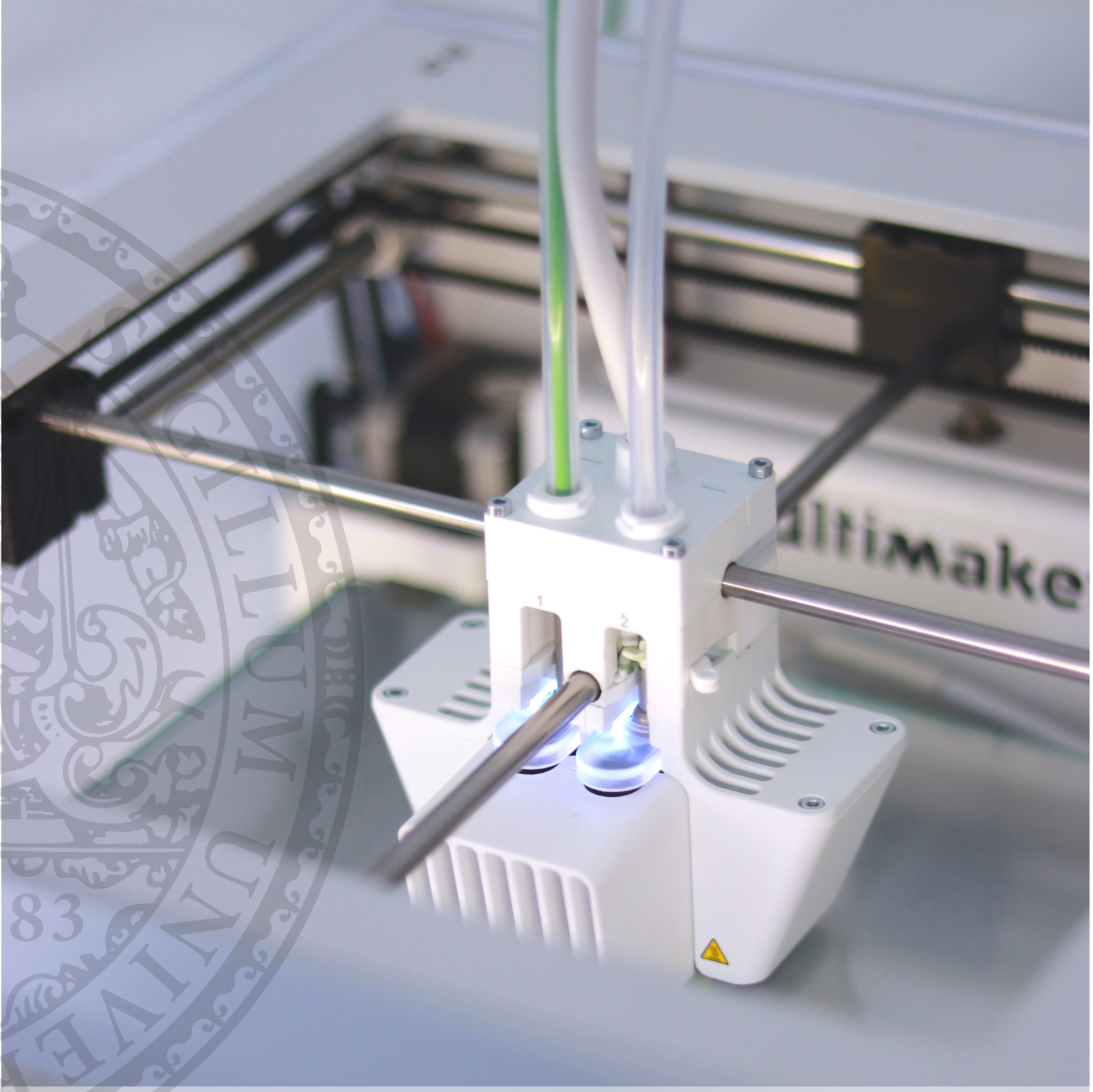

Dienstleistung für den integrierten Handel mit Produktionskapazitäten

– Entwurf eines Marktplatzes für 3D-Druckkapazitäten –

Julius-Maximilians-
UNIVERSITÄT
WÜRZBURG

Gefördert vom: Bundesministerium für Bildung und Forschung

Betreut vom: Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA)

Entwurf eines Marktplatzes für 3D-Druckkapazitäten

Um den Entwurf eines Marktplatzes für 3D-Druckkapazitäten des Forschungsprojekts „DiHP“ zu ermöglichen, wird hier ein IT-Artefakt vorgestellt. Das IT-Artefakt bezieht sich hierbei auf das Matching eintreffender Anfragen und bestehender Kapazitäten. Durch die automatische Anpassung von Angebot und Nachfrage bei additiven Fertigungskapazitäten trägt dieses Modul zur Verbesserung der Kapazitätsauslastung bei. Aus Sicht des Geschäftsmodells stellt die Plattform eine Peer-to-Peer-Plattform dar, da sie als Vermittler zwischen Unternehmen fungiert. Der Hauptbeitrag dieser Forschung ist es zu zeigen, dass die additive Fertigung in Kombination mit bestehenden Methoden der Betriebsführung den Aufbau eines plattformbasierten offenen Produktionssystems ermöglicht.

1 Einführung

Produktionsunternehmen stehen unter einem ständigen wirtschaftlichen Druck die Auslastung der Produktionskapazitäten zu optimieren. Unsicherheiten aufgrund der zukünftigen Nachfrage oder Maschinenverfügbarkeit stellen dabei jedoch eine große Herausforderung dar. Unsicherheiten können sowohl zu Überkapazitäten als auch zu Kapazitätsengpässen führen. In beiden Fällen wird die Rentabilität des Unternehmens entweder durch Mehrkosten oder entgangene Umsätze beeinträchtigt. Zu einem bestimmten Zeitpunkt ist es jedoch wahrscheinlich, dass andere Produktionsunternehmen mit dem umgekehrten Problem konfrontiert sind - entweder mit einer unzureichenden Nachfrage oder mit mangelnder Kapazität zur Bedienung der Nachfrage. Dies bietet natürlich die Möglichkeit, die Vorteile der zunehmenden IT-gestützten Offenheit zu nutzen, um die gemeinsame Nutzung von Produktionsressourcen zu erleichtern und von den Ökonomien der gemeinsamen Nutzung zu profitieren (Kranton & Minehart, 2001).

Durch die drastische Senkung der Transaktionskosten für die Anpassung von Angebot und Nachfrage hat das Internet Lösungen für die Ressourcenteilung in vielen Branchen gefördert: Plattformen als Vermittler weisen ansonsten ungenutzte Kapazitäten effizient zu und erhöhen damit die soziale Sicherheit. Beispiele für diese Plattformen sind Uber oder Airbnb, die es den Autobesitzern entweder ermöglichen, ansonsten unbesetzte Plätze als Autokapazität anzubieten, oder ungenutzte Wohnungen (Kenney & Zysman, 2016).

Diese Dienstleistungen handeln hochliquide Kapazitäten, da die Käufer Kompromisse eingehen und teilweise von ihren Erwartungen abweichen können, was die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass Angebot und Nachfrage übereinstimmen.

