

Master-Thesis

Anforderungsdefinition zur Anwendung von APS-Systemen in der industriellen Produktion



Bearbeiter: Danlei Wu
Matr. Nr.: 2476289
Betreuer: Leonie Meldt, M.Sc | Prof.Dr.-Ing. J.Metternich
Abgabe: Darmstadt, den 21.05.2025

Veröffentlicht unter CC-BY 4.0 International
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22 Abs. 7 APB der TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Danlei Wu, die vorliegende Master-Thesis ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

In der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und elektronische Fassung überein.

(Ort, Datum)

(Unterschrift)

Stichwörter: Softwareengineering, Produktionsplanung und -steuerung, Defizit

Die zunehmende Komplexität industrieller Produktionsumgebungen und die schwankende Nachfrage im Kontext von Industrie 4.0 fördern den Einsatz von Advanced Planning and Scheduling (APS)-Systemen. Trotz ihres Potenzials bleiben viele Implementierungen in der Praxis hinter den Erwartungen zurück, was häufig auf Defizite in ihrer Ausgestaltung zurückzuführen ist. Ziel dieser Arbeit ist es, diese Diskrepanz zu verringern, indem zentrale Anforderungen an APS-Systeme systematisch identifiziert, strukturiert und standardisiert werden. Dazu wird ein Überblick über die Themenfelder Produktion in der Industrie 4.0, Produktionsplanung und -steuerung (PPS) sowie den aktuellen Stand der APS-Systeme gegeben. Auf Basis einer systematischen Literaturrecherche (SLR) werden bestehende Defizite analysiert und in einen Anforderungskatalog überführt, der sich an der internationalen Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 orientiert. Ergänzend erfolgt eine Bewertung bestehender Lösungsansätze aus der Literatur hinsichtlich ihrer Eignung zur Erfüllung dieser Anforderungen. Der zentrale Beitrag dieser Arbeit liegt in der Erstellung eines strukturierten Anforderungskatalogs, der als Grundlage für die gezielte Anwendung und Weiterentwicklung von APS-Systemen dient.

Keywords: Software engineering, Production planning and control, Deficiency

The increasing complexity of industrial production environments and the fluctuating demand in the context of Industry 4.0 are driving the adoption of Advanced Planning and Scheduling (APS) systems. Despite their potential, many implementations fall short of expectations in practice, often due to deficiencies in their design. This thesis aims to reduce this discrepancy by systematically identifying, structuring, and standardizing key requirements for APS systems. To this end, an overview is provided of the topics Industry 4.0, production planning and control (PPC), and the current state of APS systems. Based on a systematic literature review (SLR), existing deficiencies are analyzed and translated into a requirements catalog aligned with the international standard ISO/IEC/IEEE 29148:2018. In addition, selected solution approaches from the literature are evaluated in terms of their ability to meet these requirements. The core contribution of this thesis lies in the development of a structured requirements catalog that serves as a foundation for the targeted application and further development of APS systems.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22 Abs. 7 APB der TU Darmstadt..... | i |
| Kurzfassung / Abstract..... | ii |
| Inhaltsverzeichnis..... | iii |
| Abbildungsverzeichnis | vi |
| Tabellenverzeichnis | vii |
| Abkürzungsverzeichnis | viii |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation..... | 1 |
| 1.2 Forschungsziele | 2 |
| 1.3 Struktur der Arbeit | 2 |
| 2 Theoretische Grundlage | 3 |
| 2.1 Produktion in der Industrie 4.0..... | 3 |
| 2.2 Von der Automatisierung zur intelligenten Vernetzung..... | 3 |
| 2.3 Herausforderungen | 5 |
| 2.4 Produktionsplanung und -steuerung (PPS) | 6 |
| 2.4.1 Zielkonflikte der PPS..... | 6 |
| 2.4.2 Einsatzbereiche von PPS-Werkzeugen | 7 |
| 2.4.3 Historische Entwicklungsstufen der PPS | 8 |
| 2.5 Advanced Planning and Scheduling (APS)-System | 11 |
| 2.5.1 Definition der APS-Systeme..... | 11 |
| 2.5.2 Hauptcharakteristiken der APS-Systeme..... | 13 |
| 2.6 Stand der Technik von APS-Systemen in der industriellen Produktion | 14 |
| 2.6.1 Softwaremodule der APS-Systeme..... | 14 |
| 2.6.2 Hierarchische Planung in den APS-Systemen..... | 18 |
| 2.6.3 Kollaborative Planung..... | 20 |
| 2.6.4 Anwendungsbereiche und Markttrend der APS-Systeme..... | 22 |
| 2.7 Definition des Anforderungskatalogs..... | 23 |
| 2.7.1 Abgrenzung zur Anforderungsdefinition | 24 |
| 2.7.2 Kontextabgrenzung von Anforderungen | 24 |
| 2.7.3 Formulierung von Anforderungen..... | 25 |
| 3 Methodendefinition der systematische Literaturrecherche..... | 27 |
| 3.1 Begründung der systematischen Literaturrecherche | 27 |
| 3.2 Definition der Forschungsfrage..... | 27 |
| 3.3 Suchbegriffe | 28 |
| 3.3.1 Akronyme | 28 |
| 3.3.2 Synonyme | 28 |
| 3.3.3 Verknüpfungen..... | 29 |
| 3.4 Datenbanken | 30 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.5 | Suchkriterien | 30 |
| 3.6 | Zitatsuche | 31 |
| 3.7 | PRISMA-Flussdiagramm | 31 |
| 3.7.1 | Suche | 32 |
| 3.7.2 | Screening | 33 |
| 3.7.3 | Bewertung | 33 |
| 3.7.4 | Qualitative Synthese..... | 34 |
| 4 | Durchführung der systematischen Literaturrecherche | 36 |
| 4.1 | Datenbanksuche..... | 36 |
| 4.2 | Zitatsuche | 36 |
| 4.2.1 | Zitatsuche rückwärts | 36 |
| 4.2.2 | Zitatsuche vorwärts | 36 |
| 4.3 | Bewertung | 37 |
| 4.4 | Qualitative Synthese | 38 |
| 5 | Anforderungskatalog | 39 |
| 5.1 | Funktionale Anforderungen | 39 |
| 5.1.1 | Robuste Planung gegenüber Unsicherheiten und Störungen | 40 |
| 5.1.2 | Multiobjektivoptimierung | 44 |
| 5.1.3 | Integration und Koordination in der hierarchischen Planung..... | 44 |
| 5.1.4 | Unterstützung kollaborativer SC-Planung | 45 |
| 5.1.5 | Koordination der Ressourcen | 46 |
| 5.1.6 | Synchronisation auf Shopfloor-Ebene | 47 |
| 5.1.7 | Berücksichtigung komplexer Produktionsrestriktionen | 48 |
| 5.2 | Rechenzeiten | 49 |
| 5.3 | Schnittstellenanforderungen | 49 |
| 5.4 | Datenanforderungen..... | 51 |
| 5.4.1 | Standardisierte Datenstrukturen und Normenunterstützung | 52 |
| 5.4.2 | Datenqualitätsprüfung und Validierung | 52 |
| 5.4.3 | Echtzeitdatenintegration aus der Produktion | 53 |
| 5.4.4 | Erweiterte Asset-Beschreibung für digitale Zwillinge (DT)..... | 53 |
| 5.5 | Anforderung an Systemsicherheit und Datenschutz | 54 |
| 5.6 | Anforderungen an die Mensch-System-Integration | 54 |
| 5.6.1 | Allgemeine Unterstützung..... | 54 |
| 5.6.2 | Menschliche Mitwirkung bei Unsicherheiten..... | 55 |
| 5.7 | Benutzbarkeitsanforderungen | 56 |
| 5.8 | Adaptierbarkeitsanforderungen | 56 |
| 5.9 | Wirtschaftlichkeitsanforderung | 58 |
| 5.10 | Anforderung an gesetzliche und betriebliche Transportrestriktionen | 58 |
| 5.11 | Anforderungen an die Lebenszyklusunterstützung | 59 |
| 5.12 | Verifizierbarkeit..... | 60 |
| 6 | Bewertung der Lösungsansätze | 61 |
| 6.1 | Cloud-basierte APS-Lösungen | 61 |
| 6.2 | APS-Lösungen für kollaborative Planung | 62 |



| | | |
|----------|--|-----------|
| 6.3 | Datengetriebene Lösungsansätze | 63 |
| 6.4 | CPS-basierte APS-Lösungen..... | 64 |
| 6.5 | Ansätze zur Bewertung der Datenqualität..... | 65 |
| 6.6 | Entscheidungsunterstützungstools | 66 |
| 6.7 | Algorithmische und simulationsgestützte Erweiterungen..... | 66 |
| 6.8 | Architekturübergreifende Integrationsansätze | 67 |
| 6.9 | Weitere spezialisierte Lösungsansätze | 68 |
| 7 | Schlussfolgerung | 70 |
| 8 | Literaturverzeichnis | 72 |
| | Anhang..... | 83 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 2-1: Zusammenhang der logistischen Zielgrößen..... | 7 |
| Abbildung 2-2: Historische Entwicklungsschritte des PPS-Laufs..... | 9 |
| Abbildung 2-3: APS-Module in der SC..... | 15 |
| Abbildung 2-4: APS-Module für verschiedene Industriebranchen | 17 |
| Abbildung 2-5: Integrationsarchitektur verschiedener APS-Systeme..... | 21 |
| Abbildung 2-6: APS-Systeme auf dem Anbietermarkt..... | 23 |
| Abbildung 2-7: Definition des Systemkontexts von APS-Softwaresystem..... | 25 |
| Abbildung 3-1: PRISMA-Flussdiagramm..... | 32 |
| Abbildung 4-1: PRISMA-Flussdiagramm mit Anzahl identifizierter Literatur..... | 37 |



Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Übersicht über die Hauptkategorien des Anforderungskatalogs39

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------|---|
| AA | Adaptierbarkeitsanforderung |
| AG | Aktiengesellschaft |
| ANSI | American National Standards Institute |
| API | Application Programming Interface |
| APO | Advanced Planning and Optimization |
| APS | Advanced Planning and Scheduling |
| | Advanced Planning System |
| ATP | Available-to-Promise |
| BA | Benutzbarkeitsanforderung |
| CP | Constraint Programming |
| CPS | Cyber-physisches System |
| DA | Datenanforderung |
| DP | Demand Planning |
| DT | Digitale Zwillinge |
| DtP | Distribution Planning |
| EPPI | Evidence for Policy and Practice |
| ERP | Enterprise Resource Planning |
| ETO | Engineer-to-Order |
| FA | Funktionale Anforderung |
| FCP | Finite Capacity Planning |
| IEC | International Electrotechnical Commission |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IoT | Internet of Things |
| IoTS | Internet of Things and Services |

| | |
|--------|--|
| ISA | International Society of Automation |
| ISO | International Organization for Standardization |
| IT | Informationstechnik |
| IKT | Informations- und Kommunikationstechnik |
| KMU | Kleine und mittlere Unternehmen |
| LA | Leistungsanforderung |
| LP | Lineare Programmierung |
| MA | Anforderung an die Mensch-System-Integration |
| MES | Manufacturing Execution System |
| MIP | Gemischt-ganzzahlige Programmierung |
| MP | Master Planning |
| MRP I | Material Requirements Planning |
| MRP II | Manufacturing Resource Planning |
| PPS | Produktionsplanung und -steuerung |
| PP&S | Production planning and -scheduling |
| PRISMA | Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses |
| RA | Anforderung an gesetzliche und betriebliche Restriktion |
| RaaS | Result-as-a-Service |
| RFID | Radio Frequency Identification |
| S. | Seite |
| SA | Schnittstellenanforderung |
| SaaS | Software-as-a-Service |
| SC | Supply Chain |
| SCM | Supply Chain Management |
| SDA | Anforderungen an Systemsicherheit und Datenschutz |
| SEBoK | Software Engineering Body of Knowledge |

| | |
|-------|--|
| SLA | Anforderung an die Lebenszyklusunterstützung des Systems |
| SLR | Systematische Literaturrecherche |
| SNP | Strategic Network Planning |
| SRS | Software Requirements Specification |
| SyRS | System Requirements Specification |
| TP | Transport Planning |
| TMS | Transportation Management Systems |
| V | Verifizierbarkeit |
| vs. | versus |
| WA | Wirtschaftlichkeitsanforderung |
| WMS | Warehouse Management System |
| z. B. | zum Beispiel |

1 Einleitung

Im Kontext von Industrie 4.0 sehen sich Unternehmen zunehmend komplexen Produktionsumgebungen und einer wachsenden Nachfrage nach kundenindividuellen Lösungen gegenüber. Laut einer Umfrage von McKinsey aus dem Jahr 2022 erwarten 90 % der befragten Unternehmen, ihre bestehenden informationstechnischen Systeme für die Produktionsplanung umfassend zu modernisieren (Dilda et al. 2023). Um eine bessere Ressourcenauslastung zu erreichen, Lieferzeiten zu verkürzen und die Reaktionsfähigkeit auf unerwartete Ereignisse zu verbessern, setzen immer mehr Unternehmen im Zuge der digitalen Transformation auf Advanced Planning and Scheduling (APS)-Systeme. Diese Systeme sind in der Lage, unter Berücksichtigung vielfältiger Restriktionen unterschiedliche Produktionsszenarien in Echtzeit zu simulieren und daraus optimale Produktionspläne zu abzuleiten.

1.1 Motivation

Obwohl APS-Systeme theoretisch eine signifikante Steigerung der Produktionseffizienz und Flexibilität ermöglichen, ist ihre tatsächliche Wirkung in der industriellen Praxis oft uneinheitlich. Studien zeigen, dass mehr als 60 % der Informationstechnik (IT)-Transformationsprojekte im Bereich der Supply Chain (SC)-Planung hinsichtlich Zeit, Budget oder erwarteter Geschäftsergebnisse scheitern oder zumindest deutlich hinter den Erwartungen zurückbleiben (Dilda et al. 2023). Konkret erreichen etwa 50 % der APS-Projekte ihre angestrebten Ziele nicht (Beyer 2022; Sablič 2024, S. 3).

Besonders bei Störungen wie sehr kurzfristige Auftragsänderungen, Lieferengpässen oder Maschinenausfällen zeigen sich strukturelle Schwächen der APS-Systeme wie mangelnde Robustheit, geringe Reaktionsfähigkeit, unzureichende Datenintegration und Algorithmen, die mit hybriden Produktionsmodellen nicht kompatibel sind. Darüber hinaus hängen viele dieser Misserfolge nicht nur mit technischen Aspekten zusammen, sondern auch mit nichttechnischen Faktoren wie unzureichendem Prozessverständnis, schlechter Datenqualität, mangelnder Einbindung von Schlüsselanwendern und ungeeigneten Implementierungspartnern (Kudos Solutions 2023). Es zeigt sich, dass APS-Systeme keineswegs universell einsetzbare Lösungen sind.

Um die bestehende Diskrepanz zwischen der funktionalen Ausgestaltung von APS-Systemen und deren industrieller Anwendungspraxis zu verringern, ist es erforderlich, die zentralen Funktionen und Anwendungsgrenzen dieser Systeme aus der Perspektive der Anforderungsdefinition systematisch neu zu durchdenken.

1.2 Forschungsziele

Diese Arbeit verfolgt das Ziel, mithilfe einer systematischen Literaturrecherche (SLR) die Anforderungen an APS-Systeme in der industriellen Produktion zu identifizieren, zu strukturieren und daraus einen standardisierten Anforderungskatalog zu entwickeln, der zur Verbesserung dieser Systeme beitragen kann. Die konkreten Ziele der Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Defizite von APS-Systemen sollen auf Basis einschlägiger wissenschaftlicher Literatur identifiziert werden.
2. Unter Anwendung methodischer Ansätze aus internationalen Standards sollen diese Defizite in konkrete Anforderungen überführt und in einem Anforderungskatalog abgebildet werden.
3. Darüber hinaus erfolgt eine Diskussion bestehender Lösungsansätze, die in der Literatur zur Bewältigung der identifizierten Defizite genannt werden. Diese werden mithilfe des entwickelten Anforderungskatalogs hinsichtlich ihrer Fähigkeit beurteilt, die definierten Anforderungen zu erfüllen.

Es ist hervorzuheben, dass der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Erstellung des Anforderungskatalogs liegt. Die Analyse bestehender Lösungsansätze zur Behebung identifizierter Defizite stellt ein ergänzendes Ergebnis dar. Durch diese Arbeit soll eine Grundlage für die verbesserte Anwendung von APS-Systemen in der industriellen Produktion bereitgestellt werden. Darüber hinaus sollen Systementwickler bei der funktionalen Ausgestaltung und Integration der Systeme durch strukturierte Handlungsempfehlungen unterstützt werden, um die tatsächliche Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit von APS-Systemen in zukünftigen Produktionsumgebungen zu verbessern.

1.3 Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in sieben Kapitel gegliedert. Nach der Einleitung folgt in Kapitel 2 eine Einführung in die theoretischen Grundlagen zu den Themen Produktion in der Industrie 4.0, Produktionsplanung und -steuerung (PPS), APS-Systemen sowie Definition des Anforderungskatalogs. Kapitel 3 beschreibt die methodische Vorgehensweise im Rahmen der SLR, während in Kapitel 4 die konkrete Durchführung der SLR dokumentiert wird, einschließlich der Anzahl identifizierter Quellen. In Kapitel 5 wird der Anforderungskatalog auf Basis der internationalen Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 erstellt, in dem die aus den identifizierten Defiziten abgeleiteten Anforderungen systematisch aufgelistet werden. Kapitel 6 enthält eine Diskussion der bestehenden Lösungsansätze anhand des Anforderungskatalogs. Abschließend gibt Kapitel 7 eine kurze Zusammenfassung der Zielerreichung und einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen.

2 Theoretische Grundlage

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen dargelegt, die als Basis für diese Arbeit dienen. Zunächst wird auf die Produktion in der Industrie 4.0 eingegangen. Anschließend erfolgt der Übergang von der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) hin zu APS-Systemen. Der theoretische Hintergrund der APS-Systeme sowie deren Stand der Technik in der industriellen Anwendung werden anschließend ausführlich erläutert. Abschließend werden die theoretischen Grundlagen im Zusammenhang mit dem Anforderungskatalog dargestellt.

2.1 Produktion in der Industrie 4.0

Die industrielle Produktion durchläuft derzeit einen tiefgreifenden Wandel, der als „Industrie 4.0“ bezeichnet wird. Dieser Begriff wurde zum ersten Mal im Jahr 2011 im Rahmen der Hannover-Messe definiert. Nach den drei vorherigen industriellen Revolutionen - der Mechanisierung durch Dampfenergie, der arbeitsteiligen Massenproduktion mit elektrischer Energie und der Automatisierung durch Elektronik und IT - steht Industrie 4.0 für den Übergang zur intelligenten, vernetzten und datengetriebenen Produktion (Jäger et al. 2015, S. 5; Siepmann 2016, S. 19–22).

2.2 Von der Automatisierung zur intelligenten Vernetzung

Die Automatisierungspyramide stellt ein klassisches Modell zur hierarchischen Strukturierung von Produktionssystemen in Industrieunternehmen dar. Sie unterteilt den Fertigungsprozess in mehrere Ebenen und erleichtert das Verständnis sowie die Steuerung komplexer Systeme (Siepmann 2016, S. 49). Allerdings ist die Automatisierung allein nicht in der Lage, die durch variantenreiche Fertigung entstehende Komplexität und Unsicherheit moderner Produktionsumgebungen zu bewältigen. Mit dem Fortschritt von Industrie 4.0 wird diese Pyramide zunehmend durch netzwerkbasierende Strukturen aufgelöst (Meudt et al. 2017a, S. 6–7). Neben der Automatisierung steht die intelligente Vernetzung von Maschinen, Produkten, Menschen und Systemen im Fokus (Siepmann 2016, S. 20). Diese ermöglicht einen kontinuierlichen Informationsfluss über alle Ebenen der Produktion hinweg. Dadurch können sowohl vertikal, von der Prozessebene bis zur Unternehmenssteuerung, als auch horizontal, zwischen Abteilungen und Wertschöpfungspartnern integriert werden (Hoppe 2014, S. 251).

