

Nachfolgend finden Sie die Übersetzung ins Deutsche des frei verfügbaren Fachartikels:

Original:

**„Ontology-based matchmaking and scheduling
for Manufacturing as a Service“.**

Michael Hertwig^{a,*}, Frauke Schuseil^a, Joachim Lentes^a, Valeria Borodin^b,
Cristian Duran-Mateluna^{b,c}, Alexandre Dolgui^b, Simon Thevenin^b.

Verfügbar unter (Stand 23.6.2025):

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827125005165>

Dies ist eine nicht offizielle deutsche Übersetzung des Originals durch:

Markus Bans

ATS Prozessoptimierung Markus Bans

Web: <https://simio-simulation.de>

Lizenz:

Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

S. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Tagungsband der 58. CIRP Conference on Manufacturing Systems 2025

Ontologiebasiertes Matchmaking und Scheduling für Manufacturing as a Service

Michael Hertwig^{a,*}, Frauke Schuseil^a, Joachim Lentens^a, Valeria Borodin^b, Cristian Duran-Mateluna^{b,c}, Alexandre Dolgui^b, Simon Thevenin^b

^aFraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart, Deutschland ^bIMT Atlantique, LS2N-CNRS, La Chantrerie, 4, rue Alfred Kastler, Nantes cedex 3, F-44307, Frankreich

^cUniversidad Santiago de Chile (USACH), Facultad für Ingenieurwissenschaften, Facultad für Wirtschaftsingenieurwesen, Av. V'ictor Jara 3769, 9170124 Santiago, Chile

Abstrakt

Der Druck, eine resiliente Wertschöpfungskette zu entwickeln, ist derzeit aufgrund einer Vielzahl von Einflüssen und Störfaktoren eine große Herausforderung. Um Resilienz zu erreichen, ist Manufacturing as a Service (MaaS) ein neuer Ansatz mit dem Potenzial, die Reaktionsfähigkeit, Flexibilität und Skalierbarkeit der Fertigungsindustrie zu erhöhen. Die angebotenen Fertigungsdienstleistungen müssen den spezifischen Anforderungen der Unternehmen entsprechen, die sie anfordern. Basierend auf der Analyse des aktuellen Wissensstandes wird ein dreistufiger ontologiebasierter Matchmaking-Ansatz vorgeschlagen, um menschliche Entscheidungsträger bei der Befriedigung von On-Demand-Bedürfnissen durch die Nutzung von gemeinsam genutzten Fertigungsressourcen, die als Dienstleistungen angeboten werden, zu unterstützen. Die Fähigkeit des vorgeschlagenen Ansatzes, MaaS-Benutzer semantisch zu verbinden, wird für einen MaaS-Planungsdienst demonstriert, der die Ausführung einer Reihe von On-Demand-Fertigungsaufträgen durch gemeinsam genutzte Ressourcen koordiniert. Trotz der Einschränkungen, die mit den technischen und organisatorischen Dimensionen der Industriesektoren sowie mit der Komplexität der Dynamik der Lieferkette verbunden sind, werden in diesem Papier mehrere wichtige Hebel für die Ausweitung der Einführung von MaaS diskutiert.

© 2025 Die Autoren. Herausgegeben von Elsevier B.V.

Dies ist ein Open-Access-Artikel unter der CC BY-NC-ND Lizenz (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>)

Peer-Review unter der Verantwortung des wissenschaftlichen Komitees des Internationalen Programmkomitees der 58. CIRP Conference on Manufacturing Systems

Schlüsselwörter: Fertigung als Dienstleistung; Ontologie; Ehealth; Terminplanung als Dienstleistung

1. Einleitung

Hersteller werden zunehmend durch digitale Fähigkeiten (einschließlich IoT, Cloud Computing, Automatisierung und Big Data) ausgestattet, die es ihnen ermöglichen, die Leistung auf Anlagenebene (oder kurz Fab) zu verbessern. Die fortschreitenden industriellen Revolutionen, Industrie 4.0 und Industrie 5.0, verändern die Produktionsumgebungen und die Art und Weise, wie Leistung bewertet wird [3]. Dies allein reicht in unserer Realität, die von komplexen, vielschichtigen Herausforderungen geprägt ist, die als **spröde, ängstliche, nicht-lineare und unverständliche** (BANI¹) Umgebungen als neue Normalität, Nachhaltigkeitsimperative usw. beschrieben werden können, nicht aus. Die Ausweitung der Integration und des kollaborativen Spielraums zwischen den Akteuren der Fertigung wird daher unerlässlich [6]. Neben anderen

Technologien (z. B. Informationstechnologie, interorganisatorische

* Korrespondierender Autor. Tel.: +49 711 970-2288; Fax: +49 711 970-2299.
E-Mail-Adresse: michael.hertwig@iao.fraunhofer.de

2212-8271 © 2025 Die Autoren. Herausgegeben von Elsevier B.V.
B. digitale Produktpässe und Cloud-basierte kollaborative Plattformen) erweist sich Manufacturing as a Service (MaaS) als Wegbereiter, um die Reaktionsfähigkeit, Flexibilität und Skalierbarkeit der Fertigungsindustrie weiter zu verbessern und die Entwicklung widerstandsfähiger, nachhaltiger und zirkulärer industrieller Praktiken zu fördern.

Um die Erschließung des Potenzials von MaaS zu unterstützen, befasst sich dieses Papier mit den folgenden relevanten Fragen von aktueller Bedeutung: (i)

Konzeptperspektive (Abschnitt 2): Was behindert die breite Einführung von MaaS trotz seiner klaren Vorteile und wie kann seine breitere Implementierung unterstützt werden?, (ii) **Wesentliches**: Datenaustausch ist erforderlich, um MaaS zu ermöglichen². Was sind die grundlegenden Merkmale eines ontologiebasierten Matchmakings für MaaS? (siehe Abschnitt 3) Wie kann Matchmaking genutzt werden, um die Interaktion mit anderen nachfolgenden Diensten zu ermöglichen, wie z. B. dem MaaS-Planungsdienst, um die Ausführung einer Reihe von On-Demand-Fertigungsaufträgen durch gemeinsam genutzte Ressourcen effizient zu koordinieren? (siehe Abschnitt 3).