Im Fertigungskontext war die Anpassung der Produktionskapazitäten an die Produktionschargen traditionell nicht möglich, da hochspezialisierte Werkzeugmaschinen eine einfache Zuordnung von Produktionsaufträgen zu dezentralen Kapazitäten ausschließen. Das Aufkommen der additiven Fertigung (auch bekannt als 3D-Druck) stört jedoch den Fertigungssektor (Petrick & Simpson, 2013) und ändert diese Logik, da 3D-Drucker hoch differenzierte Produkte mit sehr begrenzten Einrichtungskosten herstellen können (Thiesse, et al., 2015). Darüber hinaus ermöglichen hoch standardisierte Datenformate einen einfachen Datenaustausch. Dies führt zu einer Ökonomie des Teilens im Sinne der (Kranton & Minehart). Nach der Offenheit von Schlagwein (2017) ist IT-fähige Offenheit ein vielversprechender Weg, um diese Potenziale auszuschöpfen. Mit 3D-Druckern, die als offene Ressourcen und als Plattform für den Kapazitätshandel als offener Prozess dienen, bietet ein offenes Produktionssystem Flexibilität und Skalierbarkeit und ermöglicht es Unternehmen, virtuelle betriebliche Flexibilität zu erlangen, anstatt einen inflexiblen Produktionsfußabdruck aufzubauen (Jordan & Graves, 1995).

Der Erfolg von Plattformen als Vermittler zwischen in anderen Teilen der Wirtschaft zeigt ihr Potenzial zur Anpassung von Angebot und Nachfrage an Produktionskapazitäten auf und motiviert die Erforschung dieses Themas. Als integraler Bestandteil einer solchen Handelsplattform müssen Fertigungsaufträge den verfügbaren Produktionskapazitäten zugeordnet werden. In weiteren Verlauf stellen wir ein IT-Artefakt für den automatischen Abgleich von Produktionskapazitäten und Fertigungsaufträgen vor. Die Effektivität dieses Abgleichs ist entscheidend für den Erfolg der Plattform (Veit, Müller, Schneider, & Fiehn, 2001). Um die Komplexität dieser Aufgabe zu bewältigen und den Kunden Echtzeitentscheidungen zu ermöglichen, setzt die Plattform auf Methoden der Betriebsführung, um Aufträge auf verteilten Druckern automatisch zu planen. Aufgrund der relativ kleinen 3D-Druckkapazitäten gegenüber großen Fertigungswerkzeugen muss das Planungssystem eine sehr große Anzahl von Aufträgen bewältigen. Zu diesem Zweck schlagen wir einen heuristischen Planungsansatz vor. Wir sind besonders an Systemen mit einem aggregierten Nachfrageüberhang interessiert, um die Knappheit der Produktionskapazitäten zu gewährleisten. Dabei wird die Anzahl der betreuten Jobs, gewichtet nach ihrer Zahlungsbereitschaft, zu einer zentralen Dimension der Bewertung der Systemleistung. Unser IT-Artefakt veranschaulicht das Potenzial von Plattformen, die den Handel mit Produktionskapazitäten durch additive Fertigung für Produktionsunternehmen ermöglichen. Um unsere Arbeit zu strukturieren und ihren Fokus zu betonen, stellen wir uns die folgenden Forschungsfragen:

1. Welche Gestaltungselemente gibt es für eine Plattform zum effizienten Handel mit Produktionskapazitäten zwischen Unternehmen?
2. Wie hoch ist die relative Performance unseres Online Optimierungsansatzes im

Vergleich zum Benchmark-Fall der vollständigen Informationen?
3. Inwieweit können Produktionsaufträge durch erhöhte Zahlungsbereitschaft und zeitliche Flexibilität ihre Eintrittswahrscheinlichkeit erhöhen?

Anhand dieser Fragen wollen wir das Potenzial aufzeigen, die bestehenden Anwendungsfälle der additiven Fertigung auf den Handel mit Produktionskapazitäten auszuweiten und damit eine wirtschaftliche Basis für offene Produktionssysteme zu schaffen. Im Folgenden stellen wir die additive Fertigung als disruptive Technologie heraus und geben einen Überblick über die damit verbundene Entstehung von 3D-Druckplattformen. Nach der Vorstellung der Forschungsmethodik beschreiben und bewerten wir das IT-Artefakt.

2 Forschungsmethodik

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die oben genannten Ausführungen die Komplexität des Problems aufgrund der zahlreichen Akteure und der mit Angebot und Nachfrage verbundenen Unsicherheit unterstreichen. Wenn die marktgestützte Koordination diesen Herausforderungen begegnet, ermöglicht die additive Fertigung den flexiblen Handel mit Produktionskapazitäten und begegnet der ineffizienten Allokation von Überkapazitäten und Bedarf. Um einen intelligenten Markt für das anstehende Problem des Kapazitätshandels zu gestalten, schlagen wir einen geeigneten Allokationsmechanismus vor. Neben der Bewältigung der Problemkomplexität muss der Zuteilungsmechanismus Echtzeit-Entscheidungen über die Annahme oder Ablehnung von Aufträgen sicherstellen und den Kunden ein sofortiges Feedback ermöglichen. Darüber hinaus sollte der Zuteilungsalgorithmus die Kunden dazu anregen, private Informationen preiszugeben, um die Zuordnungsergebnisse zu verbessern und ein Marktergebnis zu erzielen, das der optimalen Lösung so nahe wie möglich kommt.

Basierend auf diesen Erläuterungen stellen wir ein IT-Artefakt vor, das mehrere der oben genannten Herausforderungen adressiert und einen möglichen Allokationsmechanismus für Nachfrage und Angebot von Kapazitäten für die additive Fertigung aufzeigt. Um unsere Arbeit zu strukturieren und die Transparenz für die Leser zu erhöhen gehen wir kurz, bevor wir das IT-Artefakt untersuchen, auf unsere Forschungsmethode ein. Wir konzipieren den Mechanismus für den Handel mit Produktionskapazitäten mit einem designorientierten Forschungsansatz. Dabei stützen wir uns auf die von Hevner (2004) vorgelegten Richtlinien:

Problemrelevanz: *Ungewisse, schwankende Nachfrage führt dazu, dass Unternehmen entweder Überkapazitäten oder fehlende Kapazitäten zur Deckung der Nachfrage haben. Eine Produktionsabgleichsplattform ermöglicht es Unternehmen, Produktionskapazitäten zu kaufen und zu verkaufen und trägt so dazu bei, Produktionskapazitäten effizienter zu verteilen.*

Forschungsrigorosität: *Um Angebot und Nachfrage aufeinander abzustimmen und den Kunden ein sofortiges Feedback zu ermöglichen, formulieren wir das Problem im Sinne eines* mixed integer programs. *Anschließend schlagen wir einen Online-Optimierungsansatz vor und vergleichen es mit der optimalen Offline-Lösung, welche unter perfekten Informationen ermittelt wurde.*

Design als Suchprozess: *Wir stützen die vorgeschlagene Online-Optimierung und das das* mixed integer program *für die Offline-Lösung auf relevante wissenschaftliche Arbeiten, welche ähnliche Probleme innerhalb intelligenter Energiemärkte lösen* (Ströhle, Gerding, Weerdt, Stein, & Robu, 2014).