Das zentrale Konzept von Industrie 4.0 besteht darin, durch cyber-physische Systeme (CPS) eine intelligente Fabrik zu realisieren. Durch die Weiterentwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) erfassen vielfältige Sensoren Produktionsdaten in Echtzeit. Intelligente, automatisierte Steuerungen sind in Maschinen integriert und über das Internet der Dinge und Dienste (IoTS) mit Cloud-Plattformen verbunden. Diese ermöglichen dynamische Kommunikation, visuelle Überwachung sowie die Echtzeitanpassung von Prozessen (Siepmann

2016, S. 20; TSAI et al. 2024, S. 341–342). Im Folgenden werden einige Schlüsseltechnologien der Industrie 4.0 näher vorgestellt:

Das Internet der Dinge (IoT) und Dienste

Das IoT ermöglicht es physischen Objekten, die mit Sensoren, Software und weiteren Technologien ausgestattet sind, mit anderen Geräten und Systemen über das Internet zu kommunizieren. Produkte mit integrierten Radio Frequency Identification (RFID)-Chips oder Sensoren werden zu Informationsquellen, die Standort, Zustand und Nutzung jederzeit rückmelden können. Das IoTS leitet sich aus dem IoT ab und basiert auf einer vollkommenen Vernetzung sämtlicher Gegenstände. Dies erweitert die Konnektivität über die physische Produktion hinaus auf cloudbasierte Plattformen und Dienstleistungen (Reis und Gonçalves 2018, S. 21–22; Siepmann 2016, S. 26).

Cloud Computing, Big Data

Das Cloud Computing ermöglicht die bedarfsgerechte und dezentrale Bereitstellung von Daten, Dienstleistungen und digitalen Geschäftsmodellen über das Internet. Nutzer können dadurch Informationen online speichern oder Softwareanwendungen nutzen. Die zunehmende Verbreitung von Cloud-Technologien führt jedoch zu einem exponentiellen Datenwachstum. Um diese heterogenen Datenmengen effizient zu verarbeiten, sind hochverfügbare und stabile Kommunikationsnetze sowie Konzepte zur Massendatenverarbeitung erforderlich (Jäger et al. 2015, S. 7; Siepmann 2016, S. 54–55).

Das Big Data bezeichnen die Extraktion von Entscheidungsgrundlagen aus heterogenen und oft unstrukturierten Daten. Dieses Konzept umfasst Disziplinen zur Verwaltung, Organisation und Nutzung großer Datenvolumina, wobei Datensicherheit und -verfügbarkeit eine zentrale Rolle spielen. Sichere und verteilte serviceorientierte Cloud-Plattform sind hierfür eine Voraussetzung. Darüber hinaus unterstützen Cloud-Plattformen sowohl die unternehmensinterne als auch die unternehmensübergreifende Datenspeicherung und -verarbeitung. Sie bieten zudem die Möglichkeit, unterschiedliche Anwendungen flexibel und bedarfsorientiert zu verknüpfen. Diese Plattformen haben sich im Konsumbereich bereits etabliert und finden zunehmend auch in der industriellen Produktion Anwendung, um produktionsrelevante Applikationen zu integrieren und zu unterstützen (Jäger et al. 2015, S. 7; Siepmann 2016, S. 56).

Cyber-Physische Systeme (CPS)

CPS bezeichnen die intelligente Integration von physischen Objekten mit digitalen Komponenten wie Sensoren, Mikrocontrollern, Aktoren, Kommunikationssystemen und eindeutigen Identifikatoren. Durch diese Ausstattung werden bislang passive Objekte zu intelligenten Einheiten, die eine nahtlose Vernetzung von Maschinen, Menschen und Produkten ermöglichen. Zentrale

Merkmale eines CPS sind die Fähigkeit zur Erfassung und Verarbeitung von Echtzeitdaten sowie die Kommunikation mit anderen Systemen über digitale Netzwerke (Jäger et al. 2015, S. 8; Siepmann 2016, S. 23).

Die cyber-physische Integration beschreibt dabei die bidirektionale Kopplung zwischen digitalen Planungssystemen (z. B. APS-Systeme) und physischen Ressourcen (z. B. Maschinen, Werkstücke, Sensoren), wodurch Datenströme in Echtzeit ermöglicht und Entscheidungen dynamisch angepasst werden können. Diese Integration kann beispielsweise durch digitale Zwillinge (DT) realisiert werden. DT sind virtuelle Abbilder physischer Systeme, die Simulationen über verschiedene Lebenszyklusphasen hinweg ermöglichen (Park et al. 2021, S. 501; Park et al. 2024, S. 128–129). Mithilfe von Methoden wie maschinellem Lernen können Produktionspläne gezielt prognostiziert und optimiert werden (TSAI et al. 2024, S. 341–342).

2.3 Herausforderungen

Die zunehmende Verbreitung von den oben genannten Technologien hat die Fertigungsindustrie deutlich intelligenter gemacht, indem sie den Zugang zu Echtzeitdaten erleichtert. Dennoch sehen sich Entscheidungsträger in der industriellen Produktion weiterhin mit den Herausforderungen konfrontiert (Li et al. 2020, S. 1231). Die RFID-Technologie beschleunigt den Informationsfluss, zwingt Entscheidungsträger jedoch zu einem schnelleren Handeln. Insbesondere in dynamischen und konfliktbehafteten Zielumgebungen wird es dadurch schwieriger, rasch und zugleich präzise Entscheidungen zu treffen (Qu et al. 2012, S. 2355). Gleichzeitig beeinträchtigen fehlende standardisierte Entscheidungsprozesse und mangelnde Koordinationsmechanismen die Effizienz der Entscheidungsfindung (Zhong et al. 2013, S. 1).

Die Komplexität der stochastischen Produktionsoptimierung zählt zu den größten Herausforderungen für die Umsetzung von Industrie 4.0. Die IoTS-Technologie allein ermöglicht weder eine effektive Transformation von Rohdaten in verwertbare Informationen und Wissen, noch bietet sie ausreichende Unterstützung für Entscheidungsprozesse (Li et al. 2020, S. 1231). Darüber hinaus sind viele Unternehmen noch weit davon entfernt, CPS zu implementieren und den Status einer intelligenten Fabrik zu erreichen.

Diese Herausforderungen lassen sich weitgehend durch den Einsatz von APS-Systemen bewältigen lassen (Vidoni und Vecchiotti 2015a, S. 389; Zhong et al. 2013, S. 1–3). Die Bedeutung von APS im Kontext von Industrie 4.0 stellt ein interdisziplinäres Forschungsfeld dar, das in den zukünftigen Untersuchungen vertieft werden soll (Vieira et al. 2021, S. 389).

2.4 Produktionsplanung und -steuerung (PPS)

Die PPS ist ein zentrales Element in der Erhöhung der logistischen Leistungsfähigkeit und Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens (Hillnhagen et al. 2022, S. 728). Im Allgemeinen wird PPS als die Planung und Realisierung von Produktions- und Fertigungsabläufen verstanden. Ihre Kernaufgabe besteht darin, festgelegte Produktionsziele zu erreichen. Dabei muss der Produktionsprozess hinsichtlich Menge, Ort und Zeit auf ein gegebenes Produktionssystem und dessen Kapazitäten abgestimmt werden (Meudt et al. 2017b, S. 1).

Trotz der intensiven Forschung besteht in der wissenschaftlichen Literatur bislang kein einheitlicher Konsens über die standardisierte Benennung und Klassifikation der PPS-Schritte (Hillnhagen et al. 2022, S. 728–729; Meudt et al. 2017b, S. 10). In der Regel gliedern viele Modelle die PPS-Aufgaben in zwei zentrale Kernbereiche: „Planung“ und „Steuerung“. Dabei bezieht sich die Planung auf alle vorgelagerten Entscheidungen, die vor Beginn der operativen Durchführung getroffen werden müssen, wohingegen sich die Steuerung auf die operative Umsetzung und kurzfristige Anpassung innerhalb des Produktionsprozesses konzentriert (Meudt et al. 2017b, S. 1; Kuhnle 2020, S. 17).

Entlang des zeitlichen Planungshorizonts lassen sich die PPS-Aufgaben in drei Ebenen differenzieren:

Auf langfristiger Ebene, die sich über mehrere Monate erstreckt, handelt es sich typischerweise um strategische Entscheidungen wie den Kapazitätsausbau, Investitionen oder die Planung des Produktionsprogramms.

Die mittelfristige Ebene umfasst operative Aufgaben, die im Zeitraum von mehreren Wochen erfolgen, insbesondere die Reihenfolgeplanung und die Kapazitätsverteilung.

Auf kurzfristiger Ebene, die von Sekunden bis zu wenigen Minuten reicht, stehen die Feinsteuerung der Produktionsprozesse sowie die Freigabe von Aufträgen im Vordergrund, wobei Produktionsdaten in Echtzeit berücksichtigt werden (Kuhnle 2020, S. 16–17).

Mit zunehmender Komplexität industrieller Produktionssysteme nimmt die Notwendigkeit einer synchronisierten Entscheidungsfindung auf mehreren Ebenen deutlich zu. Die Aufgaben innerhalb von PPS sind zunehmend miteinander verknüpft und können nicht mehr isoliert betrachtet werden (Meudt et al. 2017b, S. 1).

2.4.1 Zielkonflikte der PPS

In Abbildung 2-1 sind die wichtigsten logistischen Zielgrößen der PPS dargestellt: Durchlaufzeit, Termintreue, Bestände und Kapazitätsauslastung. Im Mittel steht dabei stets eine hohe Wirtschaftlichkeit. Diese Zielgrößen stehen jedoch häufig in einem Zielkonflikt zueinander. Ein zentrales Spannungsfeld der PPS ergibt sich daraus, dass sie sich nicht gleichzeitig in optimaler Weise erfüllen lassen. So stehen kurze Durchlaufzeiten und hohe Termintreue, die primär

Marktzielen zugeordnet werden, im Widerspruch zu betriebsinternen Zielen wie hoher Kapazitätsauslastung und niedrigen Lagerbeständen (Hillnhagen et al. 2022, S. 729; Kuhnle 2020, S. 13; März und Weigert 2011, S. 9). Dieses Zielkonfliktdilemma zeigt sich besonders deutlich bei der Wahl der Losgrößen: Große Lose erhöhen die Auslastung und senken Rüstkosten, führen jedoch zu Bestandsaufbau und längeren Durchlaufzeiten. Kleine Lose ermöglichen flexiblere Lieferungen, verursachen aber häufige Umrüstungen und Produktivitätseinbußen (März und Weigert 2011, S. 8–9). Zusätzlich erschweren dynamische Veränderungen in Auftragslast, Produktvielfalt und Ressourcenverfügbarkeit eine präzise Vorabplanung logistischer Effekte.

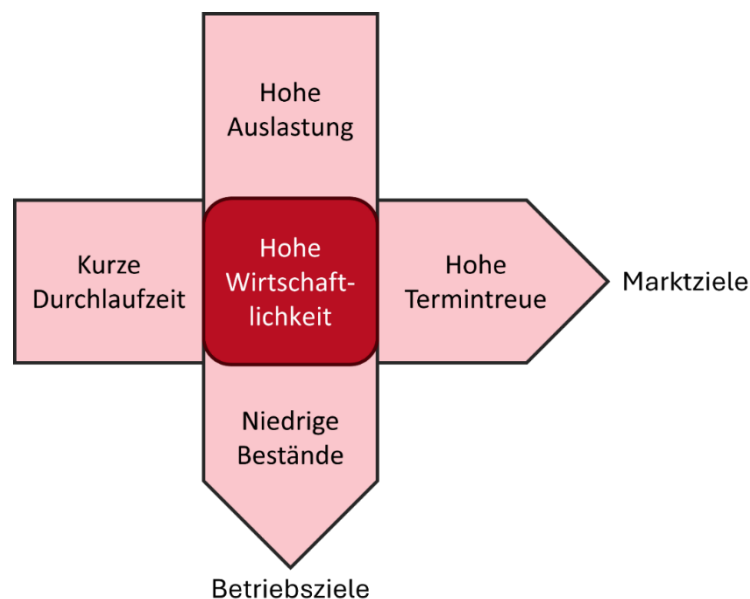


Abbildung 2-1: Zusammenhang der logistischen Zielgrößen, in Anlehnung an März und Weigert 2011, S. 9

Insgesamt wird deutlich, dass eine moderne PPS nicht nur Zielgrößen definieren, sondern auch deren Zielkonflikte systematisch ausbalancieren muss (Hillnhagen et al. 2022, S. 729). Dabei sollen insbesondere die Interdependenzen zwischen den PPS-Aufgaben und den verschiedenen Entscheidungsebenen berücksichtigt werden (Kuhnle 2020, S. 13). Gleichzeitig ist es erforderlich, dass Unternehmen ihre Planungsstrategien flexibel an die jeweilige betriebliche Situation anpassen, um unterschiedliche bedarfsgerecht zu realisieren (März und Weigert 2011, S. 9).

2.4.2 Einsatzbereiche von PPS-Werkzeugen

IT-Werkzeuge unterstützen seit den 1960er Jahren die Auftragsabwicklung von Produktionsunternehmen (Wiendahl und Kluth 2018, S. 14). Die Auswahl und der effektive Einsatz von IT-Werkzeugen zur PPS hängen in hohem Maße von der jeweiligen Planungsebene sowie den unternehmensspezifischen Rahmenbedingungen ab. Je nach Planungsebene variiert dabei auch der Funktionsumfang der eingesetzten Werkzeuge. In der industriellen Praxis hat sich hierfür ein dreistufiges Gliederungsmodell etabliert (Wiendahl und Kluth 2018, S. 15):

Netzwerkebene: Auf der obersten Ebene kommen vorrangig Supply Chain Management (SCM)-Systeme zum Einsatz. Diese Systeme fokussieren auf die unternehmensübergreifende Planung und Steuerung entlang der gesamten SC. Zu den typischen Funktionsmodulen zählen Netzwerkplanung, Transportplanung, Absatzplanung und Bestandsmanagement. Ziel ist es, die Koordination innerhalb komplexer Produktions- und Logistiknetzwerke effizient zu unterstützen.

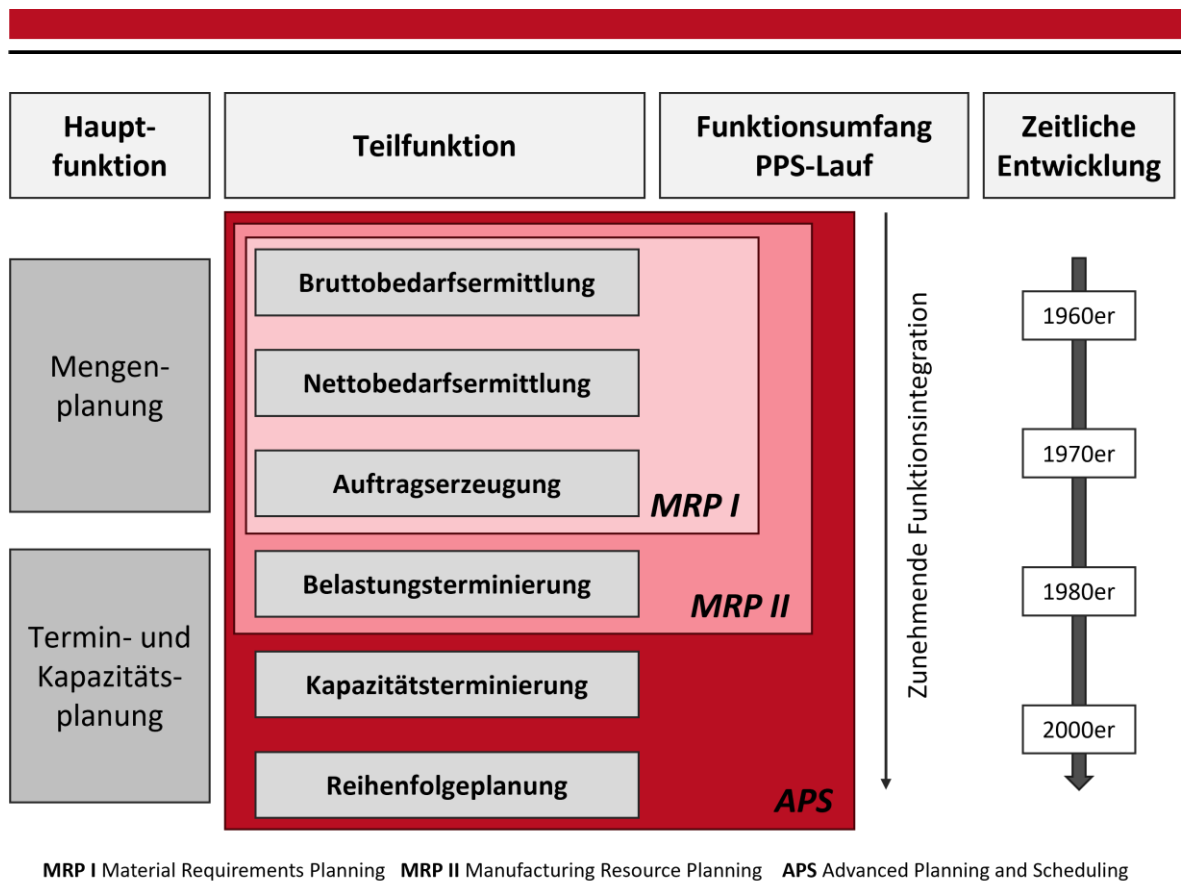
Unternehmensleitebene: Auf der mittleren Ebene werden Enterprise Resource Planning (ERP)-Systeme eingesetzt. Diese Systeme dienen der Koordination und Steuerung interner Geschäftsprozesse eines Unternehmens. Sie bieten eine zentrale Plattform zur Verwaltung von Stamm- und Transaktionsdaten, darunter Materialstammdaten, Stücklisten, Arbeitspläne, Produktionsaufträge, Lagerbestände und Kundenaufträge. Als universell einsetzbare Systeme können ERP-Lösungen in Unternehmen mit unterschiedlichsten Charakteristika Anwendung finden. Um ihr volles Potenzial auszuschöpfen, ist jedoch eine unternehmensspezifische Anpassung erforderlich (Vidoni und Vecchiotti 2015b, S. 39).

Produktionsleitebene: Auf der untersten Ebene werden Manufacturing Execution Systeme (MES) eingesetzt. Diese Systeme sind auf die technische und organisatorische Unterstützung des Produktionsprozesses ausgerichtet. Ihr Funktionsumfang reicht von der Erfassung von Produktionsdaten über die Feinplanung und operative Steuerung bis hin zu Qualitätsmanagement- und Analysefunktionen. MES-Systeme dienen somit der Umsetzung und Rückmeldung der Produktionsvorgaben in Echtzeit.

Diese funktionale Schichtenarchitektur mit ihren typischen Modulbereichen bildet eine wesentliche Grundlage zur Differenzierung der heute auf dem Markt verfügbaren PPS-Werkzeuge und ermöglicht eine bedarfsgerechte Auswahl und Integration entlang der jeweiligen Planungsebenen.

2.4.3 Historische Entwicklungsstufen der PPS

Die Entwicklung der PPS spiegelt das stetige Streben der Unternehmen nach höherer Funktionstiefe und stärkerer Systemintegration wider. Im Laufe der Zeit haben sich drei charakteristische Ausprägungen des PPS-Planungslaufs herausgebildet, die sich hinsichtlich ihrer funktionalen Komplexität und Reife deutlich unterscheiden (Wiendahl und Kluth 2018, S. 15–16). In Abbildung 2-2 werden die Varianten, Material Requirements Planning (MRP I)-, Manufacturing Resource Planning (MRP II)- und APS-Lauf, sowie deren jeweilige Funktionen gegenübergestellt. Zur Verdeutlichung der Unterschiede zwischen den drei Planungsläufen werden im Anschluss deren Merkmale und Funktionsumfänge anhand der Abbildung 2-2 systematisch erläutert.



MRP I Material Requirements Planning **MRP II** Manufacturing Resource Planning **APS** Advanced Planning and Scheduling

Abbildung 2-2: Historische Entwicklungsschritte des PPS-Laufs, in Anlehnung an Wiendahl und Kluth 2018, S. 16

Beim **MRP I-Lauf** handelt es sich um eine rein mengen- und termingesteuerte Materialbedarfsplanung. Dabei werden insbesondere die operativen Teilfunktionen der Bedarfsermittlung, also die Brutto- und Nettoermittlung des Bedarfs einschließlich der Terminierung, sowie die Auftragserzeugung unter Berücksichtigung vorgegebener Losgrößen und festgelegter Beschaffungsarten mit der Bestandsführung eng miteinander verknüpft.

Der **MRP II-Lauf** erweitert die Materialbedarfsplanung um eine Kapazitätsbedarfsrechnung für die Eigenfertigung. Zwar werden nun auch Terminanforderungen und Kapazitätsbedarfe einbezogen, jedoch erfolgt die Belastungsterminierung weiterhin ohne Berücksichtigung möglicher Kapazitätskonflikte zwischen den einzelnen Aufträgen.

Erst der **APS-Lauf** integriert zusätzlich die Teilfunktionen der Kapazitätsterminierung sowie der Reihenfolgeplanung. Dadurch können konkurrierende Aufträge, Ressourcenkonflikte und die aktuelle Materialverfügbarkeit angemessen berücksichtigt werden. Die enge Kopplung von Materialbedarfsplanung mit der Eigenfertigungsplanung und -steuerung trägt dazu bei, zentrale Defizite klassischer MRP-Ansätze gezielt zu überwinden.

Die Entwicklung dieser Planungsformen ist das Ergebnis eines historischen Reifeprozesses, der sich in mehreren aufeinanderfolgenden Etappen vollzog (Ovacik 2011, S. 33–38; Wiers und Kok 2018, S. 11–15):

Phase I in den 1960er-Jahren

Die Einführung von MRP-I markierte einen bedeutenden Fortschritt in der rechnergestützten Produktionsplanung. Dennoch kam es in der praktischen Anwendung häufig zu einer deutlichen Trennung zwischen Planung und Ausführung. Zur gleichen Zeit konzentrierte sich die akademische Forschung zur Ablaufplanung auf stark vereinfachte Modelle, die in komplexen Produktionsumgebungen kaum anwendbar waren (Ovacik 2011, S. 33; Wiers und Kok 2018, S. 11–13).

Phase II in den 1970er- und 1980er-Jahren

MRP II blieb trotz der Einführung erster Kapazitätsplanungsansätze in der Praxis auf die reine Visualisierung von Planungsproblemen beschränkt. Es fehlte weiterhin an echter Optimierung und entscheidungsunterstützenden Funktionen. Zur gleichen Zeit wurde der Begriff Finite Capacity Planning (FCP) entwickelt, die unter anderem elektronische Gantt-Diagramme und einfache ressourcenbezogene Planungsmodelle einsetzten. Diese galten als Vorläufer der späteren APS-Systeme. Parallel dazu begann sich auch die akademische Forschung zu verändern. Anstelle der Suche nach optimalen Lösungen verlagerte sich der Fokus zunehmend auf heuristische Verfahren, um praktikable und realitätsnahe Ergebnisse für industrielle Anwendungen zu erzielen (Ovacik 2011, S. 34–35).

Phase III in den 1990er-Jahren

In den 1990er Jahren erweiterte sich der Funktionsumfang der Systeme deutlich, was zur Einführung des Begriffs ERP führte. Klassische PPS-Funktionen wurden in umfassendere Unternehmenssysteme integriert. Die zugrunde liegende Planungslogik beruhte jedoch weiterhin auf den Prinzipien von MRP, was den steigenden Anforderungen an Reaktionsfähigkeit und Flexibilität in komplexen Produktionsumgebungen nicht gerecht wurde (Wiers und Kok 2018, S. 14). Zu dieser Zeit wurde der Markt für Planungssysteme von den großen Softwareanbietern dominiert. In diesem Umfeld entstand allmählich das Konzept des APS, das von kleinen, agilen Softwareunternehmen entwickelt wurde, um Marktnischen zu erschließen und mit den Branchengrößen in Wettbewerb zu treten (Ovacik 2011, S. 33–34).

Mitte der 1990er-Jahre begannen APS-Lösungen, mehrere Planungsebenen zu integrieren. Sie umfassten dabei zunehmend den gesamten Bereich von der Netzwerkgestaltung über die Absatz- und Produktionsplanung bis hin zur Transportoptimierung. In diesem Kontext entstanden auch die Begriffe SC-Planung und SCM. Die Erwartungen an integrierte SCM-Systeme waren hoch. Jedoch führten zahlreiche Umsetzungsprobleme zu einer verstärkten Ausrichtung auf hierarchische Planungsansätze. Diese Struktur ermöglichte es insbesondere etablierten ERP-Anbietern, bestehende Module schrittweise zu erweitern (Ovacik 2011, S. 36–37).

Phase IV in den 2000er-Jahren

Nach dem Eintritt in das 21. Jahrhundert erreichten APS-Systeme durch Fortschritte in der Hardware und in den Algorithmen ein hohes Maß an Reife. Gleichzeitig gingen die Unternehmen mit der Einführung von APS-Systemen realistischer und pragmatischer um. Auf dem Markt erlebte die Planungssoftwarebranche einen

tiefgreifenden Wandel. Viele der frühen Pionierunternehmen wurden später von großen Softwareanbietern übernommen oder verschwanden vom Markt (Ovacik 2011, S. 38–41; Wiers und Kok 2018, S. 14–15).

Auf der Grundlage dieser technischen Entwicklungen und praktischen Erfahrungen konnte sich das APS-System schrittweise als eigenständiges Paradigma der Produktionsplanungssoftware etablieren. Die folgenden Unterkapitel widmen sich einer detaillierten Vorstellung von den modernen APS-Systemen.

2.5 Advanced Planning and Scheduling (APS)-System

APS-Systeme bilden den Kerngegenstand dieser Arbeit. In diesem Unterkapitel werden die Definition und die Hauptcharakteristiken von APS-Systemen ausführlich erläutert.

2.5.1 Definition der APS-Systeme

Bis heute existiert keine allgemein anerkannte Definition von APS-Systemen (Hvolby und Steger-Jensen 2010, S. 845; Lupeikiene et al. 2014, S. 584; Mousavi et al. 2023, S. 5). Dieser Begriff wird in den wissenschaftlichen Publikationen weiterhin uneinheitlich und teilweise widersprüchlich verwendet. Auf konzeptioneller Ebene wird ein APS-System als ein eigenständiges Planungs- und Steuerungssystem verstanden, das als zentrale Komponente der unternehmensweiten Planung fungiert. Diese Sichtweise stellt einen Bruch mit der traditionellen Auffassung dar, wonach das APS-System lediglich als Bestandteil des ERP-Systems betrachtet wird (Ovacik 2011, S. 33). Vielmehr wird vertreten, dass das ERP die Aufgabe hat, das APS-System funktional zu unterstützen (Lupeikiene et al. 2014, S. 584).

Auf der Realisierungsebene wird ein APS-System als ein Softwareprodukt definiert, das auf fortgeschrittenen mathematischen Algorithmen und logischen Entscheidungsverfahren basiert, um betriebliche Planungsentscheidungen zu ermöglichen. Dabei ergänzt und erweitert ein APS-System bestehende ERP-Systeme, anstatt diese zu ersetzen (Stadtler 2015, S. 12; Vidoni und Vecchietti 2015a, S. 330). Während ERP-Systeme grundlegende Geschäftsprozesse und Transaktionen abwickeln, wie etwa Kundenauftragsbearbeitung oder Buchhaltung, übernehmen APS-Systeme Analyse- und entscheidungsunterstützende Funktionen im täglichen Geschäftsbetrieb. In der praktischen Umsetzung des APS-Softwareprodukts lassen sich grundsätzlich drei Implementierungsformen unterscheiden:

1. als Subsystem eines spezifischen ERP-Systems,
2. als Add-on-Modul für mehrere ERP-Systeme oder
3. als eigenständiges Softwarepaket, das sowohl autonom betrieben als auch mit einem bestimmten ERP-System integriert werden kann.

Wird das APS-System als Subsystem des ERP-System realisiert, muss es die internen Modellierungs-, Architektur- und Implementierungsstandards des ERP-Systems erfüllen (Lupeikiene et al. 2014, S. 585). Als Add-on-Modul zu bestehenden ERP-Systemen konzentriert sich das APS-System auf Planungsaufgaben und nicht auf die Transaktionsverarbeitung. In den meisten Fällen fungiert das ERP-System als führendes System, in dem die zentralen Transaktionsdaten gespeichert und gepflegt werden. Die Datenbasis des APS-Systems wird in der Regel inkrementell aktualisiert, während wesentliche Änderungen an den Stammdaten weiterhin im ERP-System vorgenommen werden. Dieser Prozess wird auch als Integration von APS- und ERP-Systemen bezeichnet (Reuter und Rohde 2015, S. 241). Darüber hinaus können APS-Systeme mit anderen betrieblichen Informationssystemen wie z. B. MES, Warehouse Management Systems (WMS) und Transportation Management Systems (TMS) interoperabel verbunden werden (Reuter und Rohde 2015, S. 245; Vidoni und Vecchietti 2015a, S. 330).

Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit folgende Definition zugrunde gelegt: *„APS-Systeme sind informationsbasierte Softwaresysteme, die entwickelt wurden, um ein oder mehrere Planungsprobleme (...) mit Hilfe fortschrittlicher Lösungsverfahren (...) zu lösen. Das APS-System muss mit anderen betrieblichen Informationssystemen interoperabel sein, um koordinierte Arbeitsabläufe zu ermöglichen. Dabei ersetzt das APS-System nicht den menschlichen Planer, sondern ergänzt ihn, sodass dieser jederzeit in der Lage ist, die vom System vorgeschlagenen Lösungen zu akzeptieren, zu modifizieren oder abzulehnen“*¹ (Vidoni und Vecchietti 2015a, S. 330). Unter einem Softwaresystem ist gemäß der internationalen Norm ISO/IEC/IEEE 12207:2017 ein System zu verstehen, bei dem *„die Software für die Stakeholder von primärer Bedeutung ist. Im Softwaresystem ist die Software der Haupttreiber zur Erfüllung der Systemanforderungen“*².

Das Akronym APS wird in der aktuellen Forschungsliteratur in zwei Bedeutungen verwendet: „Advanced Planning and Scheduling“ und „Advanced Planning System“. Ersteres bezeichnet ein komplexes Planungsproblem, das mithilfe fortschrittlicher Methoden gelöst werden soll, während Letzteres ein Informationssystem repräsentiert, das die Lösungsprozesse des Planungsproblems automatisiert (Vidoni und Vecchietti 2015a, S. 329). Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus ausdrücklich auf der zweiten Bedeutung. Dementsprechend werden die Begriffe APS-System und Advanced Planning System im Folgenden synonym verwendet.

¹ Eigene Übersetzung aus dem Englischen.

² Eigene Übersetzung aus dem Englischen.

2.5.2 Hauptcharakteristiken der APS-Systeme

APS-Systeme weisen drei wesentliche Hauptcharakteristiken auf (Fleischmann und Meyr 2003, S. 457; Santa-Eulalia et al. 2011, S. 173), die sie grundlegend von traditionellen Planungskonzepten unterscheiden:

1. Integrierte Planung

APS-Systeme ermöglichen eine gesamthafte und koordinierte Planung der gesamten SC vom Lieferanten über die eigene Produktion bis hin zum Endkunden. Diese Planung umfasst nicht nur unternehmensinterne SC-Strukturen, wie z. B. die Koordination mehrerer Produktionsstandorte oder Distributionszentren, sondern lässt sich auch auf komplexere unternehmensübergreifende Netzwerke ausweiten.

2. Echte Optimierungsfähigkeit

APS-Systeme sind in der Lage, bei begrenzten Ressourcen und vielfältigen Restriktionen Optimierungslösungen für Planungs- und Terminierungsprobleme zu finden, indem Zielgrößen, Entscheidungsvariablen und Nebenbedingungen explizit definiert werden. Zur Lösung kommen dabei verschiedene Methoden zum Einsatz, darunter exakte Optimierungsverfahren wie die lineare Programmierung (LP), die gemischt-ganzzahligen Programmierung (MIP) sowie das Constraint Programming (CP). Ergänzt werden diese durch heuristische und metaheuristische Verfahren wie die Theory of Constraints oder Simulated Annealing. Darüber hinaus finden quantitative Verfahren wie Simulation, Szenarioanalyse, Prognoseverfahren oder Zeitreihenanalyse Anwendung, um Entscheidungen zu unterstützen.

3. Hierarchisches Planungssystem

Dies bietet der einzige Rahmen, in dem die ersten beiden Charakteristiken miteinander kombiniert werden können. Eine vertiefte Betrachtung dieses Charakters erfolgt in Abschnitt 2.6.2.

Im Vergleich dazu verfügt das traditionelle MRP, das in nahezu allen ERP-Systemen implementiert ist, über keine dieser Hauptcharakteristiken. MRP ist auf den Produktions- und Beschaffungsbereich beschränkt, verfolgt keine Optimierungsziele und berücksichtigt in den meisten Fällen nicht einmal eine explizite Zielgröße. Es handelt sich um ein sequenzielles Planungssystem (Fleischmann et al. 2015, S. 74).

Daraus lässt sich ableiten, dass der Begriff „Advanced“ im Kontext von APS-Systemen nicht notwendigerweise auf den Einsatz neuartiger oder besonders komplexer Algorithmen oder Methoden verweist. Vielmehr bezeichnet er die Standardisierung und softwaregestützte Umsetzung bewährter Planungsprinzipien wie oben genannter hierarchischer Planung und verschiedener Optimierungsverfahren, zu allgemein anwendbaren Werkzeugen. Dies trägt

maßgeblich zur Verbreitung der Planungsansätze und Operations-Research-basierte Algorithmen in der industriellen Praxis bei. Von zentraler Bedeutung ist darüber hinaus die Offenheit der APS-Systemen, die die Integration neuer Module und Algorithmen erlaubt. Diese Offenheit ist essenziell, da in der SC-Planung nach wie vor zahlreiche Teilbereiche existieren, für die bislang keine praktikablen Lösungen verfügbar sind (Fleischmann und Meyr 2003, S. 458).

2.6 Stand der Technik von APS-Systemen in der industriellen Produktion

Das folgende Unterkapitel befasst sich mit dem aktuellen Stand der Technik von APS-Systemen in der industriellen Produktion und orientiert sich dabei an den bestehenden Strukturen kommerziell verfügbarer APS-Lösungen. Zunächst wird ein Überblick über den modularen Aufbau von den kommerziellen APS-Systeme gegeben. Aus dieser Darstellung leitet sich das grundlegende Konzept der hierarchischen Planung ab, das eine zentrale Rolle im Funktionsprinzip moderner APS-Systeme spielt. Im weiteren Verlauf wird auf die Kollaborative Planung der APS-Systeme entlang der gesamten SC eingegangen, da sie derzeit als ein viel diskutiertes Thema mit erheblichem Potenzial für die industrielle Produktion gilt. Abschließend wird die aktuelle Verbreitung der APS-Systeme auf dem Markt dargestellt.

2.6.1 Softwaremodule der APS-Systeme

APS-Systeme können auf verschiedenen Planungsebenen und in unterschiedlichen Funktionsbereichen einer Organisation eingesetzt werden (Betge und Leisten 2006, S. 15; Fleischmann und Meyr 2003, S. 480; Meyr et al. 2015, S. 99; Wiers und Kok 2018, S. 10–11) (Meyr et al. 2015, S. 99). Abbildung 2-3 zeigt die verschiedenen Bereiche, in denen bestehende kommerzielle APS-Systeme Planungsunterstützung für die industrielle Produktion bieten können. Diese Bereiche werden üblicherweise als Softwaremodule bezeichnet. Die Einteilung erfolgt entlang zweier Dimensionen: dem jeweils zu optimierenden Abschnitt der Organisation bzw. der SC (Beschaffung, Produktion, Distribution und Absatz) sowie dem Planungshorizont (kurzfristig, mittelfristig oder langfristig).

Obwohl die Benennung der Module je nach APS-Anbieter variieren kann, entsprechen sich die unterstützten Planungsaufgaben inhaltlich weitgehend. In der Abbildung wurde eine anbieterneutrale Bezeichnung verwendet, um die zugrunde liegenden Planungsaufgaben der jeweiligen Softwaremodule möglichst präzise abzubilden. Im Folgenden wird eine Übersicht der einzelnen Module sowie ihrer jeweiligen Planungsaufgaben dargestellt (Fleischmann und Meyr 2003, S. 481–482; Meyr et al. 2015, S. 100–101):

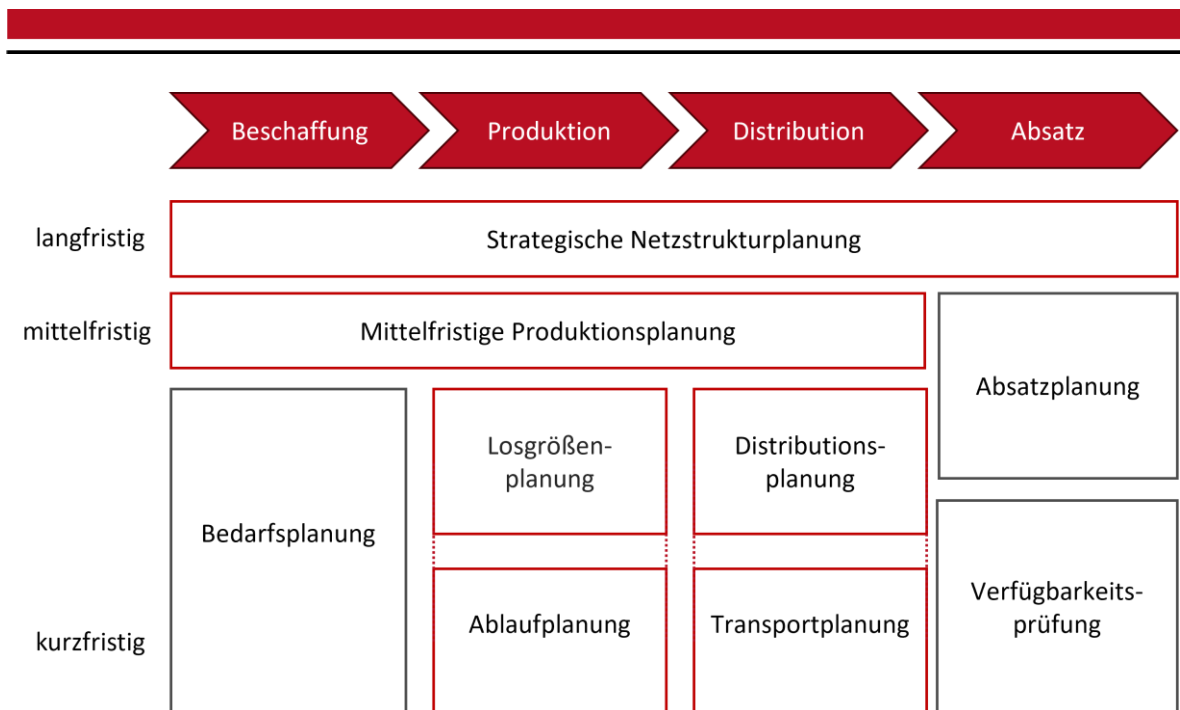


Abbildung 2-3: APS-Module in der SC, in Anlehnung an Betge und Leisten 2006, S. 15; Meyr et al. 2015, S. 100

Die **strategische Netzstrukturplanung** (Strategic Network Planning, SNP) umfasst die langfristige Gestaltung einer SC hinsichtlich Standortanzahl, -typ und -lage von Beschaffungs-, Produktions-, Lager- und Bedarfsorten. Ziel ist die effiziente Ausrichtung der Material-, Informations- und Finanzflüsse zwischen Lieferanten und Kunden. Dabei fließen auch strategische Überlegungen zur Marktzuzuordnung bestimmter Produkte ein.

Die **Absatzplanung** (Demand Planning, DP) befasst sich mit der Prognose zukünftiger Nachfrage in einem Make-to-Stock-Umfeld. Sie umfasst sowohl mittelfristige, aggregierte Prognosen als auch kurzfristige, detaillierte Bedarfsabschätzungen.

Die **mittelfristige Produktionsplanung** (Master Planning, MP) koordiniert den Materialfluss entlang der gesamten SC innerhalb eines mittelfristigen Planungshorizonts. Dabei werden Beschaffung, Produktion und Distribution integriert betrachtet. Zusätzlich umfasst das Modul grobe Kapazitäts- sowie Materialbedarfsplanungen unter Berücksichtigung saisonaler Schwankungen und potenzieller Engpässe. Häufig werden auch Personal- und Verteilungsaufgaben einbezogen. Die Nachfrageinformationen stammen in der Regel aus dem DP-Modul.

Das Modul **Verfügbarkeitsprüfung** (Demand Fulfillment and Available-to-Promise, ATP) behandelt die Bearbeitung eingehender Kundenaufträge. Es umfasst Aufgaben der Auftragsbestätigung, einschließlich der Prüfung der Materialverfügbarkeit und der Festlegung von Lieferterminen sowie Maßnahmen im Falle von Engpässen. Die meisten am Markt verfügbaren APS-Systeme beinhalten dieses Modul, das dem Bereich der kurzfristigen Absatzplanung zugeordnet wird.

Die **Losgrößen- und Ablaufplanung** (Production Planning and Scheduling, PP&S) umfasst kurzfristige, detaillierte Planungsaufgaben wie Losgrößenbestimmung, Maschinenzuweisung sowie Reihenfolge- und Ablaufplanung. Diese Aufgaben sind stark abhängig vom Typ der Produktions- und SC-Struktur und erfordern eine enge Abstimmung mit den operativen Gegebenheiten des Shopfloors. Je nach Anbieter werden diese Aufgaben entweder in einem integrierten Softwaremodul oder in getrennten Modulen abgebildet, wobei das eine für die Losgrößenplanung und das andere für die Maschinenbelegung und Fertigungssteuerung zuständig ist. Aufgrund branchenspezifischer Anforderungen bieten einige APS-Anbieter angepasste Module an, um beispielsweise Engpassstrukturen gezielt zu berücksichtigen und optimal zu koordinieren.

Die **Distributionsplanung** (Distribution Planning, DtP) bezieht sich auf die mittelfristige Zuordnung von Kunden zu Lagerstandorten, Liefergebieten und Transportverbindungen. Sie kann sich dabei teilweise mit der SNP überschneiden und Materialflüsse detaillierter abbilden als MP. Die **Transportplanung** (Transport Planning, TP) umfasst die kurzfristige Disposition von Sendungen innerhalb der Distribution sowie im Beschaffungsbereich, sofern diese vom Empfänger gesteuert wird.

Die **Bedarfsplanung** (Purchasing & MRP I) richtet sich auf die kurz- bis mittelfristige Beschaffung von Rohmaterialien und Komponenten. Nicht alle APS-Systeme bieten dieses Modul separat an, da seine Verbreitung in der Praxis bislang begrenzt ist. Zentrale Aufgaben wie die Stücklistenauflösung und Materialbestellung werden in der Regel von ERP-Systemen übernommen. Eine erweiterte Beschaffungsplanung mit Lieferantalternativen, Mengenrabatten oder Mengenrestriktionen wird von klassischen ERP-Systemen jedoch kaum unterstützt.

In Abbildung 2-3 sind die Softwaremodule mit rotem Rahmen als Hauptmodule gekennzeichnet, während die übrigen als unterstützende Module klassifiziert werden. Hauptmodule basieren in der Regel auf exakten Optimierungsverfahren oder auf heuristischen und metaheuristischen Verfahren, um entsprechende Entscheidungsmodelle aufzubauen (Betge und Leisten 2006, S. 15–16; Fleischmann und Meyr 2003, S. 510–519). Im Gegensatz dazu stützen sich unterstützende Module nicht auf die oben genannten mathematischen Modelle oder Algorithmen. Stattdessen übernehmen sie vorwiegend unterstützende Funktionen innerhalb des APS-Systems. Zu ihren Hauptaufgaben zählen die Verwaltung zentraler Stammdaten (z.B. die Bedarfsplanung), die Analyse historischer und aktueller Daten (z. B. die DP) sowie die Generierung zeitkritischer Informationen auf Basis verfügbarer Daten (z. B. die Verfügbarkeitsprüfung) (Betge und Leisten 2006, S. 51).

Die modulare Architektur der APS-Systeme lässt sich auf zwei Gründe zurückführen. Zum einen verfolgen viele APS-Anbieter einen inkrementellen Entwicklungsansatz, bei dem schrittweise Erweiterungen für bestehende ERP-Systeme entwickelt werden. Zum anderen integrieren einige Anbieter spezialisierte Anwendungen durch die Übernahme von Nischenanbietern als eigenständige Module in das Gesamtsystem (Betge und Leisten 2006, S. 16). In der industriellen Praxis wird nur ein begrenzter Teil der im System verfügbaren Funktionen tatsächlich genutzt. Unternehmen entscheiden sich in der Regel nicht für die vollständige Implementierung aller angebotenen Softwaremodule eines APS-Anbieters. In Einzelfällen kommt es sogar zu einer kombinierten Nutzung von APS-Modulen verschiedener Anbieter. Hier zeigt sich der entscheidende Vorteil einer modularen Systemarchitektur. Die Softwaremodule fungieren als eine Art „Planungswerkzeugkasten“. Unternehmen können daraus gezielt diejenigen Komponenten auswählen, implementieren und integrieren, die für ihre spezifischen Anforderungen relevant sind. So lässt sich auf die Implementierung eines vollständig integriertes und komplexes Gesamtsystems verzichten (Betge und Leisten 2006, S. 16; Fleischmann und Meyr 2003, S. 482; Meyr et al. 2015, S. 101).

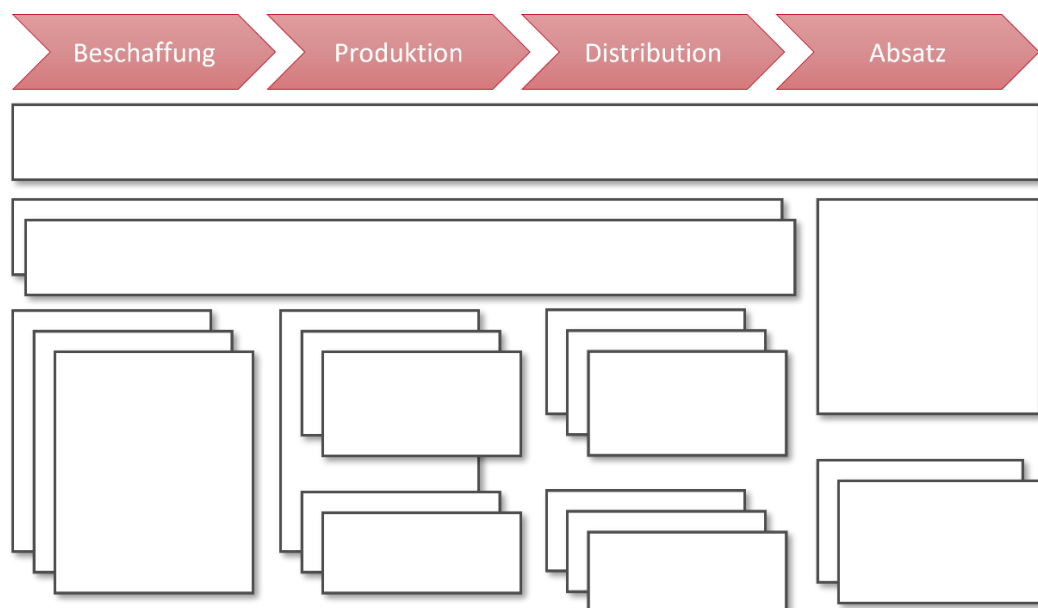


Abbildung 2-4: APS-Module für verschiedene Industriebranchen, in Anlehnung an Meyr et al. 2015, S. 102

Während Abbildung 2-3 ausschließlich die zeitliche und funktionale Dimension abbildet, zeigt Abbildung 2-4 die Ergänzung um SC-spezifische Modulvarianten. Innerhalb des zuvor beschriebenen „Planungswerkzeugkastens“ finden sich nicht nur unterschiedliche APS-Module für verschiedene Planungsbereiche, sondern mitunter auch mehrere Module oder Softwarekomponenten für dasselbe APS-Modul (Lupeikiene et al. 2014, S. 586). APS-Anbieter haben erkannt, dass die Bereitstellung eines einzelnen „Standardmoduls“ oftmals nicht ausreicht, um den Anforderungen unterschiedlicher SC-Typen gerecht zu werden. Module mit identischer

Bezeichnung weisen je nach Branche und SC-Typ unterschiedliche Ausprägungen auf, da die Anforderungen an dieselbe Planungsaufgabe, insbesondere im kurzfristigen Bereich, stark differieren können (Meyr et al. 2015, S. 101). So unterscheiden sich beispielsweise die Anforderungen an kurzfristige Ablaufplanungsmodule in der Konsumgüterindustrie deutlich von denen in der Präzisionsfertigung. Dies unterstreicht die wachsende Bedeutung modularer, anwendungsspezifischer Planungslösungen in modernen APS-Systemen.

Interessanterweise entspricht der tatsächliche Einsatzbereich eines Softwaremoduls nicht immer exakt dessen ursprünglichem Designzweck. Diese Abweichungen treten häufig dann auf, wenn Module über ähnliche Modellierungseigenschaften verfügen und dieselben Lösungsverfahren für unterschiedliche Problemstellungen einsetzbar sind. Ein Beispiel hierfür ist der Einsatz des MP-Moduls zur Bearbeitung von DtP-Aufgaben (Meyr et al. 2015, S. 102).

2.6.2 Hierarchische Planung in den APS-Systemen

Im vorherigen Abschnitt wurde die modulare Struktur von APS-Systemen erläutert. Diese Softwaremodule decken unterschiedliche Problembereiche der Produktionsplanung ab und sind über vertikale sowie horizontale Informationsflüsse miteinander verknüpft (Fleischmann et al. 2015, S. 75). Dabei bestehen zwischen den Softwaremodulen starke inhaltliche Interdependenzen, die die Abhängigkeitsbeziehungen in der klassischen Produktionsplanung widerspiegeln (Betge und Leisten 2006, S. 72–73). Die Planung eines Softwaremoduls basiert oft auf den Ergebnissen eines anderen. Diese gegenseitige Abhängigkeit stellt eine erhebliche Herausforderung für die Entwicklung einer abgestimmten und konsistenten Gesamtplanung dar.

Um dieser Herausforderung zu begegnen, ist die Entwicklung eines geeigneten Koordinationsansatzes unerlässlich, der die bestehenden Interdependenzen angemessen berücksichtigt. Zwischen den Softwaremodulen bestehen erhebliche Unterschiede hinsichtlich ihrer Funktionen, des Detaillierungsgrads und der Planungshorizonte. Zwar könnte eine vollständige, synchrone Modellierung aller Softwaremodule theoretisch zu einer global optimalen Lösung führen, ist dieser Ansatz jedoch in der Praxis aufgrund der hohen mathematischen Komplexität oft nicht realisierbar. Umgekehrt führt eine sukzessive Planung ohne Berücksichtigung dieser Interdependenzen häufig zu suboptimalen Ergebnissen (Betge und Leisten 2006, S. 75–76; Fleischmann et al. 2015, S. 74).

Die hierarchische Planung bietet für diese Problematik ein Rahmenkonzept, das einen ausgewogenen Kompromiss zwischen der praktischen Umsetzbarkeit und der Berücksichtigung der Interdependenzen zwischen den Softwaremodulen darstellt. Sie hat sich insbesondere in der Industrie etabliert und spiegelt sich vor allem in der organisatorischen Struktur von mittelgroßen und großen Unternehmen wider (Kallestrup et al. 2014, S. 61). Der zentrale Gedanke besteht darin,

das Gesamtplanungsproblem in mehrere Ebenen zu unterteilen, wobei jede Ebene durch einen spezifischen Detaillierungsgrad und Aufgabenbereich gekennzeichnet ist (Fleischmann et al. 2015, S. 74–75). Die Hierarchische Produktionsplanung basiert auf fünf wesentlichen Elementen (Stadtler 2015, S. 24–26):

Erstens erfolgt eine **Dekomposition und hierarchische Strukturierung** des Gesamtplanungsproblems, indem es in zwei oder mehr Entscheidungsebenen aufgeteilt wird. Jede Ebene trifft ihre Entscheidungen innerhalb eines von der jeweils übergeordneten Ebene gesetzten Rahmens.

Zweitens dient die **Aggregation** dazu, die Komplexität des Planungsproblems zu reduzieren. Dies geschieht beispielsweise durch die Zusammenfassung von Zeiträumen, Produkten und Ressourcen, indem Produkte zu Produktfamilien gruppiert, Zeiträume auf Wochen-, Monate- oder Jahrbasis aggregiert und Kapazitäten als grobe Produktionsmengen betrachtet werden.

Drittens wird die **hierarchische Koordination** durch eine wechselseitige Abstimmung zwischen den Ebenen erreicht. Dabei setzt die obere Ebene Zielvorgaben, wie beispielsweise Lagerbestände, während die untere Ebene Rückmeldungen zur Machbarkeit der Zielerreichung liefert.

Viertens umfasst die **Modellbildung** die Entwicklung geeigneter Entscheidungsmodelle für jede Ebene. Diese Modelle sollen sowohl die Zielvorgaben der übergeordneten Ebene berücksichtigen, als auch mögliche Reaktionen der untergeordneten Ebenen antizipieren.

Fünftens schließlich erfordert die **Modelllösung** die Auswahl geeigneter Lösungsmethoden, die je nach Modellstruktur von mathematischen Optimierungsverfahren bis hin zu manuellen oder gruppenbasierten Entscheidungsfindungen reichen können.

Diese fünf Elemente der Hierarchischen Produktionsplanung bilden das methodische Fundament moderner APS-Systeme. Tatsächlich lässt sich die modulare Struktur von APS-Systemen direkt aus diesen Prinzipien ableiten. Diese Struktur kann als ein organisatorisch dekomponiertes Produktionsplanungssystem charakterisiert werden (Betge und Leisten 2006, S. 83). Die Hierarchisierung von Planungsaufgaben kann allgemein entweder vertikal oder horizontal erfolgen. In APS-Systemen sind darüber hinaus Mischformen dieser Zerlegungsmöglichkeiten zu finden, die sowohl vertikale als auch horizontale Strukturen kombinieren. Ein komplexes Planungsproblem wird in mehrere Teilprobleme zerlegt, die dann separat in den jeweiligen Softwaremodulen gelöst werden. Dabei werden einerseits auf horizontaler Ebene isoliert nebeneinander unter verschiedenen Zielsetzungen bearbeitet, während sie andererseits aufgrund unterschiedlicher Planungshorizonte eine vertikale hierarchische Strukturierung aufweisen. Besonders hervorzuheben ist, dass die einzelnen Softwaremodule auf horizontaler Ebene starke

wechselseitige Interdependenzen zeigen, sodass sich keine eindeutigen über- und untergeordneten Beziehungen zwischen ihnen etablieren lassen (Betge und Leisten 2006, S. 79).

In APS-Systemen verarbeiten die oberen Softwaremodule aggregierte Daten und erstellen langfristige, grobgranulare Planungen, während die unteren Softwaremodule disaggregierte Informationen nutzen, um detaillierte, kurzfristige Pläne zu entwickeln (Betge und Leisten 2006, S. 84; Fleischmann et al. 2015, S. 75). Üblicherweise steuern die oberen Softwaremodule mehrere nachgeordnete Softwaremodule und erhalten gleichzeitig Feedback aus den unteren Ebenen, wodurch ein über Ebenen hinweg verlaufender Optimierungskreislauf entsteht, der die Anpassungsfähigkeit des Planungssystems sicherstellt (Fleischmann und Meyr 2003, S. 477).

In Kombination mit der zuvor beschriebenen vertikalen und horizontalen Strukturierung bildet sich innerhalb von APS-Systemen ein komplexes, aber leistungsfähiges Netzwerk von Softwaremodulen, das höhere Anforderungen an die Koordinationsmechanismen stellt. Die letzten beiden grundlegenden Elemente der hierarchischen Produktionsplanung, namentlich die Modellbildung und Modelllösung, spiegeln sich dabei in den Entscheidungsmodellen der Hauptmodule sowie in den Funktionen der unterstützenden Module wider.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Konzepte der hierarchischen Planung es ermöglichen, die Gesamtaufgabe in Teilplanungsaufgaben zu zerlegen und dennoch deren Interdependenzen zu berücksichtigen sowie deren Lösungen zu koordinieren. Die moderne Gestaltung von APS-Systemen übernimmt diese Prinzipien der hierarchischen Planung sowohl in ihrer Struktur als auch in ihrer Funktionalität weitgehend, wie sich insbesondere an den kommerziellen APS-Lösungen großer Anbieter wie SAP oder AspenTech zeigt (Lebreton et al. 2015, S. 341).

2.6.3 Kollaborative Planung

In den vorangegangenen Abschnitten über die Softwaremodule und die hierarchische Planungsstruktur von APS-Systemen lag der Fokus vor allem auf unternehmensinternen Planungsfunktionen. Für eine Optimierung auf Ebene der gesamten SC reicht jedoch die ausschließliche Konzentration auf interne Datenintegrationen nicht aus. Obwohl die Einführung eines einheitlichen APS-Systems für die gesamte SC theoretisch denkbar ist, gelingt dies in der Praxis nur selten. Die meisten Unternehmen scheitern bereits an der vollständigen Integration ihrer internen SC (Santa-Eulalia et al. 2011, S. 185–186). Um den Anforderungen dynamischer Umfeldler und der Beteiligung mehrerer SC-Partner gerecht zu werden, gewinnt die

planungsdomänenübergreifende ³ sowie unternehmensübergreifende Kollaborative Planung zunehmend an Bedeutung (Betge und Leisten 2006, S. 51; Kilger et al. 2015, S. 257).

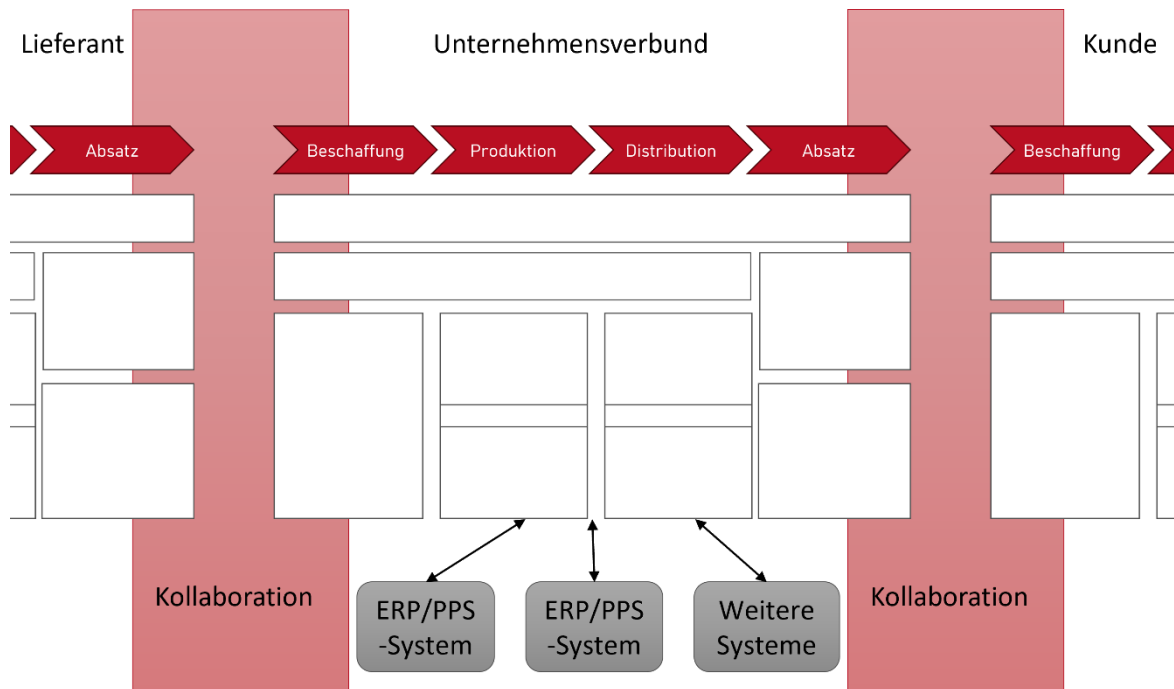


Abbildung 2-5: Integrationsarchitektur verschiedener APS-Systeme, in Anlehnung an Betge und Leisten 2006, S. 10; Meyr et al. 2015, S. 104.

Kollaborative Planung bezeichnet den Informationsaustausch und die gemeinsame Entscheidungsfindung zwischen Unternehmen auf Planungsebene. Ziel ist es, Zielkonflikte und Informationsasymmetrien zwischen den autonomen Einheiten einer SC zu überbrücken und so einen abgestimmten, konsistenten Plan zu erstellen (Kilger et al. 2015, S. 257). Wie in Abbildung 2-5 dargestellt, können APS-Systeme verschiedene ERP-, PPS- oder weitere Systeme integrieren, um eine Gesamtplanung unternehmensintern zu ermöglichen. Die „Kollaboration“ zwischen verschiedenen APS-Systemen innerhalb der SC erfolgt bislang überwiegend über Schnittstellen zu Lieferanten und Kunden. Die in Abbildung 2-5 dargestellten Kollaborationsbeziehungen bestehen typischerweise aus bilateralen Schnittstellen: Die Beschaffungsseite des APS-Systems eines Unternehmens ist mit der Absatzseite des APS-Systems seiner Kunden verknüpft, während dessen eigene Absatzseite wiederum mit der Beschaffungsseite des APS-Systems seiner Lieferanten gekoppelt ist (Betge und Leisten 2006, S. 10–11; Meyr et al. 2015, S. 104).

Einige Softwareprodukte von APS-Anbietern, wie z. B. SAP Advanced Planner and Optimizer (APO), bieten spezielle Module für die kollaborative Planung an und unterstützen Funktionen wie

³ Im Kontext dieser Arbeit ist unter einer Domäne eine Fabrik zu verstehen.

kollaborative Prognosen. Diese Funktionen beschränken sich jedoch häufig auf manuelle Prozesse und ermöglichen nur einen begrenzten Datenaustausch (Kilger et al. 2015, S. 265–267).

Obwohl die kollaborative Planung derzeit sowohl in der Praxis als auch in der Wissenschaft stark diskutiert wird, gestaltet sich ihre Umsetzung deutlich komplexer als theoretisch angenommen. Besonders anspruchsvoll ist dabei die Verknüpfung unterschiedlicher Geschäftsmodelle verschiedener Unternehmen. Eine tiefgreifende, unternehmensübergreifende Integration durch APS-Systeme erfordert die Bereitschaft der beteiligten Unternehmen, in einem schnelllebigen und wettbewerbsintensiven Umfeld strategische Informationen, Echtzeitdaten, Ressourcen sowie Gewinne und Verluste zu teilen. Da diese Aspekte sensible Kerninteressen betreffen, ist eine vollständige Transparenz nur schwer zu realisieren. Daraus ergeben sich zentrale Herausforderungen für die Umsetzung: die Standardisierung von Stammdaten, die Steuerung von Zugriffsrechten sowie die Definition gemeinsamer Planungsprozesse (Santa-Eulalia et al. 2011, S. 186).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass kollaborative Planung einen entscheidenden Schritt vom unternehmensinternen Integrationsansatz hin zur organisationsübergreifenden Koordination darstellt. Trotz ihres hohen Potenzials sind für eine erfolgreiche Umsetzung nicht nur geeignete technische Plattform erforderlich, sondern vor allem auch eine enge Zusammenarbeit der Unternehmen.

2.6.4 Anwendungsbereiche und Markttrend der APS-Systeme

Derzeit finden APS-Systeme in verschiedenen Branchen eine breite Anwendung, wobei sich ihre Einsatzweise je nach Branchenspezifika deutlich unterscheidet. In der Prozessindustrie werden APS-Systeme vorwiegend zur Bewältigung komplexer Produktionsnetzwerke und ressourcenbedingter Engpässe genutzt, insbesondere in halbkontinuierlichen Industriezweigen wie der Metallverarbeitung, der Lebensmittel- und Getränkeindustrie sowie der Chemiebranche. Im Gegensatz dazu verläuft die Einführung von APS-Systemen in der diskreten Fertigung langsamer. Die Kapazitätsstrukturen in Branchen wie der Automobil- oder Elektronikindustrie sind häufig einfacher, und viele Anforderungen können bereits durch ERP-Systeme abgedeckt werden. Mit zunehmendem Bedarf an der Reduzierung von Rüstzeiten, der Personaleinsatzplanung und dem Management gemeinsamer Ressourcen gewinnen APS-Systeme jedoch auch in diesem Bereich an Bedeutung. In der Transportbranche zählen APS-Systeme seit Langem zum Standard für operative und strategische Planungsaufgaben wie Routenoptimierung, Fahrer- und Fahrzeugdisposition oder die Gestaltung von Logistiknetzwerken. Darüber hinaus kommen APS-Systeme verstärkt in komplexen Personaleinsatzszenarien zum Einsatz, etwa in der Montageindustrie, wo

Arbeitszeitmodelle, Qualifikationsprofile und Schichtplanung berücksichtigt werden müssen (Wiers und Kok 2018, S. 15–17).

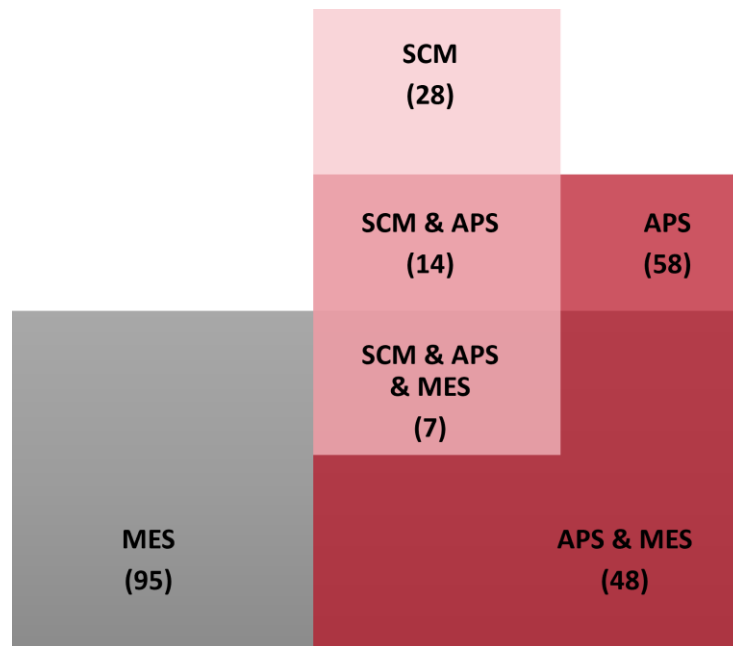


Abbildung 2-6: APS-Systeme auf dem Anbietermarkt, in Anlehnung an Wiendahl und Kluth 2018, S. 16

Eine Marktanalyse der Trovarit AG aus dem Jahr 2018 verdeutlicht eine zunehmende Verbreitung und Weiterentwicklung von APS-Systemen. Insgesamt 119 Softwarewerkzeuge wurde hinsichtlich der Schwerpunkte und ihrer Überlappungen untersucht. Wie Abbildung 2-6 veranschaulicht, verfügen 58 der untersuchten Softwarewerkzeuge über APS-Funktionalitäten, was rund 49 % der Gesamtzahl entspricht. Gleichzeitig wird in der Abbildung verdeutlicht, dass APS-Anbieter ihre Lösungen zunehmend an spezifische Branchenbedürfnisse anpassen. 48 APS-Werkzeuge konzentrieren sich primär auf MES-Funktionalitäten, was etwa 40 % aller Werkzeuge ausmacht. 12 APS-Werkzeuge decken schwerpunktmäßig SCM-Anforderungen ab, während lediglich 7 APS-Werkzeuge umfassende Funktionen für beide Bereiche bieten. Für Anwender ergibt sich daraus die Notwendigkeit, bei der Softwareauswahl besonders auf folgende Aspekte zu achten: Erstens muss eine klare Definition der Kernanforderungen entsprechend der Branchenzugehörigkeit und Betriebsgröße erfolgen. Zweitens ist eine gründliche Bewertung der Systemskalierbarkeit für künftige Integrationsbedarfe unerlässlich. Drittens kann die Einbindung externer Experten für eine neutrale und objektive Lösungsbewertung sichergestellt werden (Wiendahl und Kluth 2018, S. 16–17).

2.7 Definition des Anforderungskatalogs

Der Untersuchungsbereich dieser Arbeit bezieht sich auf den Anforderungskatalog, der erstellt wird, um die Anforderungen zur Bewältigung von Defiziten der APS-Systeme festzulegen. Die Begriffe

Anforderungskatalog und Lastenheft werden oftmals synonym verwendet. Ein Anforderungskatalog stellt jedoch eine strukturierte Auflistung von Anforderungen dar und bildet typischerweise einen Input oder einen Bestandteil des Lastenhefts, welches die umfassenden Projektforderungen zusammenfasst (t2informatik 2019; SOFTSELECT 2025). Insbesondere im Kontext der Einführung oder Anpassung von Softwaresystemen bildet der Anforderungskatalog die Grundlage für eine gezielte technische Umsetzung der Lösungsansätze (Open Next 2024).

2.7.1 Abgrenzung zur Anforderungsdefinition

Die Anforderungsdefinition ist gemäß der internationalen Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 ein Teilprozess des Requirements Engineerings, das wiederum ein Teilgebiet des Softwareengineering darstellt. Sie folgt unmittelbar auf die Problemanalyse eines technischen Informationssystems (Lackes und Siepermann 2018; Myrach 2019). Die Implementierung des Prozesses zur System-/Softwareanforderungsdefinition wird in der internationalen Norm ISO/IEC/IEEE 12207:2017 ausführlich beschrieben. Die Anforderungsdefinition beinhaltet eine umfassende Beschreibung von Anforderungen und Kriterien und ist daher deutlich ausführlicher als ein Anforderungskatalog. Die Dokumentation von Anforderungen spielt eine zentrale Rolle innerhalb der Anforderungsdefinition und ähnelt in diesem Punkt dem Anforderungskatalog. Die Anforderungen zur Bewältigung von Defiziten in APS-Systemen werden nach der Zielsetzung in dieser Arbeit in Kapitel 5 im Anforderungskatalog dokumentiert.

2.7.2 Kontextabgrenzung von Anforderungen

Bei den APS-Systemen in dieser Arbeit handelt es sich um ein bestehendes und zu verbesserndes Softwaresystem. Im Teilgebiet der Anforderungen im Softwareengineering existieren gemäß der Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 unterschiedliche Arten von Anforderungen, die sich jeweils auf verschiedene Anwendungsbereiche und Zielobjekte beziehen. Ein Softwaresystem kann gleichzeitig sehr vielfältige Anwendungsbereiche abdecken. Daher ist es notwendig, den Geltungsbereich der in dieser Arbeit betrachteten Anforderungen klar zu definieren und abzugrenzen.

Im Rahmen der Kontextabgrenzung ist es erforderlich, die Umgebung des APS-Systems zu beschreiben, da die Anforderungen in engem Zusammenhang mit dieser stehen. Dafür wird zwischen dem Softwaresystem, dem Systemkontext und der irrelevanten Umgebung differenziert. Der Systemkontext umfasst relevante Aspekte nach Pohl und Rupp (2015, S. 14), die für die Anforderungen des Softwaresystems von Bedeutung sind und nicht durch die Entwicklung des Softwaresystems beeinflusst werden können. Diese beiden Bereiche werden voneinander getrennt, indem festgelegt wird, welche Aspekte vom Softwaresystem erfasst werden und welche weiterhin zur Umgebung gehören. Der Systemkontext wird von der irrelevanten Umgebung abgegrenzt,

welche keinen Einfluss auf die Anforderungen des Systems hat (Pohl und Rupp 2015, S. 13–20). Die Aspekte im Systemkontext in dieser Arbeit sind in Abbildung 2-7 dargestellt und umfassen:

- Personen (Stakeholder⁴, APS-Ingenieure, Experten)
- Systeme im Betrieb (andere Systeme wie ERP, MES; Hardware)
- Prozesse (technische Prozesse oder Geschäftsprozesse)
- Ereignisse
- Dokumente (Pohl und Rupp 2015, S. 14).

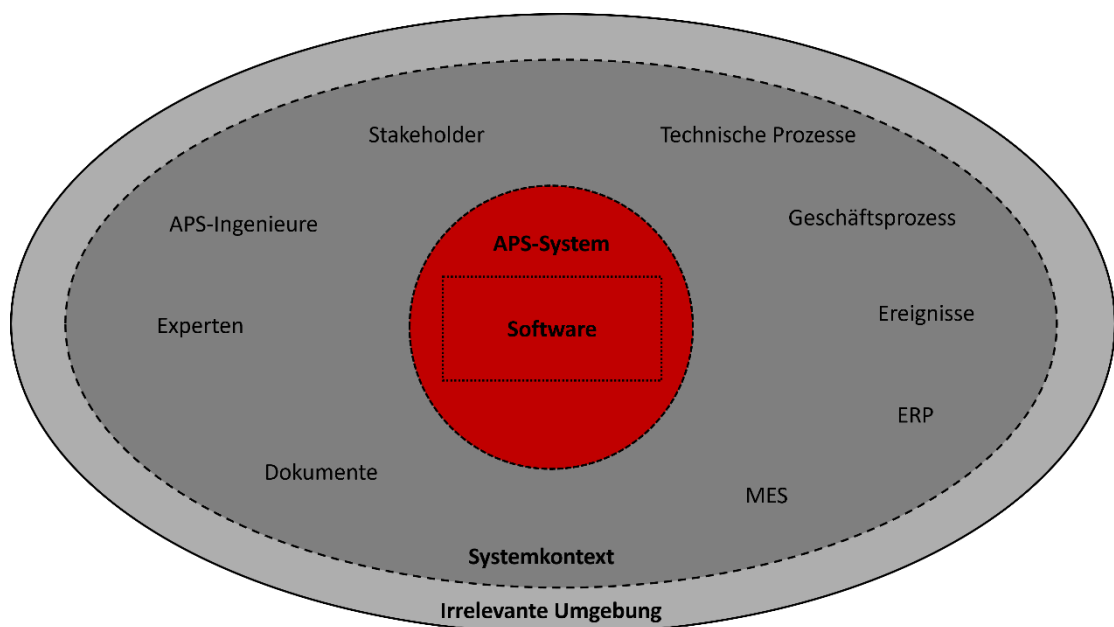


Abbildung 2-7: Definition des Systemkontexts von APS-Softwaresystem, in Anlehnung an der Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 und Pohl und Rupp 2015, S. 16

2.7.3 Formulierung von Anforderungen

Die Anforderungen werden in natürlicher Sprache in den Anforderungskatalog dokumentiert. Dies gewährleistet eine gute Lesbarkeit und ermöglicht eine universelle Anwendbarkeit zur Beschreibung verschiedenster Sachverhalte ohne spezielles Notationswissen (Pohl und Rupp 2015, S. 61). Um die Interpretationsfehlern der Aussage zu vermeiden, wird die Verbindlichkeit der

⁴ Stakeholder umfassen alle natürlichen oder juristischen Personen, die Anforderungen an ein System direkt oder indirekt beeinflussen. Dazu zählen sowohl zukünftige Nutzer als auch Interessengruppen, die das System nicht selbst verwenden, aber ein berechtigtes Interesse daran haben (Pohl und Rupp 2015, S. 3–4).

Anforderungen mittels Modalverben gemäß der internationalen Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 und Pohl und Rupp (2015, S. 58–60) klassifiziert. Eine Anforderung, die mit „muss“ eingeleitet wird, stellt eine rechtlich bindende und verpflichtende Anforderung dar. „Sollte“ kennzeichnet eine empfohlene Anforderung. „Wird“ beschreibt eine zukünftige Anforderung und kann auch zur Zielerklärung oder zur Nutzungseinschränkung verwendet werden. „Kann“ drückt eine wünschenswerte Anforderung aus. Anforderungen treten unter logischen („falls“) oder zeitlichen („sobald“) Bedingungen auf. Zur Vermeidung von Mehrdeutigkeiten wird auf „wenn“ verzichtet, da es beide Bedingungstypen ausdrücken kann. Schließlich sind Negationen, Passiv-Formulierung oder unklare Formulierung zu vermeiden.

In dieser Arbeit wird auf die Verwendung von Satzschablonen verzichtet, da keine ausreichende Akzeptanz für stark normierte Vorgehensweisen gegeben ist. Stattdessen wird der stilistische Freiheitsgrad bewusst eingeschränkt, um eine klare syntaktische Eindeutigkeit der Anforderungen sicherzustellen und deren Qualität zu erhöhen (Pohl und Rupp 2015, S. 61).

3 Methodendefinition der systematische Literaturrecherche

Dieses Kapitel bietet eine umfassende Darstellung der in dieser Arbeit angewandten Methodik der SLR. Zunächst werden die Gründe für die Durchführung einer SLR erläutert und die zugrunde liegenden Forschungsfragen definiert. Im Anschluss werden der Suchstring, die Datenbanken und die Suchkriterien festgelegt. Ergänzt wird die Datenbanksuche durch eine Zitatsuche vor- und rückwärts. Abschließend wird das Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses (PRISMA)-Flussdiagramm präsentiert, welches die einzelnen Schritte der SLR dokumentiert.

3.1 Begründung der systematischen Literaturrecherche

Eine SLR ist ein etabliertes Verfahren, um den aktuellen Stand der Forschung zusammenzufassen, bestehende Forschungslücken zu identifizieren und einen theoretischen Rahmen für weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen bereitzustellen (Kitchenham und Charters 2007, S. 3; Petticrew und Roberts 2006, S. 21). Diese Ziele decken sich mit den Zielsetzungen dieser Arbeit, da die Ableitung der Defizite von APS-Systemen sowie die präzise Erfassung entsprechender Anforderungen eine umfassende Analyse der bestehenden wissenschaftlichen Literatur erfordert. Durch die strukturierte und methodische Vorgehensweise gewährleistet die SLR eine transparente, nachvollziehbare und reproduzierbare Analyse, die als solide Grundlage für die Identifikation von Optimierungspotenzialen dient (Fink 2014, S. 3). Darüber hinaus ist der Einsatz einer SLR insbesondere dann gerechtfertigt, wenn die Wirksamkeit eines Ansatzes noch unklar ist und ein umfassender Überblick über den aktuellen Forschungsstand erforderlich wird (Petticrew und Roberts 2006, S. 21). Daher ist die Wahl dieser Methodik auch besonders geeignet, um die aktuelle Ausgestaltung von APS-Systemen in der industriellen Produktion zu erfassen und deren Wirksamkeit sowie den Verbreitungsgrad zu beurteilen.

3.2 Definition der Forschungsfrage

Eine SLR beginnt mit der Definition der Forschungsfrage, die den Rahmen für die folgenden Schritte vorgibt. Die Forschungsfrage wird präzise formuliert und leitet die gesamte SLR, um die benötigten Informationen aus der Literatur zu erhalten.

Bislang wurde eine Vielzahl an wissenschaftlichen Publikationen zum Themengebiet von APS-Systemen veröffentlicht, da das Konzept bereits Mitte der 1990er Jahre entwickelt wurde (Lupeikiene et al. 2014, S. 584). Eine initiale Literatursuche in der Datenbank Web of Science nach den Suchbegriffen „Advanced Planning and Scheduling System“ und „APS“ in Titel und Abstract ergab bereits 34.805 Treffer. Diese hohe Zahl verdeutlicht die enorme thematische Breite und bekräftigt die Notwendigkeit, die Forschungsfrage präzise zu formulieren und methodisch

einzugrenzen, um irrelevante Publikationen gezielt ausfiltern zu können (Fink 2014, S. 21). Ausgehend von der Problemstellung und Zielsetzung dieser Masterarbeit wird der thematische Fokus auf die bestehenden Defizite von APS-Systemen gelegt. Die daraus abgeleitete Forschungsfrage lautet:

1. „Welche Anforderungen sind erforderlich, um bestehende Defizite von APS-Systemen in der industriellen Produktion zu bewältigen?“

Ergänzend dazu wird im Rahmen dieser Arbeit auch die folgende sekundäre Forschungsfrage betrachtet:

2. „Welche bestehenden Lösungsansätze zur Bewältigung dieser Defizite finden sich in der aktuellen Literatur?“

3.3 Suchbegriffe

Dieser Abschnitt befasst sich mit den Suchbegriffen, die für die Datenbanksuche verwendet werden. Dabei wird auf die Verwendung von Akronymen und Synonymen eingegangen. Abschließend wird der Suchstring zur Beantwortung der Forschungsfrage definiert.

3.3.1 Akronyme

In der Literatur werden verschiedene Akronyme verwendet, um Systeme zur Planung und Steuerung von Produktionsprozessen in der Industrie zu beschreiben. Wie in Abschnitt 2.5.1 erläutert, findet dabei insbesondere das Akronym APS weite Verbreitung. Es steht in der aktuellen Forschungsliteratur sowohl für „Advanced Planning and Scheduling“ als auch für „Advanced Planning System“. Aufgrund seiner hohen Relevanz und Standardisierung in diesem Themenbereich konnte APS als eines der zentralen Schlüsselwörter für die systematische Literaturrecherche dieser Arbeit definiert werden.

Nach dem Akronym APS wurde mit weiteren relevanten Suchbegriffen in den Fachartikeln der Datenbank Science Direct gesucht. Dabei wurden 5578 Fachartikel gefunden, die jedoch nicht spezifisch genug zu filtern waren. Das Akronym APS steht in verschiedenen Fachbereichen für unterschiedliche Fachbegriffe. Dies führte dazu, dass ein großer Teil der Suchergebnisse Literatur enthielt, deren Forschungsinhalte nicht mit dem in dieser Masterarbeit untersuchten Informationssystem in Zusammenhang standen. Aus diesem Grund wird auf die weitere Verwendung vom Akronym APS als Suchbegriff in der Datenbanksuche verzichtet.

3.3.2 Synonyme

Um ein umfassendes Verständnis der Literatur in einem bestimmten Themenbereich zu gewährleisten, werden unterschiedliche Bezeichnungen dieses Bereichs berücksichtigt und in die

Suche einbezogen. Ein effektives Instrument zur Bewältigung dieser Herausforderung stellt ein Thesaurus dar. Dabei handelt es sich um ein kontrolliertes Vokabular, das eine einheitliche Methode zur Erschließung von Informationen in verschiedenen Disziplinen bietet, in denen für dasselbe Konzept unterschiedliche Termini verwendet werden (Fink 2014, S. 23).

Der Thesaurus des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) in der Version vom Januar 2025 wird in dieser Arbeit verwendet. IEEE ist die führende internationale Organisation für Technik und Ingenieurwesen, die sich für die Weiterentwicklung technologischer Innovationen zum Wohle der Gesellschaft engagiert. Im ausgewählten Thesaurus sind keine Synonyme für den Begriff „Advanced Planning and Scheduling System“ verzeichnet (IEEE Thesaurus 2025).

Die Definition des Advanced Planning Systems in Abschnitt 2.5.1 entspricht der von APS-Systemen. Daher wird der Begriff „Advanced Planning System“ als ein Synonym in die Suche mit einbezogen. Die Suche nach „Advanced Planning and Scheduling System“ und „Advanced Planning System“ in der Datenbank Web of Science lieferte 55.320 Treffer, was ebenfalls zu einer zu großen Menge an Ergebnissen führte. Weitere relevante Suchbegriffe werden benötigt. Aus den drei unterstrichenen Schlüsselbegriffen der ersten Forschungsfrage ergeben sich ein Überblick des Suchstrings:

(advanced planning and scheduling system OR advanced planning system)

AND

(deficiency OR limitation OR lack OR shortcoming)

AND

(industrial production OR manufacturing OR industry 4.0).

3.3.3 Verknüpfungen

Kombinationen von Suchbegriffen mithilfe von Booleschen Operatoren können die Anzahl der Artikel in einer Datenbank so weit einzuschränken, dass detailliertere Einschlusskriterien geprüft werden können (Borrego et al. 2014, S. 54). Unter den Booleschen Operatoren werden die Begriffe „AND“, „OR“ und „NOT“ im Kontext einer Literaturrecherche verstanden. Durch die Verwendung des „AND“-Operators werden alle angegebenen Suchbegriffe in der Suchergebnisse erhalten. Im Gegensatz dazu ermöglicht der „OR“-Operator, dass mindestens einen der angegebenen Suchbegriffe in der Suchergebnisse enthalten wird. Durch den „NOT“-Operator werden bestimmte Begriffe aus der Suche ausgeschlossen (Fink 2014, S. 24–25).

Die Verwendung von „AND“- und „OR“-Operatoren wird im Überblick des Suchstrings am Ende des vorherigen Abschnitts dargestellt. Auf den Einsatz des „NOT“-Operators wird in dieser Arbeit

verzichtet, da durch dessen Verwendung möglicherweise unbeabsichtigt relevante Artikel ausgeschlossen werden könnten (Fink 2014, S. 25).

3.4 Datenbanken

Zur Auffindung von wissenschaftlicher Literatur sind digitale online Datenbanken eine der wichtigsten Ressourcen (Fink 2014, S. 15). Die Recherche in mehreren Datenbanken stellt sicher, dass relevante Studien gefunden werden, unabhängig davon, in welchem Fachgebiet sie veröffentlicht und indexiert wurden (Borrego et al. 2014, S. 56). Eine Beschränkung auf nur eine einzige Datenbank birgt hingegen das Risiko, wichtige Publikationen zu übersehen. In dieser Arbeit werden daher die Datenbanken ScienceDirect, Web of Science und IEEE Xplore genutzt, um sowohl das Themenfeld der industriellen Produktion als auch den Bereich der Softwaresysteme angemessen abzudecken.

3.5 Suchkriterien

Um relevante Literatur aus den Datenbanken herauszufiltern, werden eindeutig begründete Suchkriterien in Bezug auf das Publikationsjahr, die Sprache und die Art der Literatur festgelegt (Borrego et al. 2014; Fink 2014, S. 5–21). Im Rahmen der bisherigen Schritte wurde festgestellt, dass in den letzten zehn Jahren bereits mehrere Literaturrecherchen sowohl zu dem übergeordneten Thema der APS-Systeme als auch zur Ableitung der Anforderungen an APS-Systeme existieren. Ein Teil dieser Arbeiten verwendete standardisierte Konzepte des Softwareengineerings, um die Merkmale von APS-Systemen aus systematischer Perspektive in funktionale und Qualitätsanforderungen zu klassifizieren und eine Referenzarchitektur für APS-Systeme zu entwickeln (Vidoni und Vecchietti 2015a, S. 331–338; Vidoni und Vecchietti 2016, S. 434–439).

Im Gegensatz dazu fokussiert sich die vorliegende Arbeit auf die Identifikation und Analyse bestehender Defizite von APS-Systemen in der modernen industriellen Produktion, insbesondere im Kontext von Industrie 4.0. Die daraus abgeleiteten Anforderungen basieren somit direkt auf identifizierten Defiziten aktueller Systeme und repräsentieren die bislang noch unzureichend erfüllten Bedarfe. Durch diesen Ansatz unterscheidet sich diese Arbeit deutlich von bisherigen Literaturübersichten. Der Betrachtungszeitraum wird in Anlehnung an die erstmalige Einführung des Konzepts „Industrie 4.0“ gewählt. Daher werden in dieser SLR die Literatur aus dem Zeitraum von Januar 2011 bis Dezember 2024 berücksichtigt. Zudem wird ausschließlich Literatur einbezogen, die in englischer Sprache verfasst ist, um eine breite internationale wissenschaftliche Relevanz und Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

Wissenschaftliche Artikel, die in Fachzeitschriften oder auf wissenschaftlichen Konferenzen veröffentlicht wurden, werden in dieser SLR einbezogen. Weitere berücksichtigte Literatur sind

Bücher und Dissertationen. Um eine möglichst umfangreiche Suche zu gewährleisten, wird während der Datenbanksuche bewusst auf eine gezielte Filterung nach Themengebieten auf der Plattform verzichtet. Die gefundenen Literaturquellen müssen elektronisch zugänglich und kostenfrei verfügbar sein.

3.6 Zitatsuche

Eine zweite Methode zur Identifikation relevanter Literatur ist die Zitatsuche, welche in dieser Arbeit anschließend an die Datenbanksuche durchgeführt wird. Diese Methode ergänzt die klassische Datenbanksuche mit Suchbegriffen und ermöglicht eine tiefere Vernetzung der Literaturquellen. Dadurch werden hochqualitative Literaturquellen mit geringem Zeitaufwand für die SLR gesichert (Papaioannou et al. 2010, S. 116–121). Die Durchführung unterteilt sich in eine Zitatsuche rückwärts und in eine Zitatsuche vorwärts. Bei der Zitatsuche rückwärts werden die Literaturverzeichnisse der identifizierten wissenschaftlichen Artikel überprüft. Bei der Zitatsuche vorwärts wird analysiert, welche späteren Arbeiten die identifizierten Artikel zitiert haben (Borrego et al. 2014, S. 57).

3.7 PRISMA-Flussdiagramm

Während der Durchführung der SLR soll die Anzahl der in jedem Schritt einbezogenen und ausgeschlossenen Literaturquellen transparent dargestellt werden (Borrego et al. 2014, S. 57). Hierfür kann das PRISMA-Flussdiagramm verwendet werden, um die Berichterstattung der SLR zu verbessern (Moher et al. 2009, S. 1007). Ohne einem vordefinierten Übersichtsprotokoll für SLR besteht die Gefahr, dass die Auswahl einzelner Studien oder deren Analyse von den Erwartungen der Forschenden beeinflusst wird (Kitchenham und Charters 2007, S. 12). Das in dieser Arbeit verwendete PRISMA-Flussdiagramm wird in Abbildung 3-1 dargestellt. Basierend auf dem ursprünglichen Modell werden die einzelnen Schritte individuell angepasst. Das Diagramm besteht aus vier Hauptschritten: „Suche“, „Screening“, „Bewertung“ und „Synthese“, die im Folgenden detailliert erläutert werden.

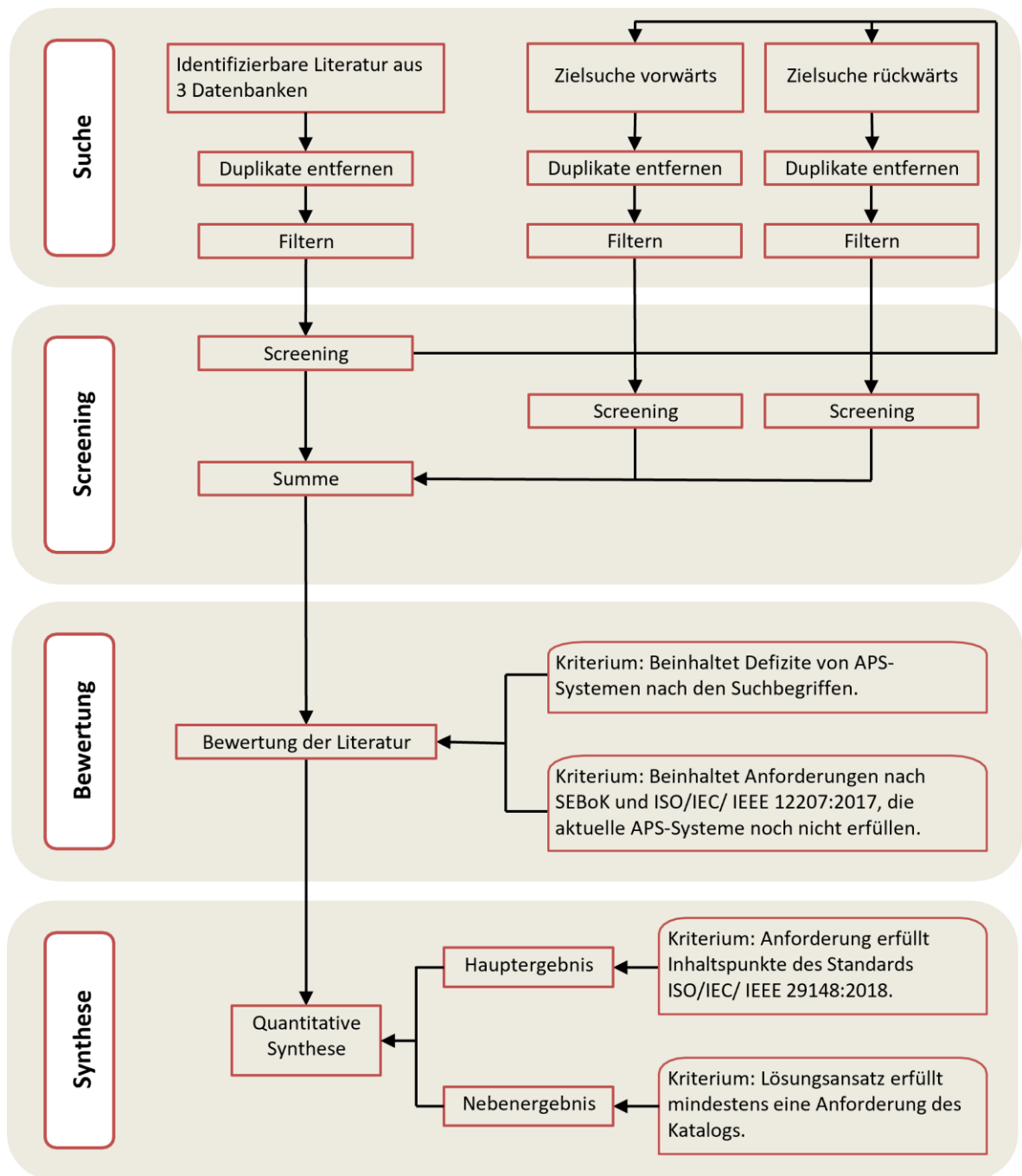


Abbildung 3-1: PRISMA-Flussdiagramm, in Anlehnung an Borrego et al. 2014, S. 58 und Liberati et al. 2009

3.7.1 Suche

Die Vorgehensweise der Suche wird in diesem Abschnitt erläutert. Zunächst erfolgt eine Datenbanksuche, bei der in den festgelegten Datenbanken mithilfe des in Abschnitt 3.3.2 definierten Suchstrings recherchiert wird. Anschließend werden Duplikate aus den drei Datenbanken entfernt. Die in Abschnitt 3.5 definierten Suchkriterien dienen als Filter, um die Relevanz der gefundenen Literatur sicherzustellen.

Darauf aufbauend erfolgt eine Zitatsuche vorwärts und rückwärts, bei der ebenfalls die zuvor definierten Suchkriterien zur Anwendung kommen. Zu beachten ist, dass die Zitatsuche auf den im zweiten Schritt des PRISMA-Flussdiagramms, dem Screening, identifizierten Publikationen basiert, die ursprünglich aus der Datenbanksuche hervorgegangen sind. Nach der Entfernung von eventuellen Duplikaten werden die neu identifizierten Quellen ebenfalls einem Screening unterzogen, um ihre Relevanz und wissenschaftliche Qualität zu überprüfen.

3.7.2 Screening

Im zweiten Schritt des PRISMA-Flussdiagramms erfolgt die Literatursuche hierarchisch nach dem Titel, dem Abstract und dem Inhalt der verbleibenden Literatur. Literatur, die nicht die Suchbegriffe „Advanced Planning and Scheduling“ oder „Advanced Planning System“ beinhaltet, wird ausgeschlossen. Zudem wird überprüft, ob diese Suchbegriffe im richtigen Kontext auftreten. Die geprüfte Literatur muss sich spezifisch auf die Anwendung von APS-Systemen aus der IT-Branche in der industriellen Produktion beziehen. Wissenschaftliche Artikel, in denen diese beiden Suchbegriffe lediglich beiläufig im Text erwähnt werden, ohne dass eine vertiefte Auseinandersetzung mit dem Thema erfolgt, werden nicht einbezogen. Dabei wird der Grund für die Verwerfung jeder Literatur dokumentiert, um Transparenz zu gewährleisten (Kitchenham und Charters 2007, S. 20). Die Dokumentation erfolgt in jedem der vier Schritte des PRISMA-Flussdiagramms. Die Summe der nach dem Screening verbliebenen Literatur wird anschließend im nächsten Schritt weiterbearbeitet.

3.7.3 Bewertung

Im dritten Schritt, der Bewertung, erfolgt die inhaltliche Beurteilung der im vorherigen Schritt identifizierten Literaturquellen. Berücksichtigt werden dabei insbesondere die Arbeiten, die bestehende Defizite von APS-Systemen thematisieren. Dies umfasst Beiträge, in denen Suchbegriffe in Abschnitt 3.3 wie „deficiency“, „limitation“, „lack“ oder „shortcoming“ im Zusammenhang mit APS-Systemen verwendet werden. Literatur, die ausschließlich theoretische Grundlagen oder eine allgemeine Übersicht zu APS-Systemen bietet, wird hingegen ausgeschlossen. In diesem Schritt werden die Defizite von APS-Systemen in der industriellen Produktion aus der verbleibenden Literatur extrahiert.

Der Software Engineering Body of Knowledge (SEBoK) definiert Systemanforderungen wie folgt: *„Systemanforderungen sind alle Anforderungen auf Systemebene, die die Funktionen beschreiben, die das System als Ganzes erfüllen soll, um die Bedürfnisse und Anforderungen der Stakeholder zu befriedigen. Sie werden in einer geeigneten Kombination aus textuellen Aussagen, Ansichten und*

nicht-funktionalen Anforderungen ausgedrückt“⁵ (SEBoK Editorial Board 2014, S. 290). Eine Anforderung ist gemäß der internationalen Norm ISO/IEC/IEEE 12207:2017 „eine Aussage, die eine betriebliche, funktionale oder konstruktive Eigenschaft oder Einschränkung eines Produkts (...) identifiziert und die eindeutig, testbar oder messbar sowie für die Akzeptanz des Produkts (...) erforderlich ist“⁶. In dieser Arbeit bezieht sich das betrachtete Informationssystem auf das APS-System, das als ein Produkt im Sinne der genannten Definitionen verstanden wird (Smart Businessplan 2025). Literaturquellen, die Anforderungen in diesem Sinne behandeln und zugleich explizit darauf hinweisen, dass diese Anforderungen durch bestehende APS-Systeme derzeit noch nicht erfüllt werden, werden ebenfalls in der qualitativen Synthese einbezogen.

3.7.4 Qualitative Synthese

Die Durchführung einer qualitativen Synthese stellt den abschließenden Schritt der SLR dar (Borrego et al. 2014, S. 60). In diesem Schritt werden die extrahierten Defizite auf Basis des SEBoK in konkrete Anforderungen überführt. Dabei ist sicherzustellen, dass sowohl die im dritten Schritt identifizierten Anforderungen als auch die aus den Defiziten abgeleiteten Anforderungen innerhalb des in Abschnitt 2.7.2 definierten systembezogenen Kontexts liegen. Abschließend wird überprüft, ob alle Anforderungen den Vorgaben gemäß der internationalen Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 entsprechen, um in den Anforderungskatalog zur Verbesserung von APS-Systemen in der industriellen Produktion aufgenommen zu werden.

Da das APS-System ein Softwaresystem ist, werden sowohl die System Requirements Specification (SyRS) als auch die Software Requirements Specification (SRS) gemäß der Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 als konzeptionelle Referenzrahmen zur Strukturierung der Anforderungen herangezogen. Die SyRS- und SRS-Gliederungen bieten jeweils eine Rahmenstruktur zur systematischen Dokumentation von Anforderungen auf System- und Softwareebene. Es ist jedoch zu beachten, dass es sich bei diesen Standardgliederungen lediglich um empfohlene Rahmenstrukturen handelt, da keine universell optimale Gliederung für alle Systemarten existiert. Darüber hinaus besteht das Ziel dieser Arbeit nicht darin, ein formales Anforderungsdokument für ein konkretes System- oder Softwareentwicklungsprojekt zu erstellen, sondern vielmehr in der systematischen Zusammenstellung und Analyse der in wissenschaftlicher Literatur beschriebenen Anforderungen an APS-Systeme. Dementsprechend wird die Standardgliederung adaptiert und bei Bedarf um neue, literaturbasierte Anforderungskategorien ergänzt (Pohl und Rupp 2015, S. 39–41).

⁵ Eigene Übersetzung aus dem Englischen.

⁶ Eigene Übersetzung aus dem Englischen.

Die im Rahmen der SLR identifizierten Anforderungen werden in die Rahmenstrukturen eingegliedert, um den Anforderungskatalog zur Bewältigung von Defiziten der APS-Systemen in der industriellen Produktion zu entwickeln. Darüber hinaus werden bereits bestehende Lösungsansätze aus den identifizierten Literaturquellen herausgearbeitet, die zur Bewältigung der Defizite von APS-Systemen beitragen und mindestens eine der im Anforderungskatalog formulierten Anforderungen erfüllen. Sie werden als Nebenergebnis anhand des Anforderungskatalogs eingeordnet und diskutiert.

Die Ergebnisse der SLR werden in Anhang A und B dargestellt. Anhang A orientiert sich strukturell am Aufbau des Anforderungskatalogs. Innerhalb dieser Gliederung erfolgt die Auflistung alphabetisch, um eine klare Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten. Anhang B bietet eine Übersicht der identifizierten Lösungsansätze sowie der von ihnen erfüllten Anforderungen aus dem Katalog. Die beiden Tabellen in Anhang fördern die Transparenz der SLR, da sie sowohl die Herkunft der extrahierten Daten als auch deren Beitrag zur finalen Schlussfolgerung deutlich machen (Petticrew und Roberts 2006, S. 165).

4 Durchführung der systematischen Literaturrecherche

Im folgenden Kapitel wird für die vorliegende Arbeit die exakte Durchführung der SLR beschrieben und die Anzahl der bei jedem Schritt gefundenen Literatur dokumentiert.

4.1 Datenbanksuche

Die Datenbanksuche wurde für den Zeitraum vom 01.01.2011 - 16.12.2024 mittels der fortgeschrittenen Suche in drei Datenbanken mit dem Suchstring in Abschnitt 3.3.2 durchgeführt. Über Science Direct ergaben sich 132 Suchergebnisse. In Web of Science wurden 566 Suchergebnisse gefunden. Nach Entfernung der Duplikate verblieben 563 Suchergebnisse. In IEEE Explore wurden 177 Suchergebnisse gefunden und nach Entfernung der Duplikate verblieben 143 Suchergebnisse.

Anschließend wurde die verbleibenden Suchergebnisse anhand der in Abschnitt 3.5 definierten Suchkriterien gefiltert. Es verblieben 836 Suchergebnisse. Wie in Abschnitt 3.7.2 beschrieben, wurden diese Ergebnisse dem Screening unterzogen. Es verblieben 34 Suchergebnisse.

4.2 Zitatsuche

Basierend auf den 34 Suchergebnissen wurde die Zitatsuche sowohl rückwärts als auch vorwärts durchgeführt.

4.2.1 Zitatsuche rückwärts

Zur Ermittlung der zitierten Literatur wurde die Datenbank Web of Science genutzt. In Fällen, in denen kein Zugriff auf den Volltext über diese Datenbank möglich war oder unvollständige Ergebnisse geliefert wurden, wurden die Literaturverzeichnisse der identifizierten Literaturquelle manuell durchsucht. Durch dieses Vorgehen wurden insgesamt 1.157 Suchergebnisse erzielt. Nach der Entfernung von Duplikaten und der Einschränkung des Publikationsjahres auf einem Zeitraum vom 2011-2025 verblieben 784 Suchergebnisse. Diese wurden anschließend dem Screening unterzogen, wodurch sich schließlich 11 zusätzliche relevante Treffer ergaben.

4.2.2 Zitatsuche vorwärts

Zur Sicherstellung einheitlicher Suchbedingungen wurde die Zitatsuche vorwärts ebenfalls über die Datenbank Web of Science durchgeführt. Diese Methodik ergab insgesamt 543 Suchergebnisse. Nach der Entfernung von internen Duplikaten und den Duplikaten mit den Ergebnissen der Datenbanksuche und der Zitatsuche rückwärts verblieben 97 Suchergebnisse. Diese wurden anschließend dem Screening unterzogen, wodurch 13 zusätzliche Ergebnisse identifiziert wurden.

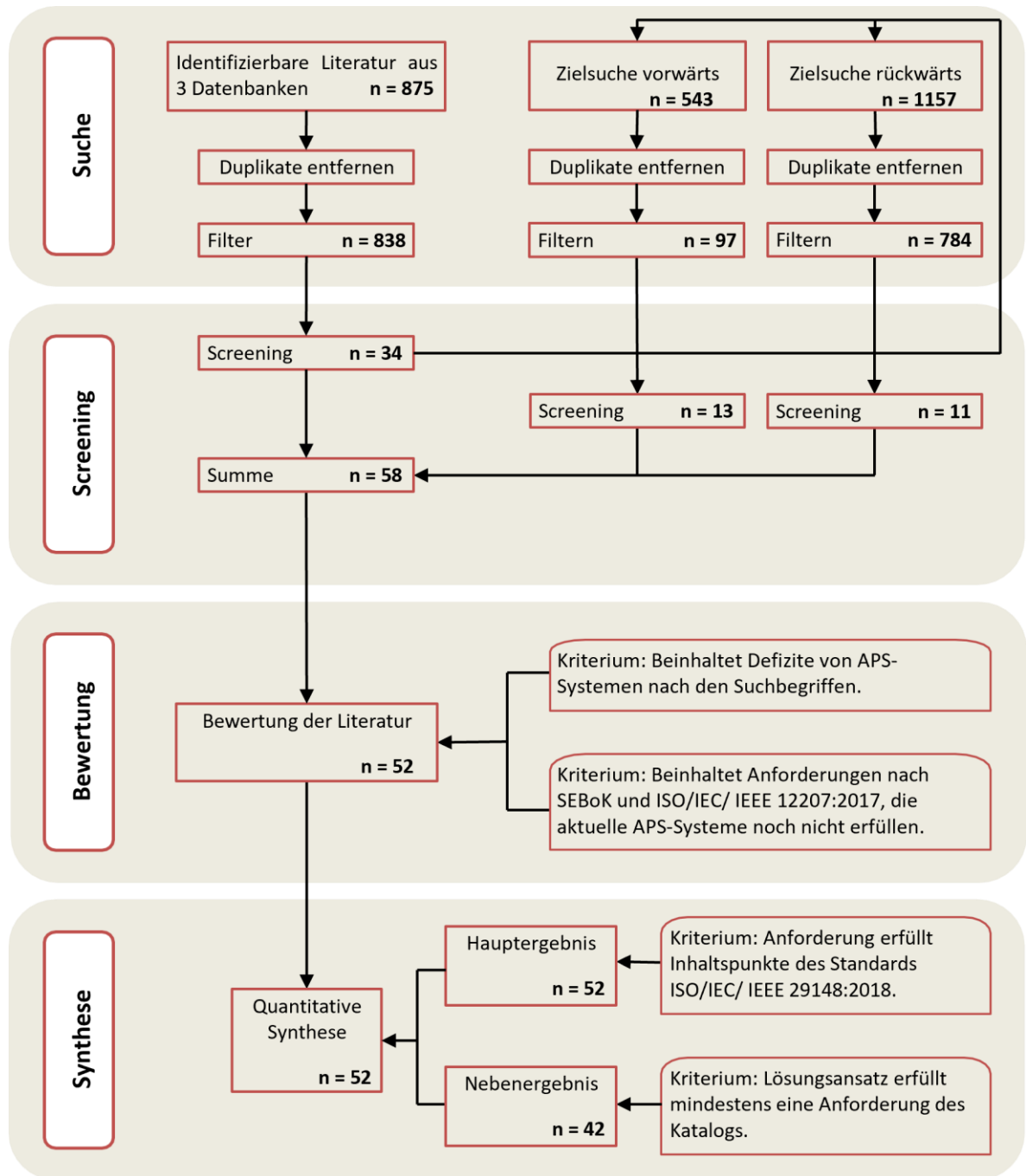


Abbildung 4-1: PRISMA-Flussdiagramm mit Anzahl identifizierter Literatur, in Anlehnung an Borrego et al. 2014, S. 58

4.3 Bewertung

Die Summe der in den ersten beiden Schritten gewonnenen Ergebnisse aus der Datenbanksuche sowie der rückwärts und Vorwärts gerichteten Zitatsuche beträgt 58 Treffer, die in diesem Schritt bewertet wurden. Alle Suchergebnisse wurden ausgeschlossen, die keine Defizite von APS-Systemen oder keine Anforderungen stellen, die aktuelle APS-Systeme noch nicht erfüllen können. Es verblieben 52 Suchergebnisse.

4.4 Qualitative Synthese

Die 52 verbliebenen Literaturquellen wurden der qualitativen Synthese unterzogen und bilden die Grundlage für den in Kapitel 5 erstellten Anforderungskatalog zur Verbesserung von APS-Systemen in der industriellen Produktion. Davon enthalten 42 Quellen bereits bestehende Lösungsansätze, die mindestens eine der im Anforderungskatalog formulierten Anforderungen erfüllen. Diese Lösungsansätze werden in Kapitel 6 näher analysiert und diskutiert.

Zur genauen Nachverfolgung ist in Abbildung 4-1 das PRISMA-Flussdiagramm mit der Anzahl der identifizierten Literatur in den jeweiligen Schritten dargestellt. Dabei beträgt die Gesamtzahl der untersuchten Literatur 2575 Stück.

5 Anforderungskatalog

In diesem Kapitel werden die Defizite bestehender APS-Systemen und die Anforderungen, die von aktuellen APS-Systeme noch nicht erfüllt werden, auf Basis der 52 identifizierten Literaturquellen dargestellt. Dabei werden die identifizierten Defizite jeweils mit dem entsprechenden Hintergrund erläutert und in konkrete Anforderungen überführt. Sämtliche Anforderungen werden gemäß der internationalen Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 in die Hauptkategorien strukturiert, die in Tabelle 5-1 aufgelistet sind. Unter Berücksichtigung der inhaltlichen Schwerpunkte der jeweiligen Anforderungen werden die Hauptkategorien weiter differenziert, sodass themenbezogene Subkategorien abgeleitet werden können.

Tabelle 5-1: Übersicht über die Hauptkategorien des Anforderungskatalogs

| Anforderungskategorien | Abkürzung |
|--|-----------|
| Funktionale Anforderung | FA |
| Leistungsanforderung | LA |
| Schnittstellenanforderung | SA |
| Datenanforderung | DA |
| Anforderung an Systemsicherheit und Datenschutz | SDA |
| Anforderung an die Mensch-System-Integration | MA |
| Benutzbarkeitsanforderung | BA |
| Adaptierbarkeitsanforderung | AA |
| Wirtschaftlichkeitsanforderung | WA |
| Anforderung an gesetzliche und betriebliche Restriktion | RA |
| Anforderung an die Lebenszyklusunterstützung des Systems | SLA |
| Verifizierbarkeit | V |

5.1 Funktionale Anforderungen

Gemäß der internationalen Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 beschreiben Funktionale Anforderungen „die Funktionen oder Aufgaben des Systems oder von Systemelementen, die vom

*System ausgeführt werden sollen*⁷. Dabei steht im Vordergrund, was APS-Systeme leisten sollen. Die in diesem Abschnitt identifizierten funktionalen Anforderungen betreffen robuste Planung gegenüber realen Unsicherheiten und Störungen, Multiobjektivoptimierung, Integration und Koordination in der hierarchischen Planung, Unterstützung kollaborativer SC-Planung, Koordination der Ressourcen, Synchronisation auf Shopfloor-Ebene und Berücksichtigung komplexer Produktionsrestriktionen.

5.1.1 Robuste Planung gegenüber Unsicherheiten und Störungen

APS-Systeme wurden entwickelt, um dynamische Änderungen wie Maschinenstörungen, Nachfrageschwankungen oder verspätete Materiallieferungen flexibel und in Echtzeit berücksichtigen zu können. Viele der in APS-Systeme integrierten Optimierungsverfahren generieren zwar theoretisch optimale Lösungen, erweisen sich jedoch in realen Produktionsumgebungen aufgrund von Störungen und Unsicherheiten als nicht praktikabel (Li et al. 2020, S. 1229). Daraus lässt sich folgende Anforderung ableiten, die in den weiteren Verlauf weiter spezifiziert und in mehrere Teilanforderungen unterteilt wird:

(FA-1) Das APS-System sollte Planungsmethoden integrieren, die auf reale Betriebsstörungen und Unsicherheiten in Nachfrage, Produktionsprozessen und Materialverfügbarkeit robust reagieren können.

Ereignisgesteuerte Planung

Obwohl die rollierende Planung⁸ in APS-Systemen eine weitverbreitete Methode zur Bewältigung operativer Unsicherheiten darstellt, stößt sie in hochdynamischen Produktionsumgebungen zunehmend an ihre Grenzen. Eine effektivere Methode stellt die ereignisgesteuerte Planung dar: Hier erfolgt die Aktualisierung des Plans nicht zu festen Zeitpunkten, sondern anlassbezogen, sobald ein kritisches Ereignis auftritt. Diese Vorgehensweise erfordert, dass alle für die Planung relevanten Daten wie Lagerbestände und Fertigungsfortschritte kontinuierlich aktualisiert und in Echtzeit verfügbar sind.

(FA-1.1) Das APS-System sollte eine integrierte, ereignisgetriebene und interaktive Planungsumgebung unterstützen, die auf aktuelle Systemzustände und unvorhergesehene

⁷ Eigene Übersetzung aus dem Englischen.

⁸ Bei der rollierenden Planung wird in regelmäßigen Zeitintervallen (z. B. monatlich) eine neue Planung erstellt, wobei nur die jeweils erste Periode, die sogenannte „Frozen Period“, zur Umsetzung freigegeben wird (Fleischmann et al. 2015, S. 74–75). Diese periodische Aktualisierung ignoriert jedoch unerwartete Ereignisse, die zwischen den Planzyklen auftreten.

Betriebsstörungen dynamisch Betriebsstörungen reagieren kann (Hahn und Packowski 2015, S. 47; Park et al. 2024, S. 127–129).

Stochastische Modellierung

Ein zentrales strukturelles Defizit vieler APS-Systeme im Umgang mit dynamischen Produktionsumgebungen liegt in ihrer deterministischen Ausrichtung. Die obengenannten Unsicherheiten werden lediglich indirekt berücksichtigt, beispielsweise durch Pufferzeiten, Sicherheitsbestände oder Sensitivitätsanalysen. Eine explizite, mathematisch fundierte Modellierung von Unsicherheiten fehlt hingegen weitgehend (Hahn und Packowski 2015, S. 47). Dieses Defizit wirkt sich besonders nachteilig auf industrielle Produktionsbereiche wie die Biokraftstoffindustrie aus, die von agrarischen Ausgangsprodukten abhängen. Ihre Betriebscharakteristika von Produktionssystemen werden stark von wetter-, saison- und umweltbedingten Unsicherheitsfaktoren beeinflusst (Bocca et al. 2015, S. 48–54). Vor diesem Hintergrund erscheint die Integration stochastischer Ertragsprognose in APS-Systeme als ein sinnvoller Ansatz zur Erhöhung der Planungssicherheit und Gesamtleistung.

(FA-1.2) Das APS-System sollte stochastische Planungsansätze integrieren, um die Unsicherheiten explizit zu modellieren und in Entscheidungsprozesse einzubeziehen.

Differenzierte Modellierung nicht-physischer Aufgaben

APS-Systeme unterscheiden nicht ausreichend zwischen physischen Produktionsprozessen und nicht-physischen Aktivitäten, sondern wenden auf beide dieselbe Modellierungslogik an (Neumann et al. 2024, S. 2). Physische Vorgänge, wie Montage, Bearbeitung oder Transport, folgen in der Regel einem klar definierten Ablauf mit vorhersehbaren Durchlaufzeiten. Nicht-physische Tätigkeiten hingegen, beispielsweise Konstruktion, Validierung oder Engineering-Modellierung, sind meist iterativ, ergebnisoffen und erfordern häufig manuelle sowie logikbasierte Prüfprozesse.

Im Engineer-to-Order-(ETO)-Produktionsansatz weisen die Produkte eine besonders komplexe Struktur auf und sind stark kundenspezifisch. Das bedeutet, dass die Produkte eines Auftrags nicht standardisiert sind und nicht in Serie gefertigt werden können. Jeder Auftrag erfordert eine individuelle Entwicklung sowie mehrere Runden von Entwurfs- und Validierungsschritten. In diesem Umfeld können APS-Systeme ihre typischen Stärken jedoch kaum ausspielen.

Der Grund dafür liegt in der speziellen Abfolge von physischen und nicht-physischen Prozessen im ETO-Kontext: Ein Produkt besteht aus vielen unterschiedlichen Komponenten, die zunächst physisch gefertigt werden müssen, bevor sie montiert werden können. Gleichzeitig ist es bei hochkomplexen ETO-Produkten oft erforderlich, zunächst einzelne Komponenten herzustellen, um die Korrektheit des gesamten Designs überprüfen zu können. Ist das Ergebnis unbefriedigend, muss

der Entwurfsprozess erneut durchlaufen und das Modell entsprechend angepasst werden. Dieses iterativ rückgekoppelte Vorgehen steht im Widerspruch zur typischen Planungslogik klassischer APS-Systeme (Neumann et al. 2022, S. 4, 2024, S. 3–4).

Eine mangelnde Berücksichtigung beider Vorgangstypen in den APS-Systemen führt dazu, dass zentrale Charakteristika des ETO-Kontexts, insbesondere die durch wiederholte Konstruktionsänderungen bedingte Planungsinstabilität, im Modell nicht adäquat abgebildet werden können (Neumann et al. 2022, S. 4, 2024, S. 2). Dies wiederum hat zur Folge, dass Planungsfehler, redundante Arbeitsschritte sowie eine unzureichende Reaktionsfähigkeit auf kurzfristige Designänderungen entstehen.

Daraus lassen sich die folgenden zwei Anforderungen ableiten:

(FA-1.3.1) Das APS-System sollte nicht-physische Aktivitäten durch eine differenzierte Modellierung gesondert von physischen Produktionsvorgängen abbilden können. Dabei sind Unterschiede in Ausführungslogik, Wiederholbarkeit und Abhängigkeitsbeziehungen zu berücksichtigen.

(FA-1.3.2) Das APS-System sollte entwurfsbezogene Unsicherheiten im Konstruktionsprozess, wie beispielweise die Wahrscheinlichkeit von Konstruktionsänderungen, Abbruchkosten oder Rückführungsoptionen, durch geeignete Metriken bewerten und in die Planung einbeziehen.

Szenarien-basierte Planung im SNP-Modul

Die langfristige Planung in APS-Systemen, insbesondere im SNP-Modul, bietet theoretisch die Möglichkeit einer gesamtheitlichen Optimierung über das gesamte Planungsnetzwerk hinweg. Daraus ergibt sich ein hohes Maß an Flexibilität und ein beträchtliches Optimierungspotenzial. In der Praxis wird jedoch lediglich ein einmaliger, deterministischer Optimierungslauf in SNP-Modul durchgeführt (Neumann et al. 2022, S. 4; Stadtler 2012, S. 291–292). Diese Vorgehensweise verzichtet auf den Vergleich alternativer Szenarien und vernachlässigt zukünftige Unsicherheiten wie Nachfrageschwankungen, Reaktionen von Wettbewerbern oder Veränderungen in Kundenpräferenzen. Die daraus resultierenden Pläne sind weder robust noch strategisch belastbar. Darüber hinaus wird auch die mittelfristige Planung, die als Bindeglied zwischen Lang- und Kurzfristplanung fungiert, durch diesen Ansatz negativ beeinflusst.

(FA-1.4) Das APS-System sollte alternative Szenarien im SNP-Modul durchführen und vergleichend auswerten, um Unsicherheiten im DP-Modul hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen zu berücksichtigen.

Planung und Prognose für neue Produkte

APS-Systeme können Produktionspfade für Aufträge mit unbekanntem Produkten nicht präzise planen, da sie auf historischen Fertigungsdaten basieren und die Produktionszeiten von neuen Produkten nicht vorhersagen können. In einem bestehenden Ansatz wird versucht, die Produktionszeiten für neue Produkte mithilfe komplexer Prozessmerkmale durch ein Regressionsmodell zu prognostizieren. Dabei werden verschiedene produktspezifische Fertigungscharakteristika einbezogen und eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt (TSAI et al. 2024, S. 342).

Allerdings wird die Verzerrung in der linearen Regression nicht berücksichtigt, die durch Merkmale mit niedriger Korrelation zum Zielwert (der Produktionszeit) entsteht. Diese schwach korrelierenden Merkmale beeinträchtigen die Modellqualität erheblich, da sie zu einem instabilen Vorhersagen führen können. Die Folge ist eine deutliche Abweichung zwischen der vorhergesagten Produktionszeit und der tatsächlichen Bearbeitungsdauer im Betrieb bei neuartigen oder variantenreichen Produkten (TSAI et al. 2024, S. 342).

(FA-1.5) Das APS-System sollte über Methoden zur Vorhersage der Produktionszeit neuer Produkte verfügen. Zu diesem Zweck sollte das System bei der Feature-Selektion schwach korrelierende Merkmale durch Analyse der historischen Daten identifizieren und aus der Prognose herausfiltern, um Modellverzerrungen zu vermeiden.

Verhaltensensitive Allokation

Bestehende APS-Systeme verwenden zur Behandlung von Engpässen meist feste Heuristiken und Prioritätsregeln, die sich auf eine einmalige Bewertung der Startbedingungen stützen. Es fehlt die Fähigkeit, Engpässe während der Planungslaufzeit dynamisch zu verfolgen und anzupassen (Montesco et al. 2015, S. 2280).

Die segmentbasierte Allokationslogiken der APS-Systeme basieren vorwiegend auf statischen Kundenmerkmalen wie Profitabilität. Das bedeutet: Je höher die prognostizierte Nachfrage und der erwartete Umsatz eines Kunden ausfallen, desto eher wird dieser bei der Auftragsplanung priorisiert. Die tatsächlichen Kaufmuster der Kunden werden dabei jedoch nicht berücksichtigt. Im Falle von Versorgungsengpässen blähen viele Kunden ihre Bedarfsprognosen künstlich auf, um einen höheren Versorgungsanteil zu erhalten. Dieses Phänomen wird als „Forecast Gaming“ bezeichnet und tritt insbesondere in Branchen wie der Pharma- und Halbleiterindustrie auf. Da bestehende APS-Systeme diese strategische Verzerrung nicht erkennen, führt dies trotz Knappheit zu überhöhten Beständen sowie zu verspäteter oder unvollständiger Belieferung anderer Kunden mit realistischem Bedarf (Seitz et al. 2020, S. 1–2). Vor diesem Hintergrund ergeben sich folgende Anforderungen:

(FA-1.6.1) Das APS-System sollte eine dynamische Analyse und fortlaufende Bewertung von Engpässen ermöglichen, um Planungsentscheidungen an aktuellen Ressourcenbelastungen auszurichten.

(FA-1.6.2) Das APS-System sollte strategische Verzerrungen in Kundenprognosen, beispielsweise durch Forecast Gaming, zu erkennen und bei der Priorisierung von Kunden in der Allokationslogik zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck sind geeignete Mechanismen zu implementieren. Kunden dürfen nicht ausschließlich nach Profitabilität segmentiert werden. Stattdessen sind zusätzlich verhaltensbasierte Parameter heranzuziehen, um eine faire und realitätsnahe Allokation sicherzustellen sowie Lagerüberbestände infolge manipulierter Prognosen zu vermeiden.

5.1.2 Multiobjektivoptimierung

Die Planungslogik heutiger APS-Systeme ist meist eindimensional auf Kostenminimierung ausgerichtet. Umwelt- und Sozialziele werden im Sinne einer nachhaltigen SC nicht berücksichtigt. In bisherigen Modellierungen wurden nachhaltigkeitsbezogene Ziele häufig lediglich als Nebenbedingungen berücksichtigt (Allaoui et al. 2019, S. 763).

(FA-2) Das APS-System sollte die Integration mehrerer Zielgrößen, insbesondere ökologischer und sozialer Aspekte, in die Planungsoptimierung ermöglichen. Sie sollten als gleichwertige Zielgrößen neben den ökonomischen Kosten in einem Mehrzieloptimierungsansatz integriert werden.

5.1.3 Integration und Koordination in der hierarchischen Planung

Trotz ihres theoretischen Anspruchs gelingt es hierarchischen Planungskonzepten in APS-Systemen nicht, die Interdependenzen zwischen verschiedenen Planungsmodulen und -ebenen adäquat zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 2.6.2). Bestehende APS-Systeme weisen strukturelle Defizite bei der Integration und Koordination von Entscheidungen entlang hierarchischer Planungskonzepte auf (Kallestrup et al. 2014, S. 49; Mousavi et al. 2023, S. 1–2). Die Entscheidungsmodule sowie -bereiche beeinflussen sich gegenseitig, werden jedoch in aktuellen Systemen weitgehend isoliert behandelt. Die Optimierungsverfahren jedes einzelnen Entscheidungsbereichs können nur auf lokalen Daten und Kriterien basieren. Dies führt dazu, dass die Systeme lediglich global suboptimale Lösungen generieren (Bocca et al. 2015, S. 45; Ehm und Freitag 2016, S. 585). Daraus lassen sich entsprechende Anforderungen ableiten:

(FA-3) Das APS-System muss sicherstellen, dass Planungsentscheidungen global konsistent und möglichst optimal getroffen werden. Um dies zu ermöglichen, sollten Entscheidungsprozesse über verschiedene Planungshorizonte, -ebenen und Aggregationsstufen hinweg durch geeignete Integrations- und Koordinationsmechanismen synchronisiert werden.

Simultane Berücksichtigung von Losgrößen- und Ablaufplanung

Bestehende APS-Systeme behandeln Losgrößenplanung (PP) und Ablaufplanung (PS) meist getrennt, obwohl deren gleichzeitige Optimierung in komplexen Produktionsumgebungen, insbesondere bei nicht fixen Losgrößen, entscheidend für die Planungsqualität ist (Stadtler 2012, S. 291–292). In vielen Systemen fehlt zudem die Verbindung zwischen taktischen PP-Modellen und operativen PP-Modellen, was zu inkonsistenten oder realitätsfernen Ergebnissen führt (Márquez et al. 2024, S. 25; Samaranyake et al. 2014, S. 1275). Losgrößen werden oft nicht ausreichend berücksichtigt oder nur heuristisch behandelt (Hahn und Packowski 2015, S. 47).

(FA-3.1) Das APS-System muss eine Verbindung zwischen PP- und PS-Modellen ermöglichen. Die PP und PS des Systems sollte simultan behandelt werden, sofern Produkt- oder Prozessanforderungen dies erfordern.

Synchronisation der Teilpläne

Mit dem fortschreitenden Einsatz von Industrie-4.0-Technologien steigen die Anforderungen an bestehende APS-Systeme und deren Planungsansätze. Zwar leisten traditionelle hierarchische oder mehrperiodische Planungsverfahren einen wichtigen Beitrag zur Beherrschung der Komplexität, da sie ein umfassendes Planungsproblem entlang definierter Ebenen in mehrere Teilprobleme untergliedern, die jeweils einfacher zu lösen sind. Dennoch geraten sie zunehmend in die Kritik, da sie keine zeitnahen Rückkopplungsmechanismen zwischen den einzelnen Teilproblemen vorsehen. Einige Studien argumentieren daher, dass der Einsatz von Echtzeitinformationssystemen die Kommunikation und Abstimmung zwischen den Teilproblemen wesentlich verbessern kann (Li et al. 2020, S. 1230; Li et al. 2022, S. 1356). Daraus ergibt sich die weiterführende Anforderung:

(FA-3.2) Das APS-System sollte Mechanismen zur Koordination und Integration in Echtzeit zwischen Subproblemen bereitstellen, um eine kontinuierliche Synchronisierung von Teilplänen und eine schnelle Reaktion auf Betriebsdaten zu ermöglichen.

5.1.4 Unterstützung kollaborativer SC-Planung

Abschnitt 2.6.3 hebt die kollaborative Planung als ein besonders potenzialreiches Konzept moderner APS-Systeme hervor. In der praktischen Anwendung bestehen jedoch weiterhin erhebliche Defizite. Die derzeit auf dem Markt verfügbaren APS-Systeme weisen überwiegend keine ausreichenden Fähigkeiten zur Modellierung und Unterstützung der Kollaboration mit mehreren SC-Partnern auf (Allaoui et al. 2019, S. 764). Insbesondere fehlen geeignete Werkzeuge zur Entwicklung multiparteibezogener Koordinations- und Entscheidungsprozesse.

Im Rahmen der Zusammenarbeit eines Unternehmens mit seinen Lieferanten zeigt sich beispielsweise, dass sein MP-Modul häufig unrealistische und ungebundene Bestellungen generiert,

da Rückmeldungen von der Lieferantenseite nicht berücksichtigt werden. Diese Aufträge können aufgrund kapazitiver Beschränkungen nicht in die operative Produktionsplanung der Lieferanten integriert werden, was letztlich zu Lieferverzögerungen führt (Kristianto et al. 2011, S. 108; Leu et al. 2018, S. 1205). Dies offenbart die isolierte Entscheidungsfindung vieler bestehender Systeme, bei der operative Beschränkungen entlang der gesamten SC nicht ganzheitlich berücksichtigt werden. Dadurch können weder die globale Konsistenz noch die Ausführbarkeit der Planung sichergestellt werden. Gleichzeitig zeigt sich auf der Kundenseite, dass durch eine kollaborative Planung unter Berücksichtigung individueller Kundenbedarfe oder kundenspezifischer Produktkonfigurationen nicht nur die Lieferzuverlässigkeit verbessert, sondern auch die Erträge des eigenen Unternehmens nachhaltig gesteigert werden kann. Daher erscheint es sinnvoll, im APS-System einen personalisierten Vertriebsmodus zu integrieren, der auf individuelle Kundenbedarfe und Produktausprägungen abgestimmt ist (Kristianto et al. 2011, S. 124). Daraus ergeben sich folgende Anforderungen:

(FA-4.1) Das APS-System sollte in der Lage sein, Planungsentscheidungen unter Berücksichtigung kapazitiver und operativer Einschränkungen entlang der gesamten SC zu treffen. Zudem muss es kollaborative Planungsfunktionen unterstützen, die einen standortübergreifenden Informationsaustausch entlang der SC ermöglichen.

Insbesondere sollte sichergestellt werden, dass Entscheidungen im MP-Modul des APS-Systems auf realistische Rückmeldungen von der Lieferantenseite basieren, um globale Konsistenz und Ausführbarkeit zu gewährleisten.

(FA-4.2) Das APS-System kann Funktionen zur Unterstützung eines personalisierten Verkaufsmodus bereitstellen, bei dem die mögliche IT gezielt eingesetzt wird, um individuelle Kundenanforderungen besser in die Planung zu integrieren und dadurch den Mehrwert des Systems zu erhöhen.

5.1.5 Koordination der Ressourcen

Die derzeit in den meisten Unternehmen eingesetzten APS-Systeme konzentrieren sich primär auf die Erstellung von Produktionsplänen, ohne dabei eine ganzheitliche Koordination aller relevanten Ressourcen einschließlich Personal, Maschinen, Material, Logistik und Fertigungsprozesse sicherzustellen (Yuan et al. 2020, S. 1295). Die isolierte Betrachtung führt zu einer Fragmentierung der Informationsflüsse und einer getrennten Optimierung einzelner Module, wodurch die globale Konsistenz der Planung verloren geht (Samaranayake et al. 2014, S. 1275). Insbesondere in Situationen mit beschränkten Ressourcen oder konkurrierenden Prioritäten besteht die Gefahr, dass erstellte Produktionspläne nicht realisierbar sind.

(FA-5) Das APS-System sollte nicht nur Produktionspläne zu erstellen, sondern auch eine koordinierte Planung und Steuerung aller beteiligten Ressourcenbereiche - einschließlich Personal, Maschinen, Material, Logistik und Prozesse - zu gewährleisten, um die globale Konsistenz und Ausführbarkeit der Pläne sicherzustellen.

5.1.6 Synchronisation auf Shopfloor-Ebene

Die Produktionssynchronisation ist ein in industriellen Fertigungsbereichen weit verbreitetes, jedoch häufig vernachlässigtes Problem. Eine fehlende horizontale Synchronisation zwischen Produktionschargen führt zu Wartezeiten von Endprodukten und erhöhten Lagerkosten. Unzureichende vertikale Synchronisation zwischen benachbarten Arbeitsgängen verursacht ineffiziente Maschinenwechsel und vermeidbare Rüstzeiten. Bislang berücksichtigt kein bestehendes APS-System die realen Anforderungen an eine synchronisierte Feinplanung auf Shopfloor-Ebene (Lin et al. 2018, S. 4). Diese Funktionen gelten jedoch als Voraussetzung für eine effektive Planungssteuerung in vernetzten Fertigungsumgebungen.

(FA-6) Das APS-System sollte Synchronisationsfunktionen bereitstellen, um horizontale und vertikale Abstimmung von Produktionsprozessen zu ermöglichen.

Dynamische Maschinenlaufzeit

Ein zentrales Problem traditioneller APS-Systeme liegt in der unzureichenden Berücksichtigung von zeitlichen Verzögerungen, die bei der kontinuierlichen Bearbeitung von Aufträgen an Maschinen auftreten. Obwohl Bearbeitungszeiten in der Planung typischerweise als fixe Werte modelliert werden, variiert die tatsächliche Durchlaufzeit je nach Maschinenauslastung, Auftragsreihenfolge und Materialflusssdichte. Dabei handelt es sich nicht um unerwartete Störungen wie Maschinenstillstände, sondern um systemimmanente Phänomene des laufenden Produktionsbetriebs. Wie in der Literatur betont wird, berücksichtigen gängige APS-Algorithmen diese laufzeitabhängigen Verzögerungen nicht, was zu erheblichen Abweichungen zwischen den geplanten und den realen Fertigungszeiten führt (TSAI et al. 2024, S. 342). Diese Abweichungen gefährden die Realisierbarkeit der erstellten Produktionspläne und beeinträchtigen insbesondere in kapazitätskritischen Umgebungen die Termintreue sowie Ressourcenauslastung. Daraus lässt sich folgende Teilanforderung ableiten, die als Aspekt vertikaler Synchronisation auf Shopfloor-Ebene zu verstehen ist:

(FA-6.1) Das APS-System muss laufzeitbedingte Verzögerungen bei der kontinuierlichen Maschinenbearbeitung in die Planung von Bearbeitungspfaden zu berücksichtigen.

Sequenzierung und Ressourcenausgleich

APS-Systeme sind grundsätzlich darauf ausgelegt, Sequenzen und Ressourcenauslastung innerhalb der Produktion zu optimieren. Im Kontext von Mischmodell-Montagelinien stoßen bestehende kommerzielle APS-Systeme wie SAP APO jedoch an ihre Grenzen, die Arbeitslast gleichmäßig über alle Vorstufen der Produktion zu verteilen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Steuerungsstrategien für die Sequenzierung in der Regel starr vordefiniert sind und keine dynamische Anpassung an veränderte Produktionsbedingungen zulassen (Hsu et al. 2018, S. 428; Liu et al. 2019, S. 1533; Schuh et al. 2013, S. 478; Vieira et al. 2021, S. 390). Zwar ermöglichen sie häufig eine schnelle Berechnung der optimalen Endmontagesequenz, doch vernachlässigen sie dabei die realen Anforderungen der vorgelagerten Prozesse (Kreiter und Pferschy 2020, S. 1141–1144). Die Folge sind unausgewogene Belastungen einzelner Vorfertigungsstationen, was in der Praxis zu Überlastung, Wartezeiten oder ineffizienter Ressourcennutzung führen kann. Daraus ergibt sich folgende Teilanforderung, die als Aspekt horizontaler Synchronisation zu verstehen ist:

(FA-6.2) Das APS-System sollte eine adaptive Steuerungslogik für die Reihenfolgeplanung bereitstellen, die eine dynamische Anpassung an die realen Kapazitäts- und Lastsituationen aller Produktionsstufen ermöglicht, um eine ausgewogene Ressourcenauslastung in mehrstufigen Mischmodell-Montagelinien sicherzustellen.

5.1.7 Berücksichtigung komplexer Produktionsrestriktionen

In den komplexen Produktionsumgebungen stoßen bestehende APS-Systeme an ihre Grenzen, da sie produktionstechnische Einschränkungen nur unzureichend berücksichtigen. Dieses Defizit wurde in der Praxis durch ein Unternehmen der Automobilzulieferindustrie in Taiwan bestätigt, das ein APS-System seit zwei Jahren im Einsatz hat (Liu et al. 2019, S. 1536). Insbesondere heuristische Verfahren, die häufig zur Lösung komplexer Planungsprobleme eingesetzt werden, weisen hierbei deutliche Schwächen auf (Krenczyk und Jagodzinski 2015, S. 452; Wang et al. 2021, S. 1–2). Zwar ermöglichen sie eine vergleichsweise schnelle Lösungsfindung, jedoch gelingt es ihnen oft nicht, relevante Restriktionen realitätsnah abzubilden, wie Rüstzeitabhängigkeiten, Maschinenbelegungslogik und materialflussbedingte Einschränkungen. Viele dieser Verfahren treffen Entscheidungen auf Basis lokaler Heuristiken oder starrer Entscheidungsregeln (Montesco et al. 2015, S. 2273), ohne globale Zielgrößen wie Ressourcenauslastung oder Termintreue ausreichend zu berücksichtigen. Dieses Problem zeigt sich auch im vorhergehenden Abschnitt zur Sequenzierung und zum Ressourcenausgleich. Die Folge sind suboptimale Pläne, ineffiziente Ressourcennutzung und eine mangelnde Umsetzbarkeit in realen Fertigungsszenarien.

(FA-7) Das APS-System sollte produktionstechnische Einschränkungen auf Shopfloor-Ebene berücksichtigen und zugleich eine global konsistente Ressourcenallokation ermöglichen.

5.2 Rechenzeiten

Bei der in diesem Abschnitt dargestellten Anforderung an die Rechenzeiten handelt es sich um eine Leistungsanforderung gemäß der Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018. Im Unterschied zu funktionalen Anforderungen legen Leistungsanforderungen fest, wie gut oder wie schnell diese Funktionen ausgeführt werden müssen. Sie beziehen sich damit auf die quantifizierbare Leistungsfähigkeit eines APS-Systems bei der Ausführung seiner Funktionen. Dies bedeutet, dass Leistungsanforderungen im Prinzip messbar sein sollten. Da im Rahmen dieser Arbeit jedoch keine konkreten Zahlenwerte aus der Literatur identifiziert werden konnten, erfolgt die Beschreibung der Anforderung in diesem Abschnitt ohne die Angabe messbarer Zielwerte.

Obwohl APS-Systeme unter Verwendung exakter Optimierungsverfahren theoretisch optimale Produktionspläne generieren können, sind die damit verbundenen Rechenzeiten in der Praxis häufig zu lang (Kreiter und Pferschy 2020, S. 1164; Neumann et al. 2022, S. 15; Wang et al. 2021, S. 1–2). Ähnliches gilt für simulationsbasierte Optimierungsansätze. Trotz ihrer hohen theoretischen Modellierungs- und Abbildungsfähigkeit führen deren extrem komplexe Rechenmodelle zu erheblichen Laufzeiten (Sobottka et al. 2019, S. 1846; Steger-Jensen et al. 2011, S. 805). Die Berechnungsdauer beider Verfahren kann sich von mehreren Stunden bis hin zu Tagen erstrecken.

In dynamischen Produktionsumgebungen, die beispielsweise durch kurzfristige Auftragsänderungen oder schwankende Energiepreise geprägt sind, ist eine derart langsame Reaktionsfähigkeit nicht praktikabel. Wenn ein APS-System unter diesen Bedingungen nicht in der Lage ist, innerhalb von wenigen Minuten aktualisierte Planungsentscheidungen bereitzustellen, verliert es seine industrielle Anwendbarkeit.

(LA-1) Um flexibel auf sich ändernde Marktanforderungen reagieren zu können, sollte das APS-System Produktions- und Operationspläne innerhalb möglichst kurzer Zeiträume aktualisieren. Insbesondere bei großen Auftragsvolumen sollte das APS-System innerhalb einer anwendungsspezifisch definierten maximalen Rechenzeit eine durchführbare Produktionsplanung bereitstellen.

5.3 Schnittstellenanforderungen

Gemäß der internationalen Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 beinhalten Schnittstellenanforderungen die Spezifikation der Nutzung anderer erforderlicher Softