

Produktionsflächen produktbezogen und frühzeitig ermitteln

# Flächenbedarfsschätzung in der Montage

J. Kuthe, V. Aliexsieiev, T. Jansen, J. Fölsch, P. Metzmacher, H. Lödding

**ZUSAMMENFASSUNG** Dynamische Märkte, knappe Flächen und eine zunehmende Automatisierung haben die Bedingungen in der Fabrikplanung gewandelt und die Anwendbarkeit etablierter Methoden reduziert. Gerade in der frühen Phase der Fabrikplanung ist es erforderlich, die Flächenbedarfe auf Grundlage unvollständiger Informationen zuverlässig abzuschätzen. Der Beitrag präsentiert eine Methode zur Flächenbedarfsbestimmung in der Stückgutproduktion und validiert sie am Beispiel der Flugzeugindustrie.

## STICHWÖRTER

Fabrikplanung, Arbeitsorganisation, Maschinenbau

## Product-specific and early-staged determination of production space needs

**ABSTRACT** Dynamic markets, scarce space, and increasing automation reshaped the conditions for factory planning and reduced the applicability of established methods. Especially in the early phase of factory planning, a reliable estimate of space requirements based on incomplete information is necessary. This article presents a method for determining space needs in piece goods production and validates it using the example of aircraft industry.

## 1 Einleitung

Dynamische Märkte und steigender Wettbewerbsdruck treiben die Produktionsunternehmen an, ihre Entwicklungszeiten zu verkürzen und effizienzsteigernde Konzepte wie Simultaneous Engineering einzusetzen [1]. In der Fabrikplanung bestehen dadurch gerade zu Beginn der Planungsphase erhebliche Unsicherheiten [2], welche die Umsetzbarkeit von klassischen Planungsvorgehen, wie der VDI 5200 [3], erheblich erschweren. Es ist folglich die Aufgabe der Fabrikplanung, sich auf diese veränderten Rahmenbedingungen einzustellen. Dazu bedarf es Methoden, die bestehendes Wissen aufgreifen und den Fabrikplanern ein flexibleres Arbeiten ermöglichen.

Dieser Beitrag beschreibt die Motivation, Entwicklung und Validierung einer Methode zur frühzeitigen Bestimmung der Flächenbedarfe einer Fabrik als eine grundlegende Aufgabe der Fabrikplanung am Beispiel der Montage. Das Ziel ist es, eine standardisierte und ausreichend genaue Berechnungsweise zu entwickeln, welche die Vergleichbarkeit von verschiedenen Groblayoutvarianten erhöhen und zu einem schnelleren Planungsprozess beitragen soll.

## 2 Stand der Technik

In der Planung wird die Fabrik meist in die grundlegendsten Prozesskomponenten, die Arbeitsstationen, unterteilt [4]. Die entscheidende Aufgabe in der Vorbereitung der (Grob-)Layoutplanung besteht also darin, den Flächenbedarf der Stationen sinnvoll abzuschätzen. Für diesen Arbeitsschritt bestehen bereits Konzepte, die dieser Abschnitt kurz vorstellt und dann einordnet.

Ausgangspunkt einer Flächenabschätzung ist eine einheitliche Flächengliederung [5]. Dazu können beispielsweise richtlinienbasierte Gliederungen nach VDI 3644 [6] oder DIN 277 [7], aber auch branchenspezifische Ansätze Anwendung finden [5].

Die VDI 3644, welche explizit eine Anwendung in der Layoutplanung vorsieht, unterteilt die gesamte Stationsfläche in vier wesentliche Flächenglieder: Hauptnutzfläche, Nebennutzfläche, Verkehrsfläche und Funktionsfläche. Die Größe dieser einzelnen Flächenglieder kann nach zwei verschiedenen Grundsätzen bestimmt werden. Bei Verwendung des Top-Down-Ansatzes werden „Flächen höherer Ordnung durch Multiplikation mit Verhältniskennzahlen in Flächen niedrigerer Ordnung zerlegt“ [5]. Der Bottom-Up-Ansatz hingegen berechnet Flächen höherer Ordnung auf Basis von Flächengrößen niedrigerer Ordnung. Dies erfolgt meist ebenso durch Multiplikation mit Verhältniskennzahlen [5]. Das Bottom-Up-Prinzip erreicht in der Regel höhere Genauigkeiten, setzt allerdings eine genauere Kenntnis über die verwendeten Betriebsmittel voraus. Nachfolgend werden sechs ausgewählte Top-Down- und Bottom-Up-Ansätze vorgestellt und diskutiert.

### 2.1 Bestimmung durch Vergleich und Schätzung (Top-Down)

Diese Methode sieht eine Anpassung des Flächenbedarfs einer bereits bekannten und vergleichbaren Arbeitsstation vor. Dazu wird der Flächenbedarf mit einem aus Erfahrungswerten bestimmten Korrekturfaktor angepasst (siehe Gleichung 2.1). Diese Berechnungsweise birgt naturgemäß eine hohe Ungenauigkeit und ist nur für eine sehr grobe Bedarfsbestimmung sinnvoll anwendbar [8].

$$A_{AP} = A_{AP, \text{Vergleich}} \cdot f_{Ex, AP} \quad (2.1)$$

$A_{AP}$	: Arbeitsplatzfläche
$A_{AP, \text{Vergleich}}$	: Arbeitsplatzfläche des Vergleichsarbeitsplatzes
$f_{Ex, AP}$	: Aus Erfahrungswerten bestimmter Anpassungsfaktor für die Arbeitsfläche

## 2.2 Summarische Kennzahlenmethode oder Flächenfaktormethode (Top-Down)

Diese Methode sieht, ähnlich wie die zuvor beschriebene Methode durch Schätzung, eine Anpassung einer bestimmten Bezugsfläche, zum Beispiel der Maschinengrundfläche, vor. Diese Anpassung mit einem tabellierten, generischen Anpassungsfaktor (analog zum Zusammenhang in Gleichung 2.1) ergibt den Flächenbedarf zur Nutzung der Bezugsfläche. Durch Summieren wird der gesamte Flächenbedarf bestimmt. Die Genauigkeit dieser Methode hängt stark von den zur Verfügung gestellten Kennzahlen beziehungsweise Faktoren ab [8, 9]. Daher finden sich in der Literatur widersprüchliche Angaben zu ihrer Genauigkeit [5, 8].

## 2.3 Bestimmung mittels Zuschlagfaktoren (Top-Down)

Ausgehend von der Maschinengrundfläche beziehungsweise den Grundflächen aller Ausrüstungsgegenstände einer Station („ausrüstungsabhängiger Flächenbedarf“) werden durch Zuschlagfaktoren Flächenbedarfe etwa für Bedienung oder Transport („organisationsabhängiger Flächenbedarf“) berücksichtigt [5]. So können in dieses Verfahren durch Wahl der Zuschlagfaktoren „bestehende Vorstellungen zur Werkstattgestaltung“ eingebracht werden [5]. Allerdings geht dies mit einem erheblichen Aufwand zur tatsächlichen Bestimmung der Faktoren einher [8].