Design als Artefakt: *Wir entwerfen ein IT-Artefakt mit vier Modulen. Das IT-Artefakt und jedes seiner Module werden ausführlich beschrieben und mit Python implementiert.*

Design Evaluation: *Mögliche Marktergebnisse analysieren wir mittels einer Simulationsstudie. Aus den Ergebnissen leiten wir wirtschaftliche Implikationen für Einkäufer und Lieferanten von 3D-Druckkapazitäten ab und diskutieren die Grenzen des vorgeschlagenen Artefakts.*

Forschungsbeitrag: *Der Hauptbeitrag dieser Forschung ist zu zeigen, dass die additive Fertigung in Kombination mit bestehenden Methoden der Betriebsführung den Aufbau eines plattformbasierten offenen Produktionssystems ermöglicht.*

Forschungskommunikation: *Unsere Forschung lädt Wissenschaftler ein, die Möglichkeiten zu untersuchen, die die additive Fertigung für den Handel mit Produktionskapazitäten bietet. Für Praktiker zeigt die Forschung das Potenzial der additiven Fertigung auf, um der Herausforderung von Überkapazitäten und fehlenden Kapazitäten zu begegnen.*

Der folgende Abschnitt beschreibt das IT-Artefakt mit seinen vier Modulen im Detail. Dazu gehört die Darstellung von Inputs und Outputs, die zugrunde liegenden Parameterannahmen und eine Erläuterung des Matching-Algorithmus.

3 Problemformalisierung

Bevor wir das Artefaktdesign im Detail betrachten, beschreiben wir zunächst die Eingangsparameter bezüglich der verfügbaren Drucker und der eingehenden Aufträge. Hier beschreibt das Set I die auf der Plattform angebotenen Drucker. Jeder Drucker I wird durch seine Kompatibilität in Bezug auf Größe und Materialien g_i, den erwarteten Mindestpreis für die Bereitstellung der Kapazität m_i (Reservierungspreis) und seine Verfügbarkeit beschrieben. Ebenso wird die Menge der eingehenden Aufträge J durch eine Vielzahl von Parametern beschrieben. Hier werden die Größe und der Materialbedarf des Jobs J unter dem Parameter c_j zusammengefasst. Zusätzlich werden das Freigabedatum r_j, die Produktionsfrist d_j, die Bearbeitungszeit p_j und das Angebot des Kunden v_j angegeben. Tabelle 1 fasst die relevanten Parameter zusammen. Zur Vereinfachung des Problems wird die Verfügbarkeit von Druckern als bekannt angenommen. Andererseits wird die Nachfrage als unbekannt angenommen, da sich die Informationen über Arbeitsplätze auf diejenigen beschränken, die bereits angekommen sind, während zukünftige Arbeitsplätze unbekannt sind.

Parameter	Beschreibung
g_i	Kompatibilität bezüglich Größe und Materialien des Druckers i
m_i	Reservierungspreis für Kapazität auf Drucker i
c_j	Anforderungen an Größe und Material des Auftrags j
r_j	Freigabe des Jobs j
d_j	Frist für den Auftrag j
p_j	Verarbeitungszeit des Auftrags j
v_j	Vom Kunden abgegebenes Angebot für den Auftrag j

Tabelle 1: Eingabe Parameter

Basierend auf diesen Annahmen und Parametern können wir ein Offline-Mixed-Integer-Programm definieren, welches das vorliegende Allokationsproblem beschreibt. Da die Zuordnung im Sinne eines Terminproblems modelliert werden kann, verwenden wir eine ähnliche Aufgabenstellung. Zu diesem Zweck nimmt die binäre Entscheidungsvariable $a_{i,j}$ den Wert 1 an, wenn der Auftrag j auf dem Drucker i geplant ist. Andernfalls ist die Variable 0. Die Variable $t_{i,j}$ gibt die Startzeit des Auftrags j auf dem Drucker i an. Die binäre Variable $a_{i,j,k}$ repräsentiert, ob der Auftrag j dem Auftrag k auf der Maschine i vorausgeht.

Bei klassischen Planungsproblemen müssen alle Aufträge erfüllt werden, und das Ziel ist es, die Gesamtlaufzeit zu minimieren. Im Gegensatz dazu müssen wir eine alternative Zielfunktion finden, da nicht alle Arbeitsplätze in dem vorliegenden Problem akzeptiert werden müssen. Zu diesem Zweck beschließen wir, den Gesamtumsatz zu maximieren. Wie in Gleichung 1 gezeigt, modellieren wir das Einkommen als die Summe der Angebote aller angenommenen Jobs.

$$max \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} a_{i,j} \cdot v_j$$

Gleichung 1

Zusätzlich zur Zielfunktion existieren mehrere Einschränkungen für die verfügbaren Planungsoptionen. Gleichung 2 stellt sicher, dass ein Auftrag von höchstens einem Drucker angenommen werden kann.

$$\sum_{i=1}^{I} a_{i,j} \leq 1 \qquad \forall j$$

Gleichung 2

Auch im Offline-Fall gehen wir von einer perfekten Vorausschau aus. Die erste Einschränkung von Gleichung 3 stellt sicher, dass ein Job nicht vor seiner Ankunft geplant werden kann. Zusätzlich müssen alle angenommenen Aufträge vor Ablauf der Frist abgeschlossen sein, dargestellt in der zweiten Einschränkung (Gleichung 3).

$$
\begin{aligned}
t_{i,j} &\geq r_j - (1 - a_{i,j}) \cdot M && \forall i, j \\
t_{i,j} + p_j &\leq d_j + (1 - a_{i,j}) \cdot M && \forall i, j \\
t_{i,k} + p_k &\leq t_{i,j} + M \cdot x_{i,j,k} && \forall i, j, k \\
t_{i,j} + p_j &\leq t_{i,k} + M \cdot (1 - x_{i,j,k}) && \forall i, j, k
\end{aligned}
$$

Gleichung 3

Die beiden letztgenannten Einschränkungen (Gleichungen (Gleichung 3) gewährleisten die Konsistenz zwischen den Jobs und werden von Ku (2016) übernommen. Sie verhindern, dass zu jeder Zeit mehr als ein Auftrag auf einem Drucker verarbeitet wird. Die folgenden beiden Einschränkungen beziehen sich auf die Konsistenz zwischen Aufträgen und Drucker: Gleichung 4 stellt sicher, dass Aufträge nur auf kompatiblen Druckern geplant werden, z.B. hinsichtlich ihrer Größe oder druckbarer Materialien. Zusätzlich wird garantiert, dass ein Auftrag nur dann einem Drucker zugeordnet wird, wenn das für den Druck dieses Auftrags angebotene Angebot den vom Anbieter dieses Druckers erwarteten Mindestpreis überschreitet.

$$
\begin{aligned}
c_j &\leq g_i + (1 - a_{i,j}) \cdot M && \forall i, j \\
v_j &\geq m_i - (1 - a_{i,j}) \cdot M && \forall i, j
\end{aligned}
$$