2. MaaS: Definition, Beweggründe, Barrieren

Definition. Manufacturing as a Service (MaaS) hat das Potenzial, Lieferkettenmodelle zu transformieren, von dyadisch zu komplexen und vernetzten, indem Fertigungskapazitäten genutzt werden, um kostengünstige, skalierbare und schnelle Lösungen anzubieten, nicht nur unter normalen Betriebsbedingungen, sondern auch unter ungewöhnlichen Bedingungen, wie z. B. Unterbrechungen in verschiedenen Segmenten der Lieferketten (von der Lieferung bis zum Vertrieb). Die Transformation von der produktionsorientierten Fertigung zur serviceorientierten Fertigung wird durch Cloud Manufacturing ermöglicht [16, 8, 2]. In der einschlägigen Literatur existieren verschiedene Definitionen von MaaS nebeneinander. In diesem Beitrag wird die folgende zusammengesetzte Definition verwendet:

Definition ([17], Europäische Kommission²). *MaaS stellt ein servicebasiertes Fertigungskonzept dar, das durch Cloud-Fertigung ermöglicht und zentral für reaktionsschnelle, flexible und skalierbare Fertigungsbranchen verwaltet wird.*

In einer früheren Arbeit **charakterisierte** [17] die Hauptmerkmale von MaaS wie folgt (leicht erweitert). MaaS kann Fertigungsdienstleistungen sowohl über geografische als auch über logische Grenzen hinweg verteilen. MaaS ist in erster Linie bedarfsorientiert und zeichnet sich durch kurzfristige Zusammenarbeit so oft wie nötig aus. MaaS bietet sowohl einzelne Fertigungsdienstleistungen als auch Kombinationen solcher Dienstleistungen (d. h. Servicepakete) innerhalb und über Branchengrenzen hinweg.

Motivierungen. Die Servitisierung der Fertigung hat in unserer aktuellen BAN|¹-Realität **einen starken Schub bekommen**, da sie in der Lage ist, verschiedene Unterbrechungen entlang der Lieferketten abzumildern, die durch Arbeitskräftemangel, Lieferbeschränkungen oder Ausfälle von Lieferanten verursacht werden [9, 18]. Die Unterbrechungen zeigten die Fragilität der globalen Lieferketten mit Just-in-Time-Ansätzen, da kleinere Verzögerungen später in der Lieferkette zu großen Problemen führen können [12, 10]. Die Schaffung der Möglichkeit, neue, zweckorientierte, stärker regional ausgerichtete Wertschöpfungsnetzwerke zu schaffen, kann die Widerstandsfähigkeit der Lieferketten und die Zirkularität unserer Wirtschaft erhöhen und den Fertigungssektor nachhaltiger machen:

- **Resilienz:** Die wichtigste Art ist die Erhöhung der Resilienz, d. h. die Bewältigung einer Krise. In dieser Studie würde dies die Unterbrechung eines Knotens/Glieds der Lieferkette

bedeuten (Transport der gelieferten Waren/Materialien der Anlage des Lieferanten selbst). MaaS kann angewendet werden, um so schnell wie möglich wiederherzustellen.

- **Kreislaufwirtschaft:** Als wichtiger Akteur in der Kreislaufwirtschaft sind die Hersteller gut aufgestellt, um gemeinsam mit vor- und nachgelagerten Interessengruppen neue zirkuläre Geschäftsmöglichkeiten zu schaffen und zu nutzen. Unterstützt durch Cloud Manufacturing unterstützt der MaaS-Mechanismus die Stakeholder dabei, über ihre Wertschöpfungsketten (Geschäftsmodelle und Wertschöpfung) hinweg gemeinsam zu agieren, um es ihnen zu ermöglichen, sich zu verengen (weniger und effizienter zu nutzen), zu verlangsamen (länger zu nutzen) und zu zyklischen (wieder zu nutzen).
- **Nachhaltige Fertigung: (Wirtschaft, Gesellschaft)** MaaS ermöglicht es Herstellern, die Produktion ohne Kosten je nach Nachfrage nach oben und unten zu skalieren. MaaS kann somit dazu beitragen, die Overall Equipment Efficiency (OEE) zu steigern und qualifiziertes Personal voll auszulasten. Dies impliziert die Generierung von Geschäftsmodellen rund um Fertigungsdienstleistungen, die bedarfsorientiert sind. **(Umwelt)** Eine optimierte Anlagenauslastung führt zu einem besseren Ressourcenverbrauch und weniger Umweltbelastungen.

Über die weit verbreitete Einführung von MaaS. Eines der wichtigsten Unterscheidungsmerkmale von MaaS zur Auftragsfertigung ist der hohe Grad der Digitalisierung/Konnektivität der Stakeholder³. Die Vision einer vernetzten Produktion mit hoher vertikaler Konnektivität und durchgängigem Datenfluss wurde durch die Prinzipien der *Smart Manufacturing* definiert. Trotz der Erwartung einer gesteigerten Produktivität bei gleichzeitiger Flexibilisierung deuten aktuelle Umfragen darauf hin, dass die vollständige Umsetzung dieser Vision nach wie vor schwer zu erreichen ist [5]. Insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen mit einer großen Vielfalt an Produktvarianten geraten bei der Vernetzung von Feldebene (physische Assets) und Managementebene (Fab-weite Steuerung) ins Hintertreffen [1]. Dies deutet darauf hin, dass nicht alle Daten, die in der Produktion und den damit verbundenen internen Prozessen anfallen, in Echtzeit abgerufen und für datengetriebene Services verwendet werden können. Die nahtlose Integration von Manufacturing Services (MfgS) in etablierte Wertschöpfungsketten stellt daher eine große Herausforderung für produzierende Unternehmen dar.