## 2.4 Funktionale Flächenermittlung (Top-Down)

Die Funktionale Flächenermittlung nach *Nestler* (zitiert nach [10]) basiert auf statistischen Analysen von Werkstattflächen in Unternehmen des klassischen Maschinenbaus und ist daher auch nur auf diese direkt anwendbar. *Nestler* gliedert die Gesamtfläche in Fertigungs-, Zwischenlagerungs-, Transport- und Zusatzflächen. Nach dieser Methode ist der Gesamtflächenbedarf der Werkstatt doppelt so hoch wie die eigentliche Fertigungsfläche (Summe aller Arbeits- und Maschinenplätze).

## 2.5 Ersatzflächenmethode (Bottom-Up)

Diese Methode geht davon aus, dass zur Nutzung einer Maschine ein Raum um sie herum benötigt wird. So wird, ausgehend von der Maschinengrundfläche, an „jeder Objektseite (...) ein Flächenstreifen“ [5] platziert. Es entsteht ein grober Flächenbedarf für einen Arbeitsplatz [11], der jedoch besonders in Hinblick auf Transportflächen mit Unsicherheiten besetzt ist [5]. Zur Verbesserung der Abschätzung lässt sich die Größe der Flächenstreifen arbeitsplatzspezifisch anpassen. Zudem können Effekte durch die Art und Weise der Anordnung von mehreren Arbeitsplätzen berücksichtigt werden [5, 9]. Dieses Verfahren wird meist nur zur Berechnung einzelner Arbeitsplätze für eine Person verwendet.

## 2.6 Bestimmung mittels Probelayout (Bottom-Up)

In diesem Verfahren wird zunächst, meist über die Kennzahlenmethode, der Flächenbedarf der gesamten Anlage überschlägig bestimmt. Daraufhin werden alle zu platzierende Objekte im Rahmen eines Probelayouts günstig angeordnet und so eine sehr genaue Aussage über die benötigte Fläche erreicht [5]. Allerdings wird hierzu detaillierte Kenntnis über nahezu alle Ausrüstungsbestandteile der Fabrik vorausgesetzt.

Aktuell existieren neben den analytischen Ansätzen einige komplexere Ansätze, die mit einer Vielzahl verschiedener Eingangsgrößen eine optimale Gestaltung eines industriellen Systems ermöglichen (zum Beispiel [12]). Die Konfiguration dieser Ansätze vor der ersten Nutzung ist aber sehr aufwendig. Sie stehen daher nicht im Vordergrund dieses Beitrags.

Die oben beschriebenen Verfahren lassen sich in Methoden mit tabellierten Faktoren (Flächenfaktormethode, Funktionale Flächenbestimmung), Methoden mit eigens bestimmten Faktoren (Zuschlagfaktoren) und die Ersatzflächenmethode grob unterteilen. Diese Verfahren erlauben im klassischen Maschinenbau zwar eine genaue Abschätzung der Flächenbedarfe, beschränken sich jedoch primär auf die Werkstattfertigung. Für andere Fertigungsprinzipien wie die Fließfertigung konnten in der Literatur keine allgemein gültigen Verfahren gefunden werden. Auch ist ihre Anwendung auf Produkte mit spezifischen Herausforderungen in der Fertigung, wie etwa der Flugzeugproduktion, stark limitiert.

Vor allem Methoden, die tabellierte Faktoren nutzen, werden durch ihre Ausgangsdaten limitiert. In der Regel berücksichtigen diese Faktoren nur eine klassische Werkstattfertigung und sind somit für andere Anwendungen nicht zielführend anwendbar. Auch wenn andere Verfahren mit eigens zu bestimmenden Faktoren eine individuelle Anpassung an das vorliegende Fertigungskonzept vorsehen, so ist die genaue Bestimmung der Flächenfaktoren abstrakt und in der Praxis mit erheblichem Zeitaufwand verbunden. In der Flugzeugproduktion etwa besteht in dieser Hinsicht eine weitere Problematik: Durch die während der Montage stark variierende Produktgröße, von vergleichsweise kleinen Einzelbauteilen über einzelne Rumpfssegmente hin zum vollständig montierten Flugzeug, sowie der Varianz bei den Fertigungskonzepten müsste zur sinnvollen Anwendung einer faktorbasiereten Berechnungsmethode eine Vielzahl verschiedener Faktoren für die unterschiedlichen Produktionsphasen bestimmt werden. Der damit verbundene Aufwand ist praktisch nicht zu rechtfertigen.

In der praktischen Anwendung faktorbasierter Berechnungsmethoden tritt eine weitere Problematik zu Tage: Durch ihre Funktionsweise, die ausgehend von der Maschinengrundfläche und einem zu bestimmenden, aber konstanten Faktor auf die Grundfläche schließt, liefern derartige Ansätze bei stark variierenden Maschinengrundflächen keine zuverlässigen Ergebnisse, da sie Bedienflächen für kleine Anlagen unter- und für große Anlagen überschätzen. Die Methodik der Flächenbedarfsbestimmung durch Probelayout verspricht zwar eine Lösung der zuvor genannten Probleme, setzt allerdings voraus, dass die Fabrikausrüstung inklusive ihrer Maße bekannt ist. Solch detaillierte Informationen liegen aber erst spät im Planungsprozess vor, sodass diese Methode gerade in frühen Projektständen nicht anwendbar ist.

Die in diesem Beitrag entwickelte Methode soll der Abdeckung der oben beschriebenen Forschungslücke dienen und für

verschiedene Produktionsprinzipien und (Produkt-)Anforderungen abseits des klassischen Maschinenbaus nutzbar sein. Auch soll sie auf eine große Spanne von Produktdimensionen anwendbar sein und nur eine geringe Anzahl an Eingangsgrößen benötigen, um einen Einsatz in der frühen Planungsphase zu ermöglichen. Außerdem soll die Methode transparent und nachvollziehbar neben dem absoluten Flächenbedarf auch die Flächenkonfiguration (Seitenlängen der Station) in hinreichender Genauigkeit für die Anwendung in der Groblayoutplanung zur Verfügung stellen. Die in diesem Beitrag entwickelte Methode geht hierzu von einigen Annahmen aus, die im Folgenden beschrieben werden.

Meistens werden die Fabriken für „artverwandte Produkte“ geplant [13]. Es ist also davon auszugehen, dass unternehmensseitig bereits grundlegende Erfahrung mit der Produktklasse besteht sowie auf ein ausgeprägtes Verständnis der Produktbesonderheiten in der Montage zurückgegriffen werden kann. Es ist den Fabrikplanern somit zuzutrauen, eine generisch formulierte Methodik an ausgewiesenen Stellen an die Bedürfnisse und Gegebenheiten der hauseigenen Produktion anzupassen. Angenommen wird hierbei, dass grundsätzliche, konzeptionelle Entscheidungen des Produktionskonzeptes bereits getroffen wurden. Außerdem berücksichtigt diese Methode nur die Produktion von Stückgütern, in welcher die Produktmaße die Stationsgröße maßgeblich treiben.