Gleichung 4

Die Zielfunktion und die Beschränkungen bilden das *mixed integer program* zur Anpassung des Angebots an additiven Fertigungskapazitäten an die Nachfrage nach Druckaufträgen. Die Lösung führt zu einem optimalen Zeitplan, der den Umsatz auf der Plattform maximiert. Zwei Bedingungen hindern uns jedoch daran, dies im vorliegenden Anwendungsfall zu tun: Erstens erfordert die Lösung des genannten Problems vollständige Informationen über die ankommenden Aufträge. Die Informationen im Online-Terminierungsproblem sind jedoch auf die bereits eingetroffenen Jobs beschränkt. Zweitens, selbst wenn vollständige Informationen verfügbar wären, würde die Komplexität des Problems zu extrem langen Lösungszeiten führen, da die Lösung rechnerisch schwierig ist (Pinedo, 2016). Da vollständige Informationen nicht verfügbar sind und sofortiges Kundenfeedback eine Schlüsselanforderung für eine Online-Matching-Plattform ist, ist die Lösung des Offline-Mixed-Integer-Problems keine Option. Stattdessen konzentrieren wir uns auf die Lösung des Online-Problems mit einem simulationsbasierten, heuristischen Ansatz.

4 Artefaktdesign

Abbildung 1 veranschaulicht das IT-Artefakt. Eingehende Aufträge und verfügbare Drucker werden als Eingaben an das System übergeben. Basierend auf diesen Eingaben führen das Allokationsmodul und das Simulationsmodul mehrere Simulationen für jeden Auftrag durch. Innerhalb jeder Simulation wird ein Job eingeplant und damit entweder angenommen oder abgelehnt. Die Ergebnisse dieser Simulationen werden dann an das Entscheidungsmodul weitergeleitet, das anhand der

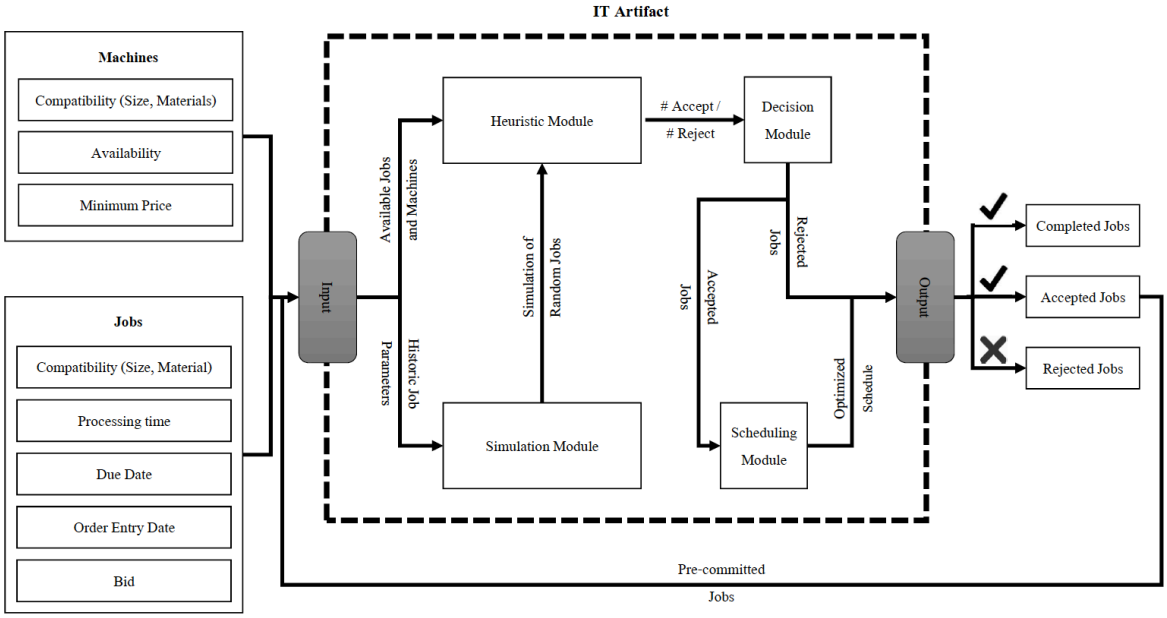

Abbildung 1: IT Artefakt

Annahmequote jedes Auftrags entscheidet, ob er angenommen wird oder nicht. Anschließend werden die angenommenen Aufträge zusammen mit den zuvor angenommenen Aufträgen an das Einplanungsmodul übergeben. Dieses Modul generiert einen optimierten Zeitplan. Basierend auf diesen Berechnungen gibt das System akzeptierte und abgelehnte Aufträge aus. Akzeptierte Aufträge werden dann bei Eingang neuer Aufträge wieder in das System eingegeben, sofern diese noch nicht ausgeführt wurden. Sie werden als vorbestätigte Aufträge bezeichnet. Andererseits werden früher angenommene und bereits abgeschlossene Aufträge als abgeschlossene Aufträge bezeichnet und gelangen nicht wieder in das System zurück.

Das Design des IT-Artefakts ermöglicht Echtzeit-Entscheidungen, die ein sofortiges Feedback an die Kunden ermöglichen. Alle vier Module sind mit Python implementiert. Basierend auf dem vorherigen Absatz werden in den folgenden Unterabschnitten die Funktionen der Module im Detail beschrieben.

4.1 Allocation Module

Wie bereits erwähnt, kann ein genaues Lösungsverfahren für das Online-Problem nicht festgelegt werden. Stattdessen folgen wir Ströhle (2014) und wenden eine Wertdichteheuristik an, um das vorliegende Problem anzugehen. Bei diesem Verfahren werden zunächst die verfügbaren Drucker aufgrund der zunehmenden Flexibilität sortiert. Die Flexibilität eines Druckers wird durch seine Vielseitigkeit in Bezug auf Bauvolumen, Druckgeschwindigkeit, Materialien und Präzision beschrieben. Anschließend werden vorab bestätigte Aufträge so früh wie möglich den am wenigsten flexiblen Druckern zugeordnet. Dieser Schritt stellt sicher, dass alle von der Plattform angenommenen Aufträge möglichst kapazitätsschonend ausgeführt werden. Anschließend werden die Aufträge nach abnehmender Wertdichte sortiert. In diesem Beitrag definieren wir die Wertdichte als das Angebot eines Kunden geteilt durch die Bearbeitungszeit des Auftrags. Basierend auf dieser geordneten Auftragsliste ordnet die Heuristik die Aufträge zu, indem sie die Wertdichte auf die verfügbaren Drucker verringert. Wenn ein Auftrag mehreren Druckern zugeordnet werden kann, wird der am wenigsten flexible Drucker dieses Satzes gewählt. Sobald die Heuristik keinen weiteren Job mehr einplanen kann, bricht die Simulation ab und der endgültige Zeitplan wird zurückgegeben. Die Vorgehensweise wird in folgendem Algorithmus zusammengefasst:

Algorithm 1 Value Density Heuristic

procedure ValueDensityHeuristic($I, J, c, g, v, p, t, m, r, d$)
  var *int* $time$, **var** *list* $scheduledJobs$
  $sort(I)$ by increasing size g_i, $sort(J)$ by decreasing value density $\frac{v_j}{p_j}$
  for $j \in (J \cap$ *pre-committed*$)$ **do**
    schedule pre-committed job j on printer i at $t_{i,j}$
  for $j \in (J \cap$ *not pre-committed*$)$ **do**
    for $i \in I$ **do**
      if $c_j \leq g_i \wedge m_i \leq v_j$ **then**
        $time = r_j$
        while $time + p_j \leq d_j$ **do**
          if $noJobScheduledinRange(time, time + p_j)$ **then**
            $t_{i,j} = time$, $a_{i,j} = 1$, append i to $scheduledJobs$
            break
          $time = time + 1$
  return $scheduledJobs$

Um die Leistung des heuristischen Ansatzes zu beurteilen, erstellen wir Zeitpläne für 50 Instanzen. Wir bestimmen dann die hypothetisch optimalen Lösungen, indem wir das Offline-Mixed-Integer-Programm unter vollständiger Information lösen. Da die Laufzeit des gemischten ganzzahligen Programms exponentiell wächst, ist die Lösungszeit auf 120 Sekunden begrenzt. Insgesamt liegt der durch die Heuristik bestimmte durchschnittliche Gesamtumsatz 4,4 % unter dem Umsatz der gemischten ganzzahligen Lösung. In vielen komplexen Fällen ist der Wertdichteansatz jedoch in der Lage, den zeitlich begrenzten Offlineansatz zu übertreffen (Abb. 2). Im Vergleich zu Instanzen, die optimal gelöst werden können, schneidet der vorgeschlagene Ansatz nur 6,9 % schlechter ab. Abb. 3 veranschaulicht, dass das *mixed integer program* die Heuristik übertrifft, indem sie hauptsächlich mehr Jobs plant - die heuristischen Zuweisungen erweisen sich als zu konservativ. Zusammenfassend stellen wir fest, dass der heuristische Ansatz eine sehr zufriedenstellende Lösungsqualität für das jeweilige Problem erreicht.

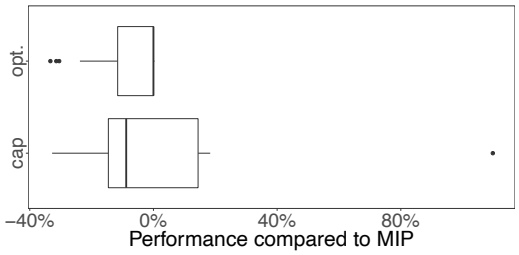

Abb. 2: Heuristik vs. *mixed integer program* (Profit)

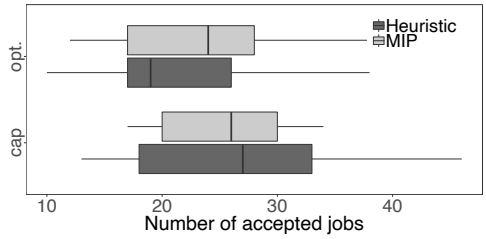

Abb. 3: Heuristik vs. *mixed integer program* (Anzahl der angenommenen Jobs)

4.2 Simulation and Decision Module

Um über die Annahme oder Ablehnung eingehender Aufträge in Echtzeit zu entscheiden, muss eine Entscheidung unter Unsicherheit über zukünftige Aufträge getroffen werden. Um solide Ergebnisse zu erzielen, orientieren wir uns bei diesen Entscheidungen an der simulierten zukünftigen Nachfrage. Zu diesem Zweck erzeugt das Simulationsmodul eine beliebige Anzahl von virtuellen Aufträgen, die gemäß einer Poisson-Verteilung eintreffen. Die Verteilungen der Jobparameter werden aus historischen Auftragseingängen abgeleitet und regelmäßig aktualisiert. Anschließend werden virtuelle Aufträge sowie der eingehende reale Auftrag und zuvor vorab bestätigte Aufträge an das Heuristik-Modul übergeben und der optimale Zeitplan ermittelt. Anhand dieses Zeitplans können wir feststellen, ob ein Auftrag in einem bestimmten Simulationslauf angenommen wurde. Dieser Prozess wird s-mal wiederholt und die Anzahl der angenommenen Aufträge wird an das Entscheidungsmodul weitergeleitet. Basierend auf einem festgelegten, veränderbaren Schwellenwert und der Annahmequote eines Auftrags wird ein eingehender Auftrag entweder angenommen oder abgelehnt. Überschreitet die Annahmequote den Schwellenwert, wird der Auftrag angenommen, ansonsten abgelehnt. Anschließend werden die angenommenen Aufträge zusammen mit den vorab bestätigten Aufträgen an das Einplanungsmodul übergeben, das mittels der Wertdichteheuristik einen optimierten Zeitplan erstellt. Der optimierte Zeitplan bildet zusammen mit den angenommenen und abgelehnten Aufträgen die Ausgabe des Systems. Sobald neue Aufträge eingehen, werden bereits angenommene Aufträge wieder in das System eingefügt und die damit verbundenen Einschränkungen bei zukünftigen Annahme- und Terminentscheidungen berücksichtigt. Insbesondere ermöglicht dieses Design Echtzeit-Entscheidungen und sofortiges Feedback an die Kunden über die Annahme oder Ablehnung ihres Auftrags.

5 Wirtschaftliche Auswirkungen

Durch die automatische Anpassung von Angebot und Nachfrage bei additiven Fertigungskapazitäten trägt das beschriebene IT-Artefakt zur Verbesserung der Kapazitätsauslastung bei. Aus Sicht des Geschäftsmodells stellt die Plattform eine Peer-to-Peer-Plattform dar, da sie als Vermittler zwischen Unternehmen (Gassmann, Frankenberger, & Csik, 2014) fungiert. Was das Leistungsversprechen betrifft, so verbindet die Plattform Unternehmen, die über Überkapazitäten verfügen, mit Unternehmen, die mit zusätzlicher Nachfrage konfrontiert sind. Aus Unternehmenssicht trägt die Plattform dazu bei, mit schwankender, unsicherer Nachfrage umzugehen und die Einnahmen zu steigern - entweder indem sie es den Unternehmen ermöglicht, zusätzliche Nachfrage zu befriedigen, die nicht mit ihren eigenen Kapazitäten gedeckt werden konnte, oder indem sie anderen Unternehmen Überkapazitäten anbietet. Aus ökonomischer Sicht erhöht das IT-Artefakt die Wohlfahrt. Der Prototyp veranschaulicht somit, dass die additive Fertigung in Kombination mit Methoden aus der elektronischen Marktgestaltung und Betriebsführung in der Lage ist, bestimmte Produktionskapazitäten in handelbare Güter umzuwandeln und damit den Weg zu einem offenen Produktionssystem zu ebnen.