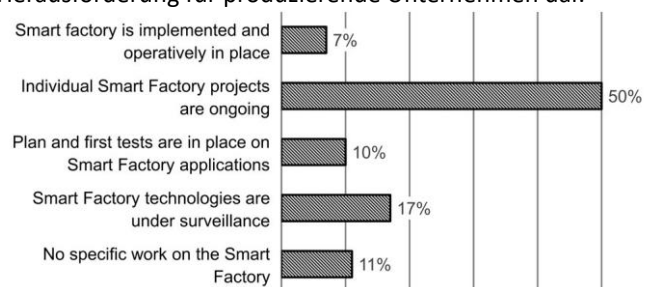


Abb. 1. Grad der Implementierung von Smart Factories in Deutschland auf der Grundlage der Arbeit von Feldmeth [5]

Da Zahlen über den Grad der vertikalen Konnektivität fehlen, kann aus anderen Zahlen ein Hinweis abgeleitet werden. Wie in Abb. 1 Mehr als 40 % der Fertigungsunternehmen verfügen nicht über eine Verbindung zwischen Feldgeräten (Maschinen, Anlagen und Werkzeugen) und Managementsystemen auf Unternehmensebene, die den systembasierten Zugriff auf Daten erleichtern kann. Folglich können heute nur wenige Unternehmen die Vorteile eines umfassenden Datenverarbeitungssystems nutzen, um geeignete Übereinstimmungen zwischen Angebot und Nachfrage im verarbeitenden Gewerbe zu identifizieren. Da der Datenaustausch von entscheidender Bedeutung ist, Unternehmen die Daten jedoch als sensibel einstufen, ist dies eine große Hürde für die Umsetzung.

Auf Supply-Chain-Ebene wurden in den letzten zwei Jahrzehnten in zahlreichen Lieferketten kollaborative Inter-Organizational Information Systems (IOIS) implementiert, um die Integration und Koordination zu verbessern (z. B. SupplyOn⁴). Trotz ihrer potenziellen Vorteile wurde die breite Akzeptanz vor allem durch die geringe Anzahl proaktiver Branchenteilnehmer und die Komplexität der Integration autonomer Geschäftsprozesse begrenzt [6]. Mit einem

freie Kapazität nicht nur auf eine Maschine, die nicht besetzt ist, sondern auch auf den freien Platz auf der Rohblechebene, der durch eine effiziente Verschachtelung der auszuschneidenden Teile behoben werden könnte. **(ii) "Der Teufel steckt im Detail"**: Dieses Beispiel zeigt, dass je nach Prozessschritt und angewandter Technologie zusätzliche Details berücksichtigt werden können. **(iii) Auf dem Weg zur Multi-Instanzierung von MaaS**: Neben Digitalisierung und Konnektivität kann die Fähigkeit, Produktionsressourcen gemeinsam zu nutzen, durch mehrere Hindernisse eingeschränkt werden: langwierige und kostspielige Homologationen/Qualifikationen von industriellen Prozessen (z. B. Luft- und Raumfahrt), manueller Fertigung (z. B. Elektronik) und Anforderungen an die Qualitätskontrolle (z. B. Automobilindustrie) usw. Ein unmittelbarer Schritt in Richtung MaaS wäre der Austausch genauer und zeitnaher Informationen, um es vor- oder nachgelagerten Betreibern, den Anhängern von MaaS, zu ermöglichen, ihre Produktionskapazitäten schnell anzupassen oder qualifizierungsfreie Maschinen zu nutzen/gemeinsam zu nutzen. Auch für diesen ersten Schritt müssen die relevanten Daten automatisch aus den bestehenden

374

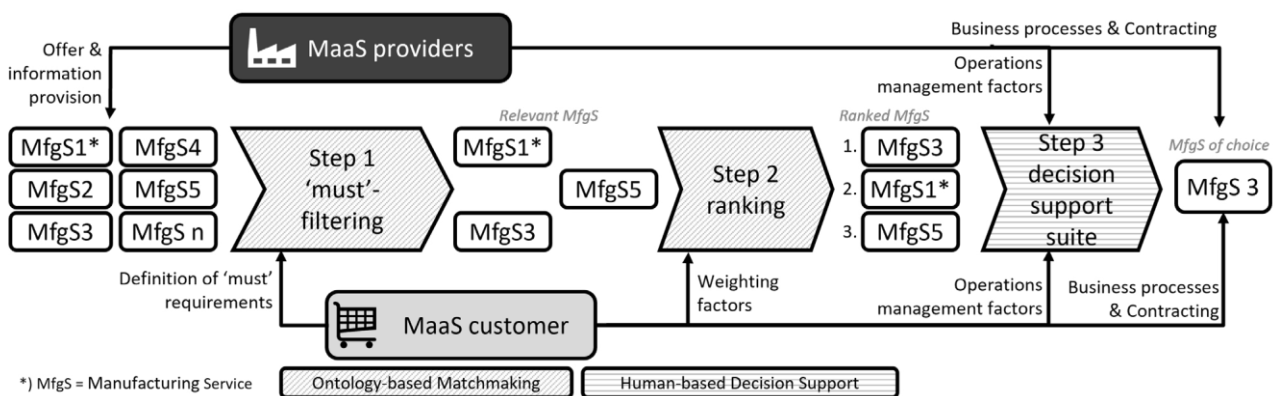


Abb. 2. Schrittweises orchestriertes Matchmaking mit dem Menschen als letztlichem Entscheidungsträger, unterstützt durch eine Decision Support Suite

größeren Anwendungsbereich übernimmt MaaS die notwendigen Bedingungen von IOIS, einschließlich der technischen und organisatorischen Abstimmung zwischen Unternehmen/Branchen und der Orchestrierung der räumlichen und zeitlichen Dynamik verteilter Produktionssysteme.