### 3 Konzept

Dieses Kapitel beschreibt zunächst konzeptionelle Überlegungen, die der entwickelten Berechnungsmethodik zugrunde liegen (Kapitel 3.1). Anschließend wird die Berechnungsmethodik vorgestellt (Kapitel 3.2).

#### 3.1 Grundlegende Überlegungen

Wie zuvor beschrieben, lässt sich der tatsächliche Flächenbedarf einer Produktionsanlage nicht durch allgemeine Faktoren bestimmen, wie es ein Top-Down-Ansatz eigentlich vorsieht. Vielmehr setzt er sich aus der Summe aller benötigten Teilflächen zusammen. Das naheliegendste Vorgehen zur Bedarfsbestimmung wäre folglich die kleinteilige Summe aller benötigten Teilflächen im Rahmen eines Probelayouts – mit anderen Worten eine klassische Bottom-Up-Vorgehensweise. Ein solches Vorgehen lässt sich aber nicht in das nach dem Aachener Modell [13] zu präferierende Top-Down-Vorgehen einbinden, da sich die Ansätze in ihrem Vorgehen sowie in der Fülle der benötigten Informationen diametral gegenüberstehen. Bestehende Modelle zur Flächenabschätzung, welche mit einem grundsätzlichen Top-Down-Ansatz im Projekt kompatibel wären, sind jedoch, wie beschrieben, in ihrer Anwendbarkeit stark beschränkt.

Durch diese Problematik motiviert ergibt sich der Wunsch, in einer neuen Methode die Agilität eines Top-Down-Ansatzes mit der hohen Genauigkeit eines Bottom-Up-Ansatzes zu vereinen. Eine große Herausforderung besteht darin, ein insgesamt konsistentes Verfahren zu entwickeln, in welchem sich diese beiden grundsätzlich konträren Ansätze nicht gegenseitig behindern. Die zentrale Frage ist also, auf welche wesentlichen Eingangsgrößen unabhängig vom Projektstand, auch schon in sehr frühen Projektphasen, für die Flächenabschätzung zurückgegriffen werden kann.

Diese Größen lassen sich durch das Nachvollziehen des üblichen Fabrikplanungsprozesses identifizieren. Der Projektstart

markiert die unternehmerische Entscheidung, die Produktion eines bestimmten Produktes zu erweitern oder erstmals aufzubauen. Das herzustellende Produkt steht also von Anbeginn der Planung im Mittelpunkt und ist hinsichtlich der wesentlichen Produktmerkmale definiert. Auch wenn sich die Detailgestaltung des Produktes im Entwicklungsprozess noch ändern mag, so werden die Produktabmessungen üblicherweise sehr früh festgelegt. Da die Produktionsfläche wesentlich vom Produkt abhängt [2], können die Produktabmessungen als zentrale Eingangsgröße für die Flächenabschätzung herangezogen werden. Dieser produktbezogene Ansatz verspricht eine frühe und ausreichend genaue Abschätzung der Flächenbedarfe, da die zentrale Kenngröße von Beginn an feststeht. Dies erlaubt eine weitgehende Parallelisierung von Produktentwicklung und Fabrikplanung und reduziert damit die Zeit bis zur Markteinführung.

Je nach Art und Beschaffenheit des Produktes lassen sich die einzelnen Arbeitsstationen in Kategorien unterteilen, die sich hinsichtlich der durchgeführten Arbeiten, in den räumlichen Anforderungen oder in anderen Parametern voneinander abgrenzen. Innerhalb einer Kategorie sind in der Regel hohe Ähnlichkeiten zwischen einzelnen Stationen vorzufinden, sodass sich Erfahrungswerte zur kategoriespezifischen Stationsgestaltung in eine heuristische Berechnungsmethode einbinden lassen. Die genaue Abgrenzung der einzelnen Kategorien ist dabei stark von konzeptionellen Entscheidungen des Planers abhängig.

Mithilfe der gefundenen Analogien lassen sich die Stationsmaße über eine produktbezogene Methodik schnell und genau berechnen, nachdem die bestehenden Erfahrungswerte einmalig in die Methodik eingefügt wurden. Die tatsächlich benötigte Hallenfläche ist dann durch die Erstellung und den anschließenden Vergleich von verschiedenen Groblayoutvarianten bestimmbar. Durch eine solche Vorgehensweise wird die Erstellung eines gesonderten Probelayouts mit hohem Detailgrad für die Flächenbestimmung vermieden und die Effizienz im Planungsprozess weiter gesteigert.

#### 3.2 Schalenmodell

Die Fläche einer Arbeitsstation besteht, wie beschrieben, aus verschiedensten Subflächen. Dazu zählen neben dem Produkt auch die Flächen für Ausrüstungsgegenstände, Bewegungs- und Arbeitsflächen für Mitarbeiter der Produktion, Anlieferungsflächen und Fluchtwege [4, 6]. Durch logische Überlegungen, gesetzliche Vorschriften und die Anwendung der Prinzipien der Lean Production ist in der Praxis eine gewisse Anordnung dieser Flächen vorgegeben. Diese Anordnung wird sodann abstrahiert und für eine Flächenabschätzung nutzbar gemacht. Die Flächengliederung nach VDI 3644 sowie die bereits eingeführte Ersatzflächenmethode (siehe Kapitel 2) bilden die Grundlage des resultierenden Schalenmodells [14] (vergleiche unten Bild 2).

Das Schalenmodell besteht neben der Produktschale aus fünf weiteren Schalen: Arbeitsschale, Vorbereitungsschale, Transportschale, Unterstützungsschale und Pufferschale. Die in **Bild 1** dargestellte generische Flächenstruktur lässt sich grundsätzlich auf alle Arbeitsstationen einer Stückgutproduktion anwenden, unabhängig von Prozessschritt oder Produktgröße.