Natürlich können Unternehmen nicht alle ihre Produktionskapazitäten in additive Fertigungskapazitäten verlagern. Stattdessen wird die additive Fertigung in erster Linie die bestehenden Produktionstechnologien ergänzen. Daher stellt sich die Frage, in welchen Situationen die vorgeschlagene Plattform für Unternehmen von Nutzen ist. Aus Sicht der Kapazitätsbereitstellung ermöglicht die Plattform es Unternehmen, zusätzliche Umsätze zu generieren, wenn sie sonst ungenutzte Kapazitäten ihrer Drucker anbieten können. Im Falle eines Kapazitätsverbrauchers ermöglicht die Plattform es Unternehmen, Bedarf zu decken, der nicht durch eigene Kapazitäten gedeckt werden kann. In diesem Zusammenhang können Unternehmen externe Kapazitäten für Druckerzeugnisse beziehen, wenn die Nachfrage ihre eigenen Basiskapazitäten übersteigt. Darüber hinaus kann die Situation, dass ein Unternehmen die Nachfrage nicht bedienen kann, auch dann eintreten, wenn ein Lieferant bestimmte Komponenten für die Produkte des Unternehmens nicht liefert. In diesen Situationen können sich Unternehmen auf additive Fertigungskapazitäten anderer Unternehmen verlassen, um

diese Komponenten zu drucken. Diese virtuelle Kapazität ermöglicht es diesen Unternehmen, Lieferantenausfälle zu beheben und ihre Produkte rechtzeitig zu liefern. Weitere Umstände, unter denen Unternehmen ihre Lieferzusagen nicht einhalten können und sich die additive Fertigung als nützlich erweisen könnte, sind Maschinenausfälle. Obwohl die additive Fertigung in den meisten Situationen tendenziell teurer ist als herkömmliche Fertigungstechniken, lohnt es sich, zusätzliche Kapazitäten auf einer Plattform zu kaufen, wenn die potenziellen Umsatz- und Firmenwertverluste die Kosten für den Druck der Produkte übersteigen.

Beim Aufbau einer Handelsplattform für additive Fertigungskapazitäten stellt die Gewinnung einer ausreichenden Anzahl von Nutzern eine große Herausforderung dar. Andernfalls würde eine zu kleine Benutzergruppe dazu führen, dass die meisten Unternehmen keinen Transaktionspartner finden. Andererseits sind diese Netzwerkeffekte ein zentraler Treiber für Unternehmen, sich auf eine begrenzte Anzahl von Plattformen zu konzentrieren, anstatt sich auf eine breite Palette von Plattformen zu verteilen. Daher sollten Netzwerkeffekte eine ausreichende Anzahl von Plattformteilnehmern sicherstellen, um einen effizienten Abgleichmechanismus für additive Fertigungskapazitäten zu ermöglichen. Wie die Auswertungsergebnisse zeigen, ermöglicht das IT-Artefakt Echtzeit-Entscheidungen über die Annahme oder Ablehnung eines Auftrags. Durch die sofortige Rückmeldung auf die Nachfrageseite erhöht das System die Planungssicherheit der Unternehmen auf dieser Seite und ermöglicht es ihnen, ihre Angebote sofort neu zu bewerten: Wenn ein Auftrag zunächst abgelehnt wird, kann der Käufer beschließen, das Angebot zu erhöhen und wieder in den Auftrag einzusteigen. Wird der Auftrag auch nach der Angebotsabgabe abgelehnt, kann der Käufer erneut beschließen, das Angebot erneut zu erhöhen. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis der Auftrag entweder angenommen wird oder der Käufer beschließt, auf höhere Gebote zu verzichten, da deren Höhe den Nutzen aus der Annahme des Auftrags übersteigen würde. Dies zeigt zwei Effekte: Erstens, während unsere Ergebnisse zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit, dass ein Auftrag angenommen wird, sowohl von seiner Wertdichte als auch von seiner Flexibilität abhängt, können Bieter diese Wahrscheinlichkeit deutlich erhöhen, indem sie im Vergleich zu anderen Kunden ein höheres Angebot abgeben. Wenn Kunden also ein extrem hohes Angebot für einen Auftrag mit hoher Priorität abgeben, akzeptiert die Plattform in den meisten Fällen diesen Auftrag. Zweitens motiviert der Mechanismus sowohl Bieter als auch Lieferanten, private Informationen über Bewertung und Flexibilität wahrheitsgemäß offenzulegen.

6 Fazit und Ausblick

Der vorgestellte Prototyp ermöglicht es Unternehmen, die Potenziale des verteilten 3D-Drucks zu nutzen. Folglich kann ein offenes Produktionssystem durch viele dezentrale Produktionsanlagen (3D-Drucker) ein Leistungsvolumen erreichen. Die Volumenflexibilität einer einzelnen Produktionseinheit wird durch die gemeinsame Kapazität vieler Einheiten abgelöst. Dabei wird die Volumenflexibilität des gesamten Produktionssystems durch die große Anzahl dezentraler Druckwerke instanziiert.

Unser Prototyp befasst sich mit einigen zentralen Herausforderungen bei der Entwicklung einer solchen Plattform für den Handel mit Kapazitäten für die additive Fertigung: Erstens ermöglicht es, die unsichere Nachfrage und die Komplexität des zugrunde liegenden Problems zu bewältigen, die sich aus den zahlreichen Akteuren und dem umfangreichen Netzwerk von Druckern ergibt. Darüber hinaus liefert es der Nachfrageseite ein sofortiges Feedback über die Annahme oder Ablehnung von Aufträgen. Daher erlaubt es den Käufern, ihre Angebote neu zu bewerten und motiviert sie, private Informationen preiszugeben, um die Planungsergebnisse zu verbessern. Durch die Bewältigung dieser Herausforderungen ermöglicht die Plattform Unternehmen, die über Überkapazitäten verfügen, zusätzliche Umsätze zu generieren, indem sie diese auf der Plattform anderen Unternehmen anbietet. Auf der anderen Seite können Unternehmen, die mit einer Übernachfrage konfrontiert sind, diese befriedigen, indem sie Druckaufträge an andere Unternehmen auslagern. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Plattform als Vermittler zwischen Nachfrage- und Angebotsseite zu einer effizienteren Allokation von Produktionskapazitäten führt, es den Unternehmen ermöglicht, ihre Einnahmen zu steigern und den Sozialschutz zu erhöhen.

Um diese Vorteile zu nutzen, müssen einige Einschränkungen des beschriebenen Ansatzes berücksichtigt werden. Im Moment geht das Artefakt von konstanten Verarbeitungszeiten der Aufträge über Drucker hinweg aus. In Wirklichkeit unterscheiden sich die Verarbeitungszeiten jedoch je nach Drucker. Darüber hinaus berücksichtigt die Heuristik die Druckkosten nicht explizit in der

Dispositionsentscheidung. Stattdessen beschränkt sie ihre finanziellen Inputs auf den vom Kapazitätsanbieter geforderten Mindestpreis und das Angebot der Person, die Kapazitäten für den Druck eines Auftrags sucht.