Strategie zur Minderung von Barrieren für die Einführung von MaaS. In Anbetracht der zuvor diskutierten Fakten ist es unerlässlich, die unterschiedlichen Grade der Konnektivität/Digitalisierung potenzieller Nutzer zu berücksichtigen, um den Ausbau von MaaS zu erleichtern. Wenn Daten jedoch als sensibel eingestuft werden, erschwert dies die notwendigen Transaktionen zwischen den Benutzern und macht es schwierig, nachfolgende Dienste zu ermöglichen. Das tiefe Eintauchen in die verschiedenen Branchen bietet ein neues Verständnis der relevanten Merkmale (siehe z.B. das Casebook des MASTT2024 Projekts³): **(i) Zur Bedeutung semantischer Interoperabilität:** Freie Kapazitäten können je nach Branche oder Technologie unterschiedliche Bedeutungen haben. In der Blechbearbeitung beispielsweise bezieht sich

Informationssystemen des MfgS-Anbieters und Kunden abgeleitet werden. **(iv) Auf dem Weg zum Management von MaaS-Produktionsabläufen:** Herkömmliche Unternehmenssoftware (z. B. Enterprise Resource Planning, Manufacturing Execution Systems), die für traditionelle Fertigungsprozesse entwickelt wurde, verfügt nicht über die Fähigkeit, die Besonderheiten serviceorientierter Fertigungssysteme zu verwalten.

In Abschnitt 3 stellen wir die grundlegenden Datenanforderungen und minimalen Transaktionsdaten vor, die die Etablierung eines effektiven Matching-Systems für MfgS und kollaborative Entscheidungsunterstützung ermöglichen. Einfach zu bedienender Datenaustausch/-überwachung in Echtzeit und die Automatisierung von Prozessen gehören zu den wichtigsten MaaS-Spezifikationen³. Während des Übergangs zu MaaS schlagen wir vor, die Echtzeitspezifikationen zugunsten ereignisbasierter Spezifikationen zu lockern. Wir argumentieren, dass diese Strategie nicht gegen die Definition von MaaS verstößt, solange der relative Vorteil zur Messung und Demonstration der Reaktionsfähigkeit, Skalierbarkeit und Flexibilität von

Fertigungsökosystemen herangezogen wird, wie dies bei der Einführung von IOIS der Fall war [6]. Der Ansatz für die semantische Verbindung von MaaS-Benutzern, um eine bessere Entscheidungsfindung innerhalb kollaborativer Fertigungsnetzwerke zu unterstützen, wird anhand eines MaaS-Planungsdienstes veranschaulicht.

3. MaaS: Vom Matchmaking zu anderen Diensten

Mit dem Aufkommen einer Plattformökonomie wiesen mehrere Interessengruppen in Europa darauf hin, dass große Plattformen in den USA und China die Souveränität der europäischen Industrie beeinträchtigen können [11]. In diesem Sinne wurde Gaia-X⁵, eine europäische Initiative, mit dem Ziel ins Leben gerufen, eine föderierte Dateninfrastruktur zu schaffen, die einen sicheren und souveränen Datenaustausch über Cloud-Dienste hinweg gewährleistet [19]. Die Hauptelemente sind Interoperabilität, Datenportabilität und die Einhaltung europäischer Vorschriften, die die Bereitschaft der Akteure zur Zusammenarbeit fördern. Neben einem klaren Governance-Rahmen liegt der Schwerpunkt auf Transparenz und Sicherheit bei Datentransaktionen, um die digitale Autonomie Europas zu stärken und die Entwicklung einer wettbewerbsfähigen digitalen Wirtschaft voranzutreiben [13].

Ontologiebasierter Matchmaking-Ansatz. Semantische Produktanforderungen und Prozessattribute sind entscheidend für ein genaues und effizientes Matchmaking von Fertigungskapazitäten. Beim Matchmaking-Prozess werden die Produktanforderungen mit den Fähigkeiten der verfügbaren MfgS abgeglichen, um die Kompatibilität und optimale Ressourcenauslastung sicherzustellen.

Ein grundlegendes Merkmal des Ontology-Based Matchmaking (OBMm) ist die Möglichkeit, Must-Anforderungen für die Auswahl von Services zu definieren und diese Anforderungen zumindest in Clustern zu gewichten, so dass die Nutzer je nach Situation bestimmte Anforderungen oder Anforderungscluster wie Nachhaltigkeit oder Resilienz priorisieren können. Folglich verfügt das Ontologiekonzept zur Darstellung von Anforderungen über Attribute, um seine Muss-Eigenschaften und seine Bedeutung für die Entscheidungssituation zu beschreiben, indem es ein Gewicht zuordnet, bei dem es sich um einen scharfen numerischen Wert handelt. In zukünftigen Arbeiten können diese scharfen Werte für die Gewichtung in Richtung einer linguistischen Variablen im Sinne der Fuzzy-Mengen-Theorie oder verwandt weiterentwickelt werden. Darüber hinaus verfügen Anforderungen über ein boolesches Attribut *isNegated*, um logische Nicht-Operationen zu realisieren.

Das OBMm ist in drei Stufen unterteilt, wie in Abb. 2: (i) Die verfügbaren Dienste werden nach den Mindestanforderungen auf der Grundlage ihrer Merkmale gefiltert. (ii) Die übrigen Dienstleistungen werden entsprechend ihrer Erfüllung der Anforderungen zur Unterstützung des Entscheidungsträgers eingestuft. (iii) Der Mensch als Entscheidungsträger wird daher nicht durch den Ansatz für OBMm bevormundet, sondern durch ein Ranking anwendbarer verfügbarer Fertigungsdienstleistungen unterstützt, die er auf der Grundlage seiner Präferenzen bzw. der spezifischen

Entscheidungssituation auswählen kann. Die Decision Support Suite kann verschiedene MaaS-Dienste umfassen, die darauf abzielen, den Ressourcenaustausch aus Sicht des Betriebsmanagements zu ermöglichen, von gleichzeitigen Supply-Chain-Planungsfunktionen (Terminplanung, Produktionsplanung usw.) bis hin zur Koordinationsunterstützung (Preisgestaltung). Zur Veranschaulichung untersuchen wir im nächsten Absatz, wie die Schritte "Must-Filter" und "Ranking" den Planungsdienst unterstützen.