Die zentrale Rolle des Produktes in der Station ermöglicht es, die Flächenstruktur in einem Schalenmodell zu beschreiben, das den klassischen Bottom-Up-Ansatz systematisiert und den grundsätzlichen Aufbau einer Arbeitsstation parametrisiert. Die Schalen

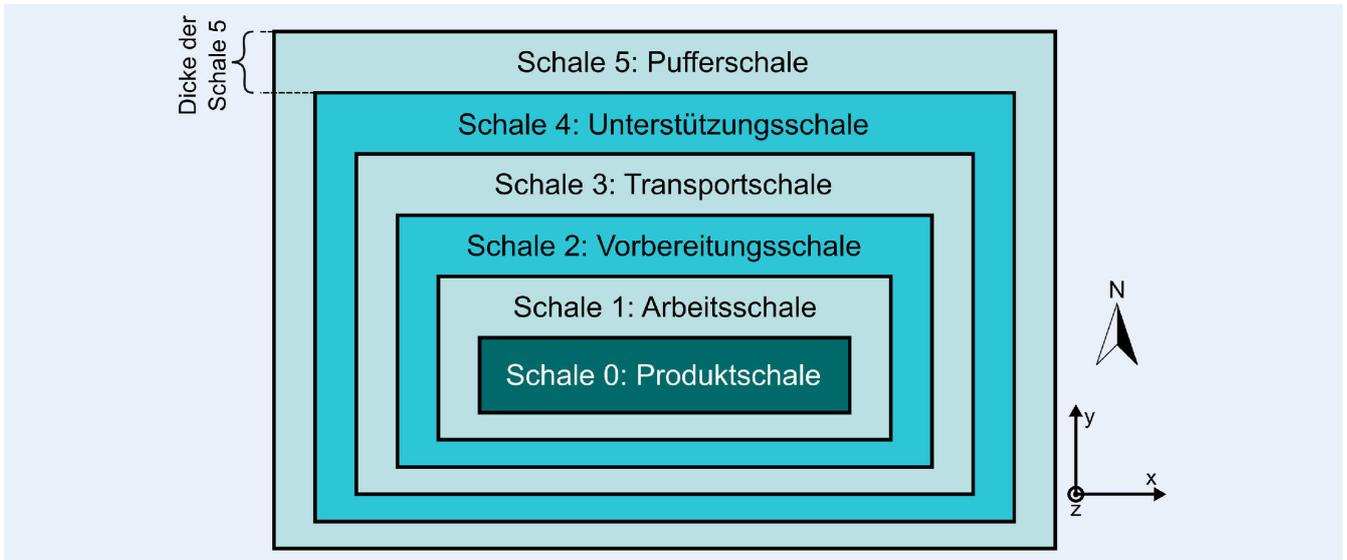


Bild 1. Schalenmodell zur Flächenbedarfsschätzung einer Arbeitsstation. Grafik: In Anlehnung an [14]

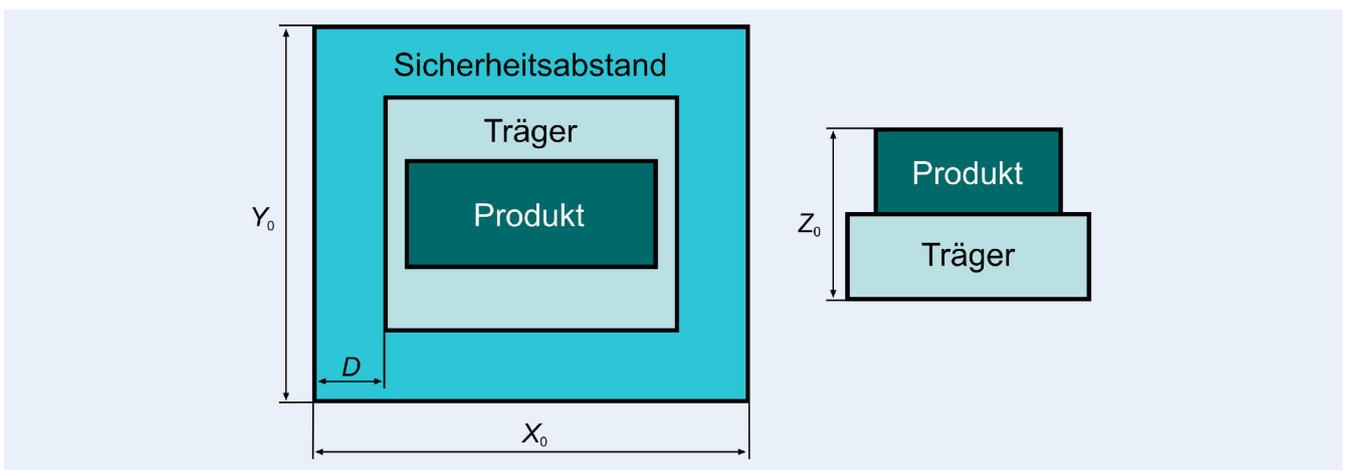


Bild 2. Produktschale im Schalenmodell. Grafik: In Anlehnung an [14]

werden dabei nur an den Seiten des Produkts generiert, an denen sie tatsächlich benötigt werden. Innerhalb der Methode werden daher Variablen vorgesehen, die Auskunft darüber geben, ob eine gewisse Schale an der entsprechenden Seite benötigt wird. Zur vereinfachten Beschreibung wird dazu eine stationsinterne Kompassnotation verwendet (vergleiche Bild 1). Die entsprechenden Wahrheitswerte für die einzelnen Seiten der Station (N, E, S, W) lassen sich entweder völlig frei wählen oder, im Rahmen eines heuristischen Ansatzes, an individuelle Konzepte binden. Es gilt für die Wahrheitswerte:

$$N_k \in \{\text{wahr, falsch}\} \quad (3.1)$$

$N_k$  : Anwendbarkeit der k-ten Schale im Norden

Um Laufwege der Belegschaft zu reduzieren, kann beispielsweise festgelegt werden, dass Elemente der Schale 2 immer genau an den Seiten platziert werden, an welchen auch direkte Arbeit am Produkt verrichtet werden soll. Daraus ergibt sich als zusätzliche Randbedingung exemplarisch für eine Seite:

$$N_2 = N_1 \quad (3.2)$$

$N_1$  : Arbeitsdurchführung im Norden  
 $N_2$  : Platzierung von Schale 2 im Norden

Die Definition der Randbedingungen erlaubt es in der einmaligen Konfiguration der Methode, produktionskonzeptionelle Entscheidungen zu berücksichtigen und den Anwendungsaufwand zu reduzieren. Der genaue Aufbau und die Dimensionierung der einzelnen Schalen wird im Folgenden schalenweise erläutert.

### 3.2.1 Produktschale (Schale 0)

Die Produktschale (Schale 0) berücksichtigt den Flächenbedarf, der sich direkt aus dem Produkt ergibt (Bild 2).

Weil sich während des Aufenthalts in der Station die Abmaße des Produkts ändern können, ist das maximale Abmaß bestimmend für die Größe der Schale 0. Sollte die Maschinengröße maßgeblich für die Stationsgestaltung sein (wie zum Beispiel eine Drehbank oder ein Bestückungsautomat), soll die Methode an die

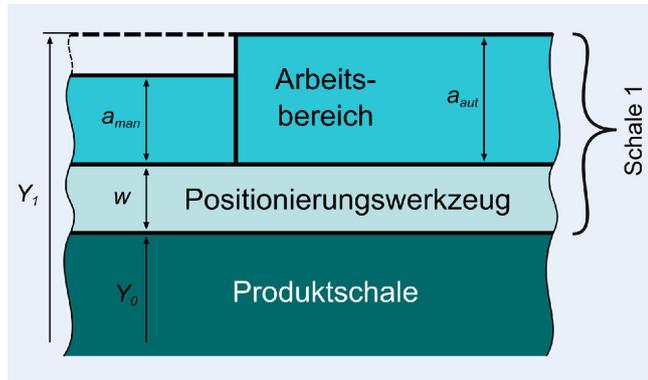


Bild 3. Arbeitsschale. Grafik: In Anlehnung an [14]

Maschinenmaße anstatt der Produktmaße angepasst und um zusätzliche Einflussgrößen ergänzt werden.

Darüber hinaus werden Werkstücke mitunter auf einem Werkstückträger fixiert, der seinerseits auf das Produkt aufbauen kann und die eingenommene Fläche erhöht. In der Praxis liegt das Produkt meist auf dem Träger auf, sodass in x- beziehungsweise y-Richtung die maximalen Abmaße des Trägers für das Produktmaß bestimmend sind. In z-Richtung jedoch erhöht der Träger den Raumbedarf zusätzlich, sodass hier ein spezifischer Wert addiert werden muss (siehe Bild 2). Die Bestimmung der Höhe der Station erfolgt lediglich als Hilfsgröße für die weitere Bedarfsbestimmung. Die tatsächlich benötigte Stationshöhe wird durch diese Methode nicht berechnet.

Schließlich muss noch der (Takt-)Prozess berücksichtigt werden, mit welchem das Produkt in die Station befördert wird. Je nach Verfahren sind unterschiedliche Sicherheitsabstände oder verfahrensbedingte Aufschläge zu berücksichtigen. Da sich unter Umständen die Verfahren des Ein- und Austaktungsprozesses unterscheiden, ist das Verfahren mit dem maximalen Aufschlag bestimmend.

Die Maße für die Produktschale ergeben sich in x- beziehungsweise analog in y-Richtung zu:

$$X_0 = \max(P_{x, in}, P_{x, out}, t_{x, in}, t_{x, out}) + 2 \cdot \max(D_{x, in}, D_{x, out}) \quad (3.3)$$

- $X_0$  : Maß der nullten Schale in x-Richtung
- $P_{x, in}$  : Produktmaß in x-Richtung bei Stationseintritt
- $P_{x, out}$  : Produktmaß in x-Richtung bei Verlassen der Station
- $t_{x, in}$  : Trägermaß in x-Richtung bei Stationseintritt
- $t_{x, out}$  : Trägermaß in x-Richtung bei Verlassen der Station
- $D_{x, in}$  : Sicherheitsabstand des Eintaktprozesses
- $D_{x, out}$  : Sicherheitsabstand des Austaktprozesses

Die Höhe lässt sich als Hilfsgröße analog zu Gleichung 3.3 berechnen.

### 3.2.2 Arbeitsschale (Schale 1)

Die Arbeitsschale umfasst die Fläche, die zur direkten Arbeit am Produkt benötigt wird und direkt an dieses angrenzt. Dies kann der Arbeitsbereich eines Werkers oder einer Automatisierungslösung sein. Zusätzlich kann noch ein Aufschlag für ein eventuell benötigtes Positionierungswerkzeug benötigt werden.

Um diesen Bedarfen Rechnung zu tragen, wird ein Flächenstreifen entsprechender Breite an all jenen Seiten des Produkts platziert (Bild 3), welche für den Prozess innerhalb der Station eine äußere Zugänglichkeit benötigen.

$$a_{man, N} = \begin{cases} a_{man} + w, & \text{falls } N_{1, man} \\ 0, & \text{ansonsten} \end{cases} \quad (3.4)$$

- $a_{man, N}$  : Maß des manuellen Arbeitsbereichs und des Positionierungswerkzeugs im Norden
- $a_{man}$  : Maß des manuellen Arbeitsbereichs
- $w$  : Maß des Positionierungswerkzeugs
- $N_{1, man}$  : manuelle Arbeitsdurchführung im Norden

$$a_{aut, N} = \begin{cases} a_{aut} + w, & \text{falls } N_{1, aut} \\ 0, & \text{ansonsten} \end{cases} \quad (3.5)$$

- $a_{aut, N}$  : Maß des automatisierten Arbeitsbereichs und des Positionierungswerkzeugs im Norden
- $a_{aut}$  : Maß des automatisierten Arbeitsbereichs
- $w$  : Maß des Positionierungswerkzeugs
- $N_{1, aut}$  : automatisierte Arbeitsdurchführung im Norden

Das Maß der Arbeitsschale in X-Richtung im Süden berechnet sich zu:

$$X_1 = X_0 + \max(a_{man, N}, a_{aut, N}) + \max(a_{man, S}, a_{aut, S}) \quad (3.6)$$

- $X_1$  : Maß der ersten Schale in x-Richtung
- $X_0$  : Maß der nullten Schale in x-Richtung
- $a_{man, N}$  : Maß des manuellen Arbeitsbereichs und des Positionierungswerkzeugs im Norden
- $a_{aut, N}$  : Maß des automatisierten Arbeitsbereichs und des Positionierungswerkzeugs im Norden
- $a_{man, S}$  : Maß des manuellen Arbeitsbereichs und des Positionierungswerkzeugs im Süden
- $a_{aut, S}$  : Maß des automatisierten Arbeitsbereichs und des Positionierungswerkzeugs im Süden

Das Maß des menschlichen Arbeitsbereichs kann anhand ergonomischer Richtlinien wie DIN EN 547 [15] oder betriebsinterner Richtlinien bestimmt werden. Für Automatisierungslösungen und Positionierungswerkzeuge sind aber keine pauschalen Annahmen möglich. Jedoch besteht in jedem Betrieb ein gewisses Bestreben nach Standardisierung der verwendeten Lösungen, sodass davon ausgegangen wird, dass sich die einzelnen Lösungen wiederum kategorisieren lassen und so für die einzelnen Kategorien grob abgeschätzt werden können.

### 3.2.3 Vorbereitungsschale (Schale 2)

Flächenbedarfe, die durch indirekte Arbeiten am Produkt sowie zur Ermöglichung direkter Arbeiten nötig sind, werden in der Vorbereitungsschale (Schale 2) berücksichtigt (Bild 4).

Die in der ersten Schale berücksichtigten direkten Arbeitsschritte am Produkt werden erst durch andere, nicht direkt wertschöpfende Arbeiten ermöglicht. Für diese muss ebenfalls Raum vorgesehen werden. Im Falle einer modernen, flussorientierten Fertigung müssen beispielsweise folgende Elemente vorgesehen werden:

- Materialanlieferungslager,
- Verbrauchsmateriallager,
- Werkzeuglager,
- Werkbänke und
- eventuell Treppenflächen, um den Zugang zu höher gelegenen Teilen des Produktes zu ermöglichen.

Bei der Flächenberechnung ist zu beachten, dass es sich bei jedem dieser Elemente um einen eigenen Arbeitsplatz innerhalb der Station handelt, der seinerseits ergonomischen Standards genügen muss. Es ist also nicht ausreichend, lediglich die korrekte Menge an Fläche vorzusehen, vielmehr können die Formen dieser einzelnen Arbeitsplätze nicht verändert werden und sind bestimmend für die minimale Dicke der Schale 2. Die minimale Schalendicke wird entsprechend von dem Element festgelegt, das inklusive Arbeitsbereich die größte Länge senkrecht zur Schalengrenze (bestimmendes Maß  $b$ ) hat (siehe Bild 4 und Gleichung 3.7).

$$b_{\max} = \max(b_{\text{Element A}}, b_{\text{Element B}}, \dots) \quad (3.7)$$

$b_{\max}$  : maximales bestimmendes Maß  
 $b_{\text{Element A}}$  : bestimmendes Maß des Elements A

Das bestimmende Maß des Elements A berechnet sich wie folgt (vergleiche auch Bild 3):

$$b_{\text{Element A}} = y_{\text{Element A}} + a_{\text{Element A}} \quad (3.8)$$

$b_{\text{Element A}}$  : bestimmendes Maß des Elements A  
 $y_{\text{Element A}}$  : Maß des Elements senkrecht zur Schalenoberfläche  
 $a_{\text{Element A}}$  : Maß des Arbeitsbereichs an dem Element

Die tatsächlich benötigte Fläche an den verschiedenen Seiten der Station setzt sich aus den einzelnen Ausrüstungselementen zusammen. Eine Grundannahme der folgenden Bedarfsberechnung liegt darin, dass die Anzahl der tatsächlich benötigten Ausrüstungselemente und nicht ein reiner Flächenbedarf berechnet wird.

Da die Elemente der Vorbereitungsschale oft zentral für die gesamte Fertigung beschafft werden, sind die Standardmaße der Elemente schon zu Planungsbeginn bekannt. Die zentrale Frage ist demnach, wie viele Elemente welcher Art auf welcher Seite der Station platziert werden müssen. Durch die vorangegangene Kategorisierung der Stationen kann ein spezifischer Bedarf für jede Stationskategorie pro Mitarbeiter und Seite bestimmt werden, der gegebenenfalls je nach der Arbeitsvarianz anzupassen ist.

Schließlich ist zu entscheiden, an welchen Seiten der Station die Elemente platziert werden sollen. Es können beispielsweise alle Elemente zentral an einer Seite platziert werden, alternativ an verschiedenen Seiten. Die genaue Konzeptgestaltung und ihre Auswirkungen auf die entsprechenden Wahrheitswerte der Schale 2 müssen von Fabrikplanern im Rahmen der Konfiguration festgelegt werden.

Entsprechend ergibt sich der Ablauf der Berechnung zu:

$$A_{\text{Element A}} = b_{\text{Element A}} \cdot l_{\text{Element A}} \quad (3.9)$$

$A_{\text{Element A}}$  : Flächenmaß des Elements A  
 $b_{\text{Element A}}$  : bestimmendes Maß des Elements A  
 $l_{\text{Element A}}$  : Maß des Elements parallel zur Schalenoberfläche

$$A_{2,N} = \left( \sum_k n_{\text{Element k}} \cdot A_{\text{Element k}} \right) \cdot \begin{cases} 1, & N_2 = \text{wahr} \\ 0, & \text{ansonsten} \end{cases} \quad (3.10)$$

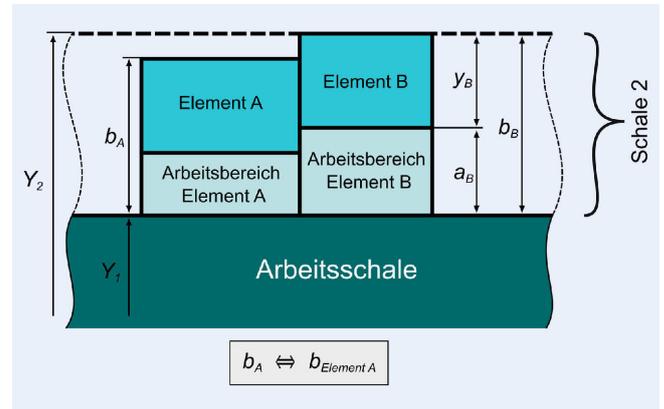


Bild 4. Vorbereitungsschale. Grafik: In Anlehnung an [14]

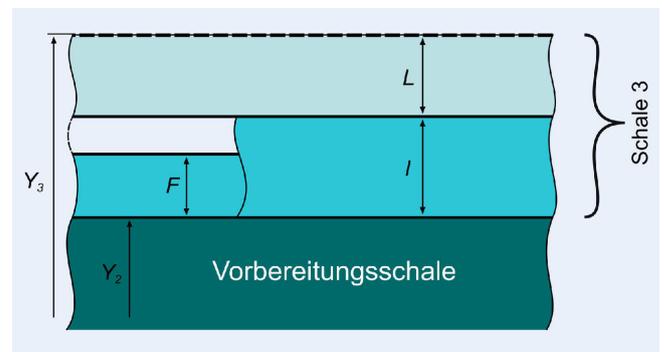


Bild 5. Transportschale. Grafik: In Anlehnung an [14]

- $A_{2,N}$  : Fläche der Ausrüstungselemente der zweiten Schale im Norden
- $A_{\text{Element k}}$  : Flächenbedarf des Elements k
- $n_{\text{Element k}}$  : Anzahl der benötigten Elemente k
- $N_2$  : Platzierung der Elemente der zweiten Schale im Norden
- $k$  : Summenindex

Durch Anpassung der Seitenvariablen lassen sich analog die Flächenbedarfe der anderen Seiten berechnen.

### 3.2.4 Transportschale (Schale 3)

Die Transportschale umfasst die Flächenbedarfe von Transport- und Fluchtwegen (Bild 5).

Grundsätzlich müssen von jedem Ort, an dem sich Mitarbeiter aufhalten können, Fluchtwege ins Freie oder in einen gesicherten Bereich führen [16]. Zur Gewährleistung möglichst kurzer Fluchtwege ist es ratsam, sie an jeder Seite einer Arbeitsstation vorzusehen. Die erforderliche Breite ergibt sich aus der Anzahl der Personen an der Station nach ASR A2.3 [16].

Die Vorbereitungsschale berücksichtigt bereits Flächen für Auslieferungslager. Der benötigte Anlieferweg sollte sich nicht mit den Arbeits- und Vorbereitungsschalen überschneiden. Es wird daher an jeder Seite, an der Arbeit am Produkt verrichtet wird oder Elemente der Vorbereitungsschale platziert werden, ein separater Transportweg vorgesehen.

Abhängig von dem gewählten Verfahren für den Materialtransport dürfen sich Transport- und Fluchtwege überschneiden, beispielsweise bei unstetiger Anlieferung mittels Gitterwagen. Bei

automatisierter, stetiger Anlieferung, etwa durch ein Förderbandsystem, ist eine Überschneidung unzulässig. Die Breiten der Transportwege (I; L) ergeben sich entsprechend durch die Wahl des Transportmittels.

### 3.2.5 Unterstützungsschale (Schale 4)

Zusätzlicher Flächenbedarf für unterstützende, administrative Tätigkeiten innerhalb der Station wird in der Unterstützungsschale eingerechnet (Bild 6).

Neben den bereits modellierten Flächen besteht ein weiterer Flächenbedarf für administrative Tätigkeiten, die direkt mit der Arbeit in der Station verknüpft sind. Dazu zählen beispielsweise Arbeitsplätze zur Dokumentation erledigter Arbeiten oder Besprechungsbereiche für die Schichtübergabe (stark ausgeprägt in der Flugzeugproduktion), die bei entsprechender Planungsentscheidung innerhalb der Stationen vorgesehen werden können. Nicht berücksichtigt werden dagegen Büroflächen zur Produktionsunterstützung und Sozialflächen.

Derartige Dokumentations- und Besprechungsflächen sind in der Praxis sehr flexibel zu gestalten, sodass zur Modellierung die Berücksichtigung der eingenommenen Fläche genügt. Weil die Materialschale oft nicht vollständig belegt ist, können die entstehenden Freiflächen für die Unterstützungsschale genutzt werden.

### 3.2.6 Pufferschale (Schale 5)

Für die bauliche Umsetzung der Station muss ein weiterer Flächenbedarf vorgesehen werden (Bild 7).

Bei mehrgeschossigen Arbeitsstationen müssen beispielsweise Geländer zur Absturzsicherung vorgesehen werden [16]. Zudem entfällt Fläche auf die eigentliche Struktur der Arbeitsstation, wie etwa für Träger von Arbeitsplattformen. Zur Berücksichtigung dieser Einflüsse wird vereinfachend eine pauschale Schalendicke angesetzt, welche bei mehrgeschossigen Stationen auf allen Seiten gleich angesetzt wird. Da die Pufferschale die äußerste Schale darstellt, entsprechen die Maße der fünften Schale schließlich den Gesamtmaßen der Station. Das Maß der fünften Schale in x-Richtung ergibt sich folglich aus der Gleichung 3.11:

$$X_5 = X_4 + \begin{cases} 2 * s, & Z_1 > G \\ 0, & Z_1 \leq G \end{cases} \quad (3.11)$$

- $X_5$  : Maß der fünften Schale in x-Richtung
- $X_4$  : Maß der vierten Schale in x-Richtung
- $s$  : pauschale Pufferschalendicke
- $Z_1$  : Maß der ersten Schale in z-Richtung
- $G$  : Geschosshöhe

Die pauschale Dicke der Schale ist aus den Erfahrungen des Planers zu bestimmen. In besonderen Fällen wäre es auch denkbar, von einer pauschalen Schalendicke abzuweichen und diese von individuellen Parametern (zum Beispiel Produktionskonzept) abhängig zu machen.

## 4 Evaluation

Zur Überprüfung der entwickelten Methode im Flugzeugbau wurde diese gemäß den Anforderungen in der heutigen Flugzeugproduktion konfiguriert. Zunächst wurden dazu die wesentlichen Planungsentscheidungen wie Taktkonzept, Produktionsschritt

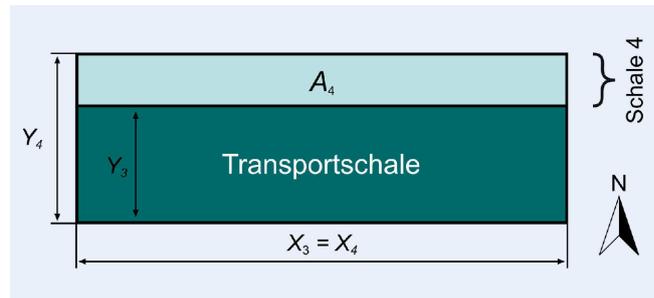


Bild 6. Unterstützungsschale. Grafik: In Anlehnung an [14]

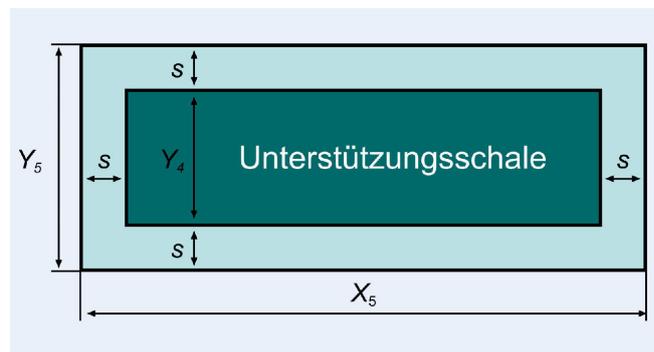


Bild 7. Pufferschale. Grafik: In Anlehnung an [14]

und -konzept identifiziert. Auch wurden organisatorisch bedingte Pufferlager zur Entkopplung der Arbeitsvorgänge als separate Stationen ohne Arbeitsflächen berücksichtigt. Anhand der darauf basierenden Kategorisierung wurden anschließend entsprechende Werte für die Berechnungsparameter gewählt. Entscheidet sich der Planer beispielsweise für eine Taktung mittels Krans, so wirkt sich diese Entscheidung nur auf die Abstandsparameter innerhalb der Arbeitsschale aus. Wird jedoch das gesamte Produktionskonzept, beispielsweise von einer kontinuierlichen Fließfertigung auf eine Baustellenfertigung umgestellt, wirkt sich diese Entscheidung auf zahlreiche Parameter in verschiedenen Schalen aus. Nachdem solche Zusammenhänge einmalig identifiziert, definiert und quantifiziert wurden, konnten diese in eine digitale Implementierung der Methodik eingepflegt und die korrekte Wahl der Parameter anhand weniger wesentlicher Einflussgrößen automatisiert werden. Dem Planer ist es so möglich, nach der einmaligen ausführlichen Konfiguration der Methode in kurzer Zeit Flächenabschätzungen durchzuführen.

Zur Validierung der Genauigkeit der Methode wurden anhand der gewählten Eingangsgrößen verschiedener Stationen drei grundlegend verschiedene Produktionslinien in den Airbus-Werken in Hamburg und Stade nachberechnet und mit den realen Maßen verglichen (Tabelle). Der Flächenbedarf einer Station wurde dabei durchschnittlich mit einer Abweichung von circa 5 % berechnet. Einzelne Stationen weichen zwar stark von diesem Wert ab, jedoch können diese Abweichungen durch notwendige Kompromisse in der tatsächlichen Stationsgestaltung begründet werden. Die Eignung der Methode zur Flächenabschätzung in der Groblayoutgestaltung wird nicht beeinträchtigt.