Eine weitere Vereinfachung des Problems ist die Modellierung des Angebots an additiven Fertigungskapazitäten, wie sie bekannt sind, während sie in der Praxis unsicher sind. Wenn beide Seiten als unbekannt modelliert werden, erschwert dies die Lösung des Problems. Das Heuristik-Modul bietet auch Verbesserungspotenziale. Bei der Zuweisung von Aufträgen an Drucker berücksichtigt die Heuristik nur deren Kompatibilität in Bezug auf Größe und Material, das Angebot für den Auftrag und den für den Drucker erwarteten Preis. Anschließend ordnet sie den Auftrag der kleinsten, verfügbaren Maschine zu. Dies kann dazu führen, dass einige Aufträge mit hoher Flexibilität aufgrund ihrer hohen Wertdichte recht früh eingeplant werden, obwohl sie späteren Zeitintervallen zugeordnet werden können. Andererseits könnten dann andere Aufträge mit geringerer Flexibilität und früherer Frist abgelehnt werden, da frühe Zeitintervalle bereits durch andere Aufträge belegt sind. Um diese Situationen zu vermeiden und Terminentscheidungen zu verbessern, wäre es sinnvoll, auch die Lastenverteilung zwischen den Druckern und die Flexibilität der Aufträge bei der Entscheidung über die Annahme von Aufträgen zu berücksichtigen. Wir gehen davon aus, dass die Einbeziehung dieser Überlegungen die Ergebnisse des IT-Artefakts weiter verbessern und den Gesamtwert der angenommenen Aufträge erhöhen würde. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Einbeziehung dieser Vorschläge die Übertragbarkeit des Prototyps auf die Praxis verbessern würde.

Bisher zielt das IT-Artefakt nur darauf ab, die gewichtete Anzahl der akzeptierten Aufträge zu maximieren, indem es mehrere Simulationen für jeden eingehenden Auftrag durchführt. Eine mögliche Weiterentwicklung, die die langfristige Performance der Plattform verbessern könnte, ist die Reservierung eines Bruchteils der verfügbaren Kapazität für hochpriorisierte Aufträge (Pibernik & Yadav, 2008). Diese Aufträge können entweder Aufträgen mit einer extrem hohen Wertdichte oder Aufträgen einer Gruppe wichtiger Kunden entsprechen. Daher würde die Plattform in einigen Fällen Aufträge mit geringerer Priorität ablehnen, auch wenn aufgrund der durchgeführten Simulationen Kapazitäten verfügbar wären.

Um Datenschutz- und Vertrauensprobleme zu bewältigen, kann die zukünftige Forschung auch den potenziellen Einsatz von verteilten Ledger-Technologien wie der Blockkette für die Plattform analysieren (Glaser, 2017). So könnte beispielsweise der Matching-Mechanismus als Smart Contract implementiert werden, der die Etablierung, Aufdeckung und Akzeptanz neuer Werteaustauschformate erleichtert. Ebenso könnten Unternehmen den Diebstahl von Spezifikationen für das Design ihrer Produkte befürchten, wenn andere Unternehmen ihre Produkte drucken. Auch hier kann die Blockchain-Technologie Lösungen anbieten, um die Integrität der ausgetauschten 3D-Blaupauseninformationen zu gewährleisten (Engelmann, Holland, Nigischer, & StjepandiĆ, 2018), (Yampolskiy, et al., 2018). Um den Prototyp in die Praxis zu übertragen, müssen einige der stilisierten Annahmen des Modells gelockert werden, was die Komplexität des Problems erhöhen kann. Abgesehen von diesen Designfragen möchten wir betonen, dass eine solche Plattform nicht alle Produktionskapazitäten in handelbare Güter umwandelt. Stattdessen beschränkt sie sich auf additive Fertigungskapazitäten, die die traditionellen Produktionstechnologien ergänzen.

Unsere Forschung hat ein weiteres Beispiel aufgezeigt, bei dem die additive Fertigung von seitenständigen elektronischen Plattformen profitiert, die bestehende Nutzungsszenarien ergänzen. Dieser Befund steht im Einklang mit der Argumentation von Holmstrom (2016), die die Entstehung des 3D-Druck-Ökosystems hervorheben. In Zukunft kann unser Prototyp als Grundlage für zukünftige Forschungsarbeiten dienen, die sich mit den oben genannten Einschränkungen befassen oder die konkrete Umsetzung in einem realen Versorgungsnetz angehen.

Literaturverzeichnis

Anderson, C. (2012). Makers: The new industrial revolution. New York: Crown Business.

Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. Business Horizons, 60, 677-688.

Beil, D. R., & Wein, L. M. (2003). An inverse-optimization-based auction mechanism to support a multiattribute RFQ process. Management Science, 49, 1529-1545.

Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. Business horizons, 55, 155-162.

Bichler, M., Gupta, A., & Ketter, W. (2010). Research commentary—designing smart markets. Information Systems Research, 21, 688-699.

Buxmann, P., & Hinz, O. (2013). Makers. Wirtschaftsinformatik, 55, 361-364.

Carver, L. L., Zamzow, C. E., Mladenoff, D. D., & Lovrien, G. A. (7 1990). Integrated aircraft manufacturing system. Google Patents.

Chang, T.-S. (2009). Decision support for truckload carriers in one-shot combinatorial auctions. Transportation Research Part B: Methodological, 43, 522-541.

Clearwater, S. H. (1996). Market-based control: A paradigm for distributed resource allocation. World Scientific.

Dauer, D., Flath, C. M., Strohle, P., & Weinhardt, C. (2013). Market-based EV Charging Coordination. Proceedings of the Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT), 2013 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on, 2, S. 102-107.

Engelmann, F., Holland, M., Nigischer, C., & StjepandiĆ, J. (2018). Intellectual Property Protection and Licensing of 3D Print with Blockchain Technology. Transdisciplinary Engineering Methods for Social Innovation of Industry 4.0: Proceedings of the 25th ISPE Inc. International Conference on Transdisciplinary Engineering, July 3--6, 2018, 7, S. 103.

Flath, C. M., Friesike, S., Wirth, M., & Thiesse, F. (01. 12 2017). Copy, transform, combine: exploring the remix as a form of innovation. Journal of Information Technology, 32, 306-325.

Friesike, S., Flath, C. M., Wirth, M., & Thiesse, F. (2019). Creativity and productivity in product design for additive manufacturing: Mechanisms and platform outcomes of remixing. Journal of Opeartions Management.

Gassmann, O., Frankenberger, K., & Csik, M. (2014). The business model navigator: 55 models that will revolutionise your business. Pearson UK.

Gawer, A., & Cusumano, M. A. (2014). Industry platforms and ecosystem innovation. Journal of Product Innovation Management, 31, 417-433.

Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2010). Additive manufacturing technologies, 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, Springer. New York Heidelberg Dordrecht London.

Glaser, F. (2017). Pervasive Decentralisation of Digital Infrastructures: A Framework for Blockchain enabled System and Use Case Analysis. Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences.

Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design Science in Information Systems Research. MIS Quarterly, 28.

Holmström, J., Holweg, M., Khajavi, S. H., & Partanen, J. (2016). The direct digital manufacturing (r) evolution: definition of a research agenda. Operations Management Research, 9, 1-10.

Holweg, M. (2015). The limits of 3-D printing. Harvard Business Review.

Holweg, M. (2015). The limits of 3-D printing. Harvard Business Review.

Hosseini, H., Hoey, J., & Cohen, R. (2012). A Market-Based Coordination Mechanism for Resource Planning Under Uncertainty. Proceedings of the Twenty-Sixth AAAI Conference on Artificial Intelligence.

Jordan, W. C., & Graves, S. C. (1995). Principles on the benefits of manufacturing process flexibility. Management Science, 41, 577-594.

Kenney, M., & Zysman, J. (2016). The rise of the platform economy. Issues in Science and Technology, 32, 61.

Khajavi, S. H., Partanen, J., & Holmström, J. (2014). Additive manufacturing in the spare parts supply chain. Computers in industry, 65, 50-63.

Kranton, R. E., & Minehart, D. F. (2001). A theory of buyer-seller networks. American economic review, 91, 485-508.

Ku, W.-Y., & Beck, C. (2016). Mixed Integer Programming models for job shop scheduling: a computational analysis. Computers & Operations Research, 73, 165-173.

Leskelä, R.-L., Teich, J., Wallenius, H., & Wallenius, J. (2007). Decision support for multi-unit combinatorial bundle auctions. Decision Support Systems, 43, 420-434.

Maccarthy, B. L., & Liu, J. (1993). Addressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling. The International Journal of Production Research, 31, 59-79.

Nisan, N., & Ronen, A. (2001). Algorithmic mechanism design. Games and Economic Behavior, 35, 166-196.

Petrick, I. J., & Simpson, T. W. (2013). 3D printing disrupts manufacturing: how economies of one create new rules of competition. Research-Technology Management, 56, 12-16.

Pibernik, R., & Yadav, P. (2008). Dynamic capacity reservation and due date quoting in a make-to-order system. Naval Research Logistics (NRL), 55, 593-611.

Pinedo, M. L. (2016). Scheduling: theory, algorithms, and systems. Cham: Springer.

Puschmann, T., & Alt, R. (2016). Sharing economy. Business & Information Systems Engineering, 58, 93-99.

Rayna, T., Striukova, L., & Darlington, J. (2015). Co-creation and user innovation: The role of online 3D printing platforms. Journal of Engineering and Technology Management, 37, 90-102.

Richard. (2015). The 3-D printing revolution. Harvard Business Review, 93, 40-48.

Sachs, E., Cima, M., & Cornie, J. (1990). Three dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from CAD representation. 1990 International Solid Freeform Fabrication Symposium.

Schlagwein, D., Conboy, K., Feller, J., Leimeister, J. M., & Morgan, L. (2017). ‘‘Openness’’with and without Information Technology: a framework and a brief history. Journal of Information Technology, 32, 297-305.

Senthilkumar, P., & Narayanan, S. (2010). Literature review of single machine scheduling Problem with uniform parallel machines. Intelligent Information Management, 2, 457.

Ströhle, P., Gerding, E. H., Weerdt, M. M., Stein, S., & Robu, V. (2014). Online mechanism design for scheduling non-preemptive jobs under uncertain supply and demand. Proceedings of the 2014 International conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems.

Thiesse, F., Wirth, M., Kemper, H.-G., Moisa, M., Morar, D., Lasi, H., . . . others. (2015). Economic implications of additive manufacturing and the contribution of mis. Business & Information Systems Engineering, 57, 139-148.

Veit, D., Müller, J. P., Schneider, M., & Fiehn, B. (2001). Matchmaking for autonomous agents in electronic marketplaces. Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents, (S. 65-66).

Weinhardt, C., Holtmann, C., & Neumann, D. (2003). Market-engineering. Wirtschaftsinformatik, 45, 635-640.

Weller, C., Kleer, R., & Piller, F. T. (2015). Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. International Journal of Production Economics, 164, 43-56.

Wellman, M. P., Walsh, W. E., Wurman, P. R., & MacKie-Mason, J. K. (2001). Auction protocols for decentralized scheduling. Games and economic behavior, 35, 271-303.

Wirth, M., & Thiesse, F. (2014). Shapeways and the 3D printing revolution. Proceedings of the 22nd European Conference on Information Systems (ECIS 2014).

Yampolskiy, M., King, W. E., Gatlin, J., Belikovetsky, S., Brown, A., Skjellum, A., & Elovici, Y. (2018). Security of Additive Manufacturing: Attack Taxonomy and Survey. Additive Manufacturing.

Konsortialpartner

Projektbeirat: Anwendungs- & Transferpartner

Projektbeirat: Multiplikatoren

Das Projekt “DiHP”

Die Produktionsplanung innerhalb von Unternehmen und über deren Grenzen hinweg wird bereits heute umfassend durch betriebswirtschaftliche Anwendungssysteme unterstützt. Auf Basis eines integrierten Datenbestands, zu bspw. Produktionskapazitäten und der Lieferdauer von Roh- und Betriebsstoffen, können Planungsaktivitäten unter konstanten Rahmenbedingungen problemlos durchgeführt werden. Unvorhergesehene Ereignisse, wie der kurzfristige Ausfall von Maschinen, können jedoch dazu führen, dass Produktionsprozesse in einem Unternehmen zum Stillstand kommen. Waren die negativen Auswirkungen dieser Ereignisse in linearen Wertschöpfungsketten auf wenige Unternehmen begrenzt, führt die zunehmende Vernetzung im Rahmen der Industrie 4.0 zur Herausbildung hochspezialisierter Wertschöpfungsnetzwerke mit weitreichenden Abhängigkeiten in vor- und nachgelagerten Produktionsstufen. Die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Erfüllung von Kundenaufträgen wird infolgedessen signifikant durch andere Unternehmen beeinflusst und führt zu weitreichenden Risiken für den wirtschaftlichen Erfolg von Unternehmen.

Ziel des Verbundvorhabens DiHP ist die Gestaltung und Konzeptionierung einer integrierten Marktplattform zur Glättung von Angebot- und Nachfrageschwankungen durch den automatisierten und überbetrieblichen Handel von Produktionskapazitäten. Auf Basis standardisierter Schnittstellen zu aktueller Informationstechnologie muss die Plattform schnell und einfach in die vorhandene IT-Infrastruktur von KMU integrierbar sein. Durch die initiale Konzentration auf den Bereich der additiven Fertigung sollen die Machbarkeit und der wirtschaftliche Nutzen der Dienstleistung demonstriert werden, um die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf andere Branchen mit Hilfe eines breit aufgestellten Projektkonsortiums zu überprüfen.

Aktuelle Informationen zum Projekt DiHP:

http://projekt-dihp.de

Der Entwurf des Marktplatzes (Stand Juni 2019) wurde durchgeführt von:

Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik und Informationsmanagement
Prof. Dr. Christoph Flath
Josef-Stangl-Platz 2
97070 Würzburg

https://www.wiwi.uni-wuerzburg.de/lehrstuhl/bwl12/

Autoren und Ansprechpartner

Prof. Dr. Christoph Flath

christoph.flath@uni-wuerzburg.de
+49 931 31-85128

Nikolai Stein

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
nikolai.stein@uni-wuerzburg.de
+49 931 31-85119

Adrian Krenzer

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
adrian.krenzer@uni-wuerzburg.de
+49 931 31-84971