Für das OBMm beziehen sich Anforderungen auf Merkmale von Fertigungsdienstleistungen. Sowohl Anforderungen als auch Eigenschaften sind zwar nicht quantifizierbar, aber es gibt Referenzwerte zum Vergleich. Sind sie quantifizierbar, beziehen sie sich auf eine Größe, die mindestens einen Wert und eine Maßeinheit hat und sich z.B. aus der Ontology for Quantity, Units, Dimension, and Types (QUDT) der National Aeronautics and Space Administration (NASA) ableiten lässt [15]. Alternativ können auch andere Ontologien für Mengen verwendet werden. Wenn Anforderungen und Merkmale nicht quantifizierbar sind, beziehen sie sich auf eine beliebige Instanz einer Ontologiekategorie. Bei quantifizierten Vergleichen können Anforderungen Gleichheit verlangen, können aber auf einer Mindest- oder Höchstbedingung mit eingeschlossenen oder ausgeschlossenen Grenzwerten basieren (so dass sie als Intervalle geschlossen oder geöffnet werden können). Um quantifizierte Anforderungen auf der Grundlage eines Intervalls zu definieren, müssen Benutzer zwei Anforderungen definieren, eine für die minimale und eine für die maximale Bedingung. Nicht quantifizierbare Anforderungen sind erfüllt, wenn das Merkmal eine beliebige Instanz der Ontologiekategorie "hat", die durch den Referenzwert der Anforderung definiert ist.

Fertigungsservice und Ressourcenplanung. Planungsprobleme tauchten in den 1950er Jahren als Entscheidungsproblem auf, das darauf abzielte, die Ausführung von Fertigungsschritten (d. h. Operationen) durch eine Reihe von Ressourcen sicherzustellen und gleichzeitig die Produktions-Key Performance Indicators (KPIs) einer bestimmten Fabrik effizient zu erfüllen [3]. Seitdem hat sich viel Forschung auf dieses Problem konzentriert, da sich Planungsentscheidungen (einschließlich der Zuweisung von Vorgängen an Maschinen, der Abfolge von Vorgängen an Maschinen und des Betriebstimmings) auf die Produktionseffizienz (z. B. Zykluszeit, Durchsatz und pünktliche Lieferung) einfach und kritisch auswirken. Auch wenn Scheduling-Probleme hauptsächlich in zentralisierten Scheduling-Frameworks angegangen wurden, werden Probleme verteilt und hierarchisch (zeitlich und räumlich) organisiert. Angetrieben von physischen Systemen, dem IoT und Cloud Computing, der Automatisierung und Big Data in der Fertigungsindustrie haben die Planungslandschaft enorm vorangetrieben, indem sie die horizontale und vertikale Integration sowie die dezentrale und autonome Planung ermöglicht haben [14]. Dies ermöglicht die Integration hierarchischer Entscheidungsebenen in den Planungsprozess unter Berücksichtigung von Informationen aus der Lieferkette. Die Planung kompletter Fabs ist in der Regel ein hochkomplexes Problem. Global-lokale Planungsansätze

gewinnen an Dynamik. Die globale Planung arbeitet auf einer Fab-weiten Ebene und schreibt Ziele für Werkzeugsätze vor. Die lokale (oder Toolset-) Planung berücksichtigt die laufenden Arbeiten, um die besten aktuellen Dispositionsentscheidungen zu identifizieren [4].

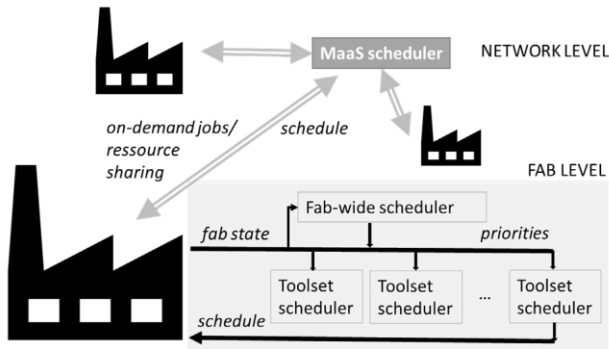


Abb. 3. Vertikale und horizontale Integration von Scheduling-Entscheidungen: Vom Toolset zu MaaS und umgekehrt (Erweiterung von [4])

Die MaaS-Planung kann als eine natürliche Erweiterung der Planung in den Fertigungsbereichen angesehen werden, wie in Abb. 3. Urheberrecht Um verteilte Hersteller bei der gemeinsamen Nutzung und Nutzung von Fertigungsressourcen zu unterstützen, sollten Sie ein MaaS-Framework in Betracht ziehen, das die Planung angeforderter Aufträge auf gemeinsam genutzten, nicht miteinander verknüpften parallelen Maschinen auf zentralisierte Weise verwaltet. Lassen Sie uns in Anlehnung an die Pipeline, die für die Produktionsplanung im Rahmen des SC3-EU-Projekts 6 entwickelt wurde, die minimalen Anforderungen definieren, die von der Ontologie zur Unterstützung von Planungsentscheidungen innerhalb von MaaS erfüllt werden müssen:

- **Datendarstellung für die zentralisierte MaaS-Planung eines verteilten Satzes von Aufträgen auf einem verteilten Satz von Ressourcen:** Sei $j \in J$ ein Satz von On-Demand-Aufträgen, die von den Ressourcenkonsumenten gemeinsam mit einem Fälligkeitsdatum, das durch d_j bezeichnet wird, des Auftrags j angegeben werden. Sei $k \in M$ eine Menge von nicht zusammenhängenden parallel gemeinsam genutzten Maschinen (d. h. Produktionskapazität), die von einer Reihe von MfgS-Anbietern gemeinsam mit einer Reihe verfügbarer Zeitschlitze $A_k = [s_1, e_1], [s_2, e_2]$ vorgeschlagen werden,....

Minimale Stammdaten und Transaktionsdaten für die MaaS-Planung sind in Tabelle 1 aufgeführt. Um die Generierung von Instanzen von Planungsproblemen zu unterstützen, müssen mindestens drei Verknüpfungparameter von OBMm erstellt werden (Schritt 1): (i) Teilmenge von Maschinen M_{ij} , die in der Lage ist, die Operation i des Auftrags j auszuführen, wird von i des Auftrags verarbeitet j . (ii) Die Zeitoperation Maschine k , gekennzeichnet durch pk_{ij} , und (iii) Eignungsbewertung e_{jk} für die Ausführung von Auftrag j auf Ressource k .