Für zwei Standorte (Sektionsmontage Hamburg und Strukturmontage Hamburg) wurde zudem die Summe der berechneten Stationsflächen mit der Summe der tatsächlichen Stationsflächen verglichen. Für beide in Hamburg betrachteten Linien beträgt die Abweichung insgesamt lediglich -1,1 %.

**Tabelle.** Evaluationsergebnisse anhand von drei Airbus-Standorten (in Anlehnung an [14]).

Standort	Durchschnittliche Abweichungen		
	Stationsfläche	x-Maß	y-Maß
Sektionsmontage Hamburg	4%	6%	-1%
Strukturmontage Hamburg	-2%	-5%	3%
Leitwerks-Ausrüstungsmontage Stade	5%	-5%	11%

Zusammenfassend kann mit der Methode also sinnvoll und mit angemessener Genauigkeit eine Flächenbedarfsabschätzung auf Stationsebene durchgeführt werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Eine frühzeitige und präzise Schätzung der Produktionsflächenbedarfe ist von hoher Bedeutung für die wirtschaftliche Fabrikplanung. Die durchgeführte Literaturanalyse ergab, dass die bestehenden Ansätze den aktuellen industriellen Anforderungen nicht vollständig gerecht werden. Basierend auf bestehenden Ansätzen und den aufgedeckten Forschungslücken entwickelte dieser Beitrag eine neue Methodik, um den Flächenbedarf in der Produktion mit vergleichsweise geringem Bedarf an Eingangsparametern abzuschätzen. Der geringe Bedarf an Eingangsparametern ermöglicht die Anwendung der Methode bereits in den frühen Fabrikplanungsphasen. Der transparente und strukturelle Aufbau der Berechnungsmethodik begünstigt zudem eine Automatisierung des Gestaltungs- und Planungsprozesses.

Die Berechnungsgüte wurde anhand des Fallbeispiels der Flugzeugproduktion an drei Standorten evaluiert. Die Evaluation zeigt nur vergleichsweise geringe Abweichungen von realen Messwerten.

Es ist jedoch anzumerken, dass die Methodik nur zu einer groben Abschätzung des Bedarfs an Stationsflächen im Kontext der Groblayoutplanung eingesetzt werden kann. In der Feinplanung ergibt sich durch den Planungsprozess eine Nachschärfung der Berechnungsgüte. Die entwickelte Methodik fokussiert sich zudem primär auf die Flächenbedarfsberechnung für Produktionslinien, welche auf die (Klein-)Serienfertigung eines Produktes oder einer Familie eng verwandter Produkte ausgerichtet sind. Es existiert darüber hinaus jedoch eine Vielzahl von Ansätzen von modularen oder dynamischen Produktionsstrukturen (vergleiche [17, 18]), die mit der entwickelten Methodik nicht berücksichtigt werden können. Somit stellt ihre Erweiterung auf andere Produktionskonzepte eine spannende Richtung für weitere Forschungen dar.

### Literatur

- [1] Syska, A.: Produktionsmanagement. Wiesbaden: Gabler Verlag 2006
- [2] Rieke, L.; Cevirgen, C.; Gloy, A. et al.: Procedure Model for Dimensioning and Investment Cost Calculation in an Early Factory Planning Phase. Hannover : publish-Ing 2022
- [3] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 5200: 2011-02 – Fabrikplanung. 2011
- [4] Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. München: Hanser Verlag 2014
- [5] Grundig, C.-G.: Fabrikplanung. Planungssystematik – Methoden – Anwendungen. München: Hanser Verlag 2018
- [6] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 3644: 2010-08: Analyse und Planung von Betriebsflächen – Grundlagen. Anwendungen und Beispiele. 2010
- [7] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 277: 2021-08: Grundflächen und Rauminhalte im Hochbau. 2021
- [8] Helbing, K. W.: Handbuch Fabrikprojektierung. Ber Heidelberg: Springer 2018
- [9] Rockstroh, W.: Die technologische Betriebsprojektierung. Berlin: Verlag Technik 1982
- [10] Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München: Hanser Verlag 1984
- [11] Auberger, E.: Brownfield layout planning for production of large-scale machinery. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2018
- [12] Schirrmann, A.; Zizkin, A.: Modellbasierter Entwurf eines Produktionssystems im Flugzeugbau. In: Fritzsche, R.; Winter, S.; Lohmer, J. (Hrsg.): Logistik in Wissenschaft und Praxis. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2021, S. 109-128
- [13] Burggräf, P.; Schuh, G.: Fabrikplanung. Heidelberg: Springer 2021
- [14] Kuthe, J.: Ein teilautomatisiertes Vorgehen zur Grobplanung von Produktionslayouts. Bachelorarbeit, Technische Universität Hamburg, 2023
- [15] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 547: 2009-01: Sicherheit von Maschinen: Körpermaße des Menschen. 2009
- [16] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Ausschuss: ASR A2.3: Technische Regeln für Arbeitsstätten: Fluchtwege und Notausgänge. Stand: 2022. Internet: [www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A2-3.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A2-3.pdf?__blob=publicationFile). Zugriff am 18.06.2024
- [17] Zenker, M.: Planung zeitdynamischer Layouts für XXL-Produkte. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 110 (2015) 10, pp. 608-611. doi.org/10.3139/104.111413
- [18] Wenzel, A.; Nyhuis, P.; Nabizada, H. et al.: Neue Produktionsstrukturen für die Flugzeugfertigung der Zukunft. Stand: 2022. Internet: [https://openhsu.ub.hsu-hh.de/bitstream/10.24405/14551/1/openHSU\\_14551.pdf](https://openhsu.ub.hsu-hh.de/bitstream/10.24405/14551/1/openHSU_14551.pdf). Zugriff am 18.06.2024

### DANKSAGUNG

Besonderer Dank gilt der Airbus Operations GmbH sowie ihren Mitarbeitenden für das Ermöglichen dieses Beitrags sowie die fortwährende Unterstützung während der Methodenentwicklung.



**Jona Kuthe, B. Sc.** 

*Foto: Autor*

**Volodymyr Aliexsieiev, M.Sc.** 

**Tim Jansen, M.Sc.** 

**Prof. Dr.-Ing. Hermann  
Lödding**

Technische Universität Hamburg  
Institut für Produktionsmanagement und -technik  
Tel. +49 40 / 42878-3233  
Denickestr. 17, 21073 Hamburg  
ipmt@tuhh.de  
www.tuhh.de/ipmt

**Paul Metzmacher**

Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg  
Berliner Tor 5, 20099 Hamburg

**Jannek Fölsch, M. Sc.**

**Jona Kuthe, B. Sc.**

**Paul Metzmacher**

AIRBUS Operations GmbH  
Kreetslag 10, 21129 Hamburg  
www.airbus.com

LIZENZ



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