- **Automatisierte Generierung von Instanzen von Scheduling-Modellen:** Scheduling-Probleme werden in der Regel formal durch eine konventionelle Drei-Felder-Notation klassifiziert α, β, γ von [7] vorgeschlagen

und von der Planungsgemeinschaft weit verbreitet ist, wobei: α sich auf Erweiterungen bezieht, die neue Arten von Entscheidungen einführen, β sich auf Problemeinschränkungen bezieht γ Kriterien/Kriterien spezifiziert, die optimiert werden sollen.

Um das Modell des MaaS-Planungsproblems zu instanzieren, ist es notwendig: (i) die Spezifikationen der Ressourcenkonsumenten $\langle \alpha_c, \beta_c, \gamma_c \rangle$ und Anbieter $\langle \alpha_p, \beta_p, \gamma_p \rangle$ zu konsolidieren und (ii) γ_p und γ_c so auszurichten, dass die beste γ_{cp} angewendet wird.

Beachten Sie, dass aufgrund der MaaS-Definition der Umfang und die Domäne von MaaS-Leistungskriterien (auf Netzwerkebene) größer sein können als die Vereinigung von Leistungskriterien auf Fab-Ebene:

$$C_{CP} \supseteq C \cup C_P$$

$c \in C, p \in P$ $c \in C$ $S \in P$

Mit der netzwerkweiten Sichtbarkeit branchenübergreifender Fabs, die durch MaaS ermöglicht wird, kann das Set γ_{cp} mehreren Zwecken dienen

$$c \in C, p \in P$$

Nur auf Netzwerkebene erreichbar, einschließlich der Verbesserung der Resilienz/Robustheit (Zeitplanstabilität, Auftragslücken und Maschinenauslastung usw.), der Nachhaltigkeit (Leerlaufzeiten der Maschine, Maschinengeschwindigkeit, Produktion außerhalb der Spitzenzeiten, Nutzungszeittarife usw.) und der Wettbewerbsfähigkeit (OEE, Markteinführungszeit usw.).

- **Automatisierte Generierung von Instanzen für ein gegebenes Scheduling-Problem:** In einem MaaS-Framework können Scheduler in einer rollierenden Umgebung aufgerufen werden. Dies führt zu einer Reihe von Scheduling-Instanzen, die unter Berücksichtigung des aktuellen Zustands von Produktionsumgebungen erstellt werden. Die Struktur einer Scheduling-Instanz muss mit der vorgeschlagenen Ontologie dargestellt werden, die auf der Drei-Feld-Notation von [7] basiert.
- **Darstellung des MaaS-Planungsprozesses:** Die gemeinsame Nutzung von Ressourcen erfolgt zwischen zwei oder mehr Fabs (zusammenhängend oder autonom), was eine Abstimmung der Planungsentscheidungen zwischen allen beteiligten Beteiligten erfordert. Um dieses Problem der gemeinsamen Planung zu lösen, muss MaaS die Synchronisierung von Fertigungsaktivitäten spezifizieren, um die gemeinsame Nutzung von Gewinnen und die

Gestaltung von Partnerschaften innerhalb eines Netzwerks zu unterstützen, an dem mindestens ein MfgS-Anbieter und ein Verbraucher beteiligt sind.

In einer dynamischen Umgebung ist der Planungsprozess selbst eine entscheidende Frage bei einem MaaS-Framework. Lassen Sie uns verschiedene Klassen von Ansätzen unterscheiden [20]: **(i) Proaktive Ansätze:** Alle Jobs und Maschinenverfügbarkeit und die damit verbundenen Parameter sind im Voraus bekannt, entweder in einem deterministischen oder wahrscheinlichkeitsbasierten Format. In der Regel besteht das Ziel dieser Ansätze darin, eine Sequenz zu bestimmen, die die Planungskriterien von Interesse optimiert. **(ii) Vollständig reaktive Ansätze:** Es wird kein Zeitplan im Voraus erstellt. Entscheidungen werden lokal in Echtzeit unter Berücksichtigung der aktuell verfügbaren Arbeitsplätze getroffen. Diese Ansätze basieren in der Regel auf einfachen Richtlinien wie kürzesten Verarbeitungzeiten und frühesten Fälligkeitsterminen. **(iii) Prädiktiv-reaktive Planung:** Unter Berücksichtigung der verfügbaren Informationen wird im Voraus ein Zeitplan erstellt. Wenn der Vorhersagezeitplan aufgrund neuer Ereignisse aktualisiert werden kann, wird der Zeitplan durch reaktive Alternativen geändert.

- **Darstellung von Planungsentscheidungen:** Nachdem eine Instanz eines Planungsmodells gelöst wurde, müssen die zugehörigen Entscheidungen mithilfe der Ontologie dargestellt werden. MaaS-Zeitplanentscheidungen dienen als Input für fab-interne Planungsentscheidungen/Scheduler.

Verbindung von Matchmaking-Planungsdiensten in einem MaaS-Framework. Basierend auf einem serviceorientierten Design ist es notwendig, Schnittstellen zwischen MaaS-Funktionen zu schaffen. Beim Matchmaking werden technische, organisatorische und bestimmte zeitliche Rahmenbedingungen mit den Anforderungen in Einklang gebracht. Die Planung konzentriert sich auf die Optimierung der Zuweisung von Vorgängen an Maschinen, der Abfolge von Vorgängen an Maschinen und der Vorgangszeitplanung. So gibt es gewisse Überschneidungen bei den zu analysierenden Eigenschaften und Merkmalen.

Als verknüpfender zeitbezogener Parameter in einem verteilten System ist die Modellierung von Verarbeitungszeiten von entscheidender Bedeutung. Sie können sein: **(i) Bekannt** aufgrund der Konnektivität von Fabs. Dies ist bei den meisten praktischen Anwendungsfällen der Fall und entspricht einem hohen Maß an Konnektivität und Informationsaustausch. **(ii) Instanciable** by MaaS basierend auf den von den Ressourcenanbietern und Verbrauchern spezifizierten Merkmalen. Dies entspricht einer High/Low-Fab-Konnektivität und einem mittleren Informationsaustausch. **(iii) Unbekannt:** Implizit modelliert für ein geringes Maß an Fab-Konnektivität oder Informationsaustausch. Gehen wir dazu von einem geringen Maß an Konnektivität und einer signifikant geringen Menge an verfügbaren Informationen aus. Die zeitliche Anpassung kann in Schritt 1 des OBMm nur unzureichend optimiert werden (siehe Abb. 2). Um On-Demand-Aufträge j den verfügbaren Ressourcen A_k unter Einhaltung der Fälligkeitstermine j zuzuweisen, kann man die Nettobearbeitungszeiten berücksichtigen. Die Nettobearbeitungszeit kann berechnet werden, indem die Transportzeiten (d. h. die Zeit für den Transport zu/von) von den Bruttobearbeitungszeiten (d. h. die maximal verfügbare Zeit bis zur Lieferung, ohne Überschreitung von Fälligkeitsterminen) abgezogen werden. Die Transportzeiten sollten einen festen Prozentsatz der Bruttobearbeitungszeiten nicht überschreiten.

4. Abschließende Bemerkungen und Perspektiven

Die weit verbreitete Einführung von MaaS wird durch heterogene Informationssysteme und das Fehlen von Rahmenbedingungen behindert, innerhalb derer quantitative Operationen gleichzeitig verwaltet werden können. Daher muss die Verfügbarkeit von Daten sowie die Verbindung der Datenflüsse der verschiedenen Akteure in MaaS-Ökosystemen verbessert werden. Dafür braucht es technische Mittel im Sinne von IT-Netzwerken, sowie eine gemeinsame Sprache für die Kommunikation zwischen den Akteuren. Kommende offene digitale Ökosysteme (z.B. Gaia-X⁵, Catena-X⁷) als IT-Anbindung zwischen Akteuren sind essentiell, um die Anzahl potenzieller Nutzer zu erhöhen. Um dies zu unterstützen, sind Ontologien als "Lingua franca" für die Kommunikation ein vielversprechender Ansatz, um die Interoperabilität zwischen den Akteuren der Lieferkette und sogar zwischen den Industriesektoren zu fördern und somit MaaS tragfähig zu machen. Dieses Papier schlägt einen dreistufigen

Tabelle 1. Minimaler Satz von Stammdaten und Transaktionsdaten für die MaaS-Planung

Verbrauch von Produktionsressourcen $C \in C$	
$JO = \cup_{j \in JO} j$	Satz von Jobs/Satz von Vorgängen, die in einen Satz von Jobs partitioniert sind J
D_j	Fälligkeitsdatum des Auftrags j
V, Chr	Vom Verbraucher auferlegte Zwänge c, γ, c KPIs der Verbraucher c
Produktionsmittelanbieter $p \in P$	
M	Menge der verfügbaren Produktionsressource k
$A_k = [s_1, e_1], [s_2, e_2], \dots$	Satz der verfügbaren Zeitfenster $[s, e]$ der Ressource k
β_p	Einschränkungen, die vom Ressourcenanbieter p auferlegt werden
γ_p	KPIs des Anbieters p
MaaS-Framework	
M_{ij}	Teilmenge der Maschinen, die in der Lage sind, die Operation i des Auftrags j auszuführen
e_{jk}	Eignungsbewertung für das Ausführen von Auftrag j für Ressource k
p_{kij}	Verarbeitungszeit des Vorgangs i des Jobs j auf der Ressource k (Nettoverarbeitungszeit)
Ein	Entscheidungssatz für Ressourcenverbraucher c und Anbieter p
GCP	Maas Optimierung Kriterien beschwichtigend

ontologiebasierten Matchmaking-Ansatz vor und veranschaulicht seine Fähigkeit, MaaS-Benutzer semantisch zu verbinden, um einen Planungsdienst zu unterstützen, der die Ausführung einer Reihe von On-Demand-Fertigungsaufträgen durch eine Reihe von gemeinsam genutzten Ressourcen verwaltet, wodurch die wirtschaftliche Anwendung von MaaS auf der Seite des Dienstleisters sichergestellt wird.

Zukünftige Arbeiten werden sich mit der programmatischen Realisierung von MaaS-Ökosystemen und ihrer quantitativen Begründung im Hinblick auf Ökonomie, Resilienz und Nachhaltigkeit befassen.

Bestätigungen

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Projekts ACCURATE (Achieving Resilience through Manufacturing as a Service, Digital Twins and Ecosystems) durchgeführt, das durch das Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon Europe der Europäischen Union im Rahmen der Finanzhilfvereinbarung Nr. 101138269, HORIZONCL4-2023-TWIN-TRANSITION-01-07, unterstützt wurde. Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind jedoch nur die des Autors/der Autoren und spiegeln nicht unbedingt die Ansichten und Meinungen der Europäischen Union oder der Europäischen Exekutivagentur für Gesundheit und Digitales (HADEA) wider. Weder die Europäische Union noch die Bewilligungsbehörde können für sie verantwortlich gemacht werden.

Notizen

1. Die BANI World, für IRSM 2022: https://www.youtube.com/watch?v=stBdyNBwfpU&ab_channel=JamaisCascio
2. Manufacturing as a Service: Technologien für maßgeschneiderte, flexible und dezentrale Produktion auf Abruf: <https://www.horizon-europe.gouv.fr/manufacturing-service-technologies-customised-flexible-and-decentralised-production-demand-made>
3. Fertigung als Dienstleistung für den doppelten Wandel der EU bis 2040 (MASTT2040): <https://www.mastt2040.eu/>
4. SupplyOn-Plattform: <https://www.supplyon.com>
5. Gaia-X: Eine föderierte sichere Dateninfrastruktur: <https://gaia-x.eu/>
6. Semantisch vernetzte Halbleiter-Lieferketten (SC3): <https://cordis.europa.eu/project/id/101007312>
7. Catena-X: End-to-End, kollaboratives und offenes Daten-Ökosystem für die Automobilindustrie: <https://catena-x.net/>

Referenzen

- [1] Bittighofer, D., Staub, M., Irslinger, A., Liebich, M., Martin, L., 2018. Stand der Industrie 4.0 in deutschen Unternehmen, in: 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), S. 1–8.
- [2] Bulut, S., Wende, M., Wagner, C., Anderl, R., 2021. Auswirkungen von Manufacturing-as-a-Service: Anpassung des Geschäftsmodells für Unternehmen. *Procedia CIRP* 104, 1286–1291.
- [3] Destouet, C., Tlahig, H., Bettayeb, B., Mazari, B., 2023. Problem der flexiblen Job-Shop-Planung in der Industrie 5.0: Eine Umfrage zur Wiedereingliederung von Menschen, zur Umweltverträglichkeit und zur Verbesserung der Resilienz. *Zeitschrift für Fertigungssysteme* 67, 155–173.
- [4] Elaoud, S., Xenos, D., O'Donnell, T., 2023. Bereitstellung eines integrierten Frameworks von fabrikweiten und Toolset-Schedulern zur Verbesserung der Leistung in einer echten Großfabrik, in: 2023 34th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), IEEE. S. 1–6.
- [5] Feldmeth, M., 2023. Deutscher Industrie 4.0 Index 2022. Technischer Bericht. Staufen AG.
- [6] Garcia, F., Grabot, B., Pache, G., 2019. Adoptionsmechanismen eines Lieferantenportals: Eine Fallstudie in der europäischen Luft- und Raumfahrtindustrie. *Computer & Industrial Engineering* 137, 106105.
- [7] Graham, R.L., Lawler, E.L., Lenstra, J.K., Kan, A.R., 1979. Optimierung und Approximation in deterministischer Sequenzierung und Planung: eine Übersicht, in: *Annalen der diskreten Mathematik*. Elsevier. Band 5, S. 287–326.
- [8] Henzel, R., Herzog, G., 2018. Cloud Manufacturing: Ein State-of-the-Art-Überblick über aktuelle Themen. *Verfahren CIRP* 72, 947–952.
- [9] Herold, D.M., Marzantowicz, L., 2023. Reaktionen der Lieferkette auf globale Störungen und ihre Auswirkungen: eine institutionelle Komplexitätsperspektive. *Forschung zum Betriebsmanagement* 16, 2213–2224.
- [10] Iwanow, D., 2024. Transformation der Forschung zur Resilienz von Lieferketten durch die COVID-19-Pandemie. *Internationale Zeitschrift für Produktionsforschung*, 1–22.
- [11] Kenney, M., Zysman, J., 2016. Der Aufstieg der Plattformökonomie. *Fragen im Frühling von Wissenschaft und Technik*, 61–69.
- [12] Melnyk, S.A., Closs, D.J., Griffis, S.E., Zobel, C.W., Macdonald, J.R., 2014. Die Widerstandsfähigkeit der Lieferkette verstehen. *Überprüfung des Lieferkettenmanagements* 14, 34–41.
- [13] Otto, B., Rubina, A., Eitel, A., Teuscher, A., Schleimer, A.M., Lange, C., Stingl, D., Loukipoudis, E., Brost, G., Boge, G., Pettenpohl, H., Langkau, J., Gelhaar, J., Mitani, K., Hupperz, M., Huber, M., Jahnke, Nils und Brandstadter, R., Wessel, S., Bader, S., 2021. GAIA-X und IDS. Technischer Bericht. Internationaler Verband für Datenräume.
- [14] Parente, M., Figueira, G., Amorim, P., Marques, A., 2020. Produktionsplanung im Kontext von Industrie 4.0: Rückblick und Trends. *Internationale Zeitschrift für Produktionsforschung* 58, 5401–5431.
- [15] QUDT 2019, 2019. Überblick über Qudt-Ontologien.
- [16] Ren, L., Zhang, L., Wang, L., Tao, F., Chai, X., 2017. Cloud-Fertigung: Schlüsselmerkmale und Anwendungen. *Internationale Zeitschrift für computerintegrierte Fertigung* 30, 501–515.
- [17] Schuseil, F., Hertwig, M., Lentjes, J., Zimmermann, N., Hölzle, K., 2024. Ein semantischer Matchmaking-Ansatz zur Stärkung der menschlichen Entscheidungsfindung in Manufacturing-as-a-Service-Szenarien [unveröffentlichtes Manuskript, angenommen], in: AHFE International Conference 2024 - Hawaii Edition.
- [18] Shishodia, A., Sharma, R., Rajesh, R., Munim, Z.H., 2023. Resilienz der Lieferkette: Ein Überblick, ein konzeptioneller Rahmen und zukünftige Forschung. *Die Internationale Zeitschrift für Logistikmanagement* 34, 879–908.
- [19] Tanrikulu, C., Gogineni, S., Kondak, K., Lindow, K., 2023. Konzeption und Anforderungsermittlung von Gaia-X-basierten Serviceangeboten, in: *AMCIS 2023*.
- [20] Yang, B., Geunes, J., 2008. Prädiktiv-reaktive Planung für eine einzelne Ressource mit ungewissen zukünftigen Aufträgen. *Europäische Zeitschrift für Betriebsforschung* 189, 1267–1283.

Dies war eine Übersetzung ins Deutsche des
frei verfügbaren Fachartikels:

Original:

**„Ontology-based matchmaking and
scheduling
for Manufacturing as a Service“.**

Michael Hertwig^{a,*}, Frauke Schuseil^a, Joachim
Lentes^a, Valeria Borodin^b,
Cristian Duran-Mateluna^{b,c}, Alexandre Dolgui^b,
Simon Thevenin^b.

Verfügbar unter (Stand 23.6.2025):

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827125005165>

Dies ist eine nicht offizielle deutsche
Übersetzung des Originals durch:

Markus Bans
ATS Prozessoptimierung Markus Bans
Web: <https://simio-simulation.de>

Lizenz:

Creative Commons Namensnennung 4.0
International (CC BY 4.0)

S.
[https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/de
ed.de](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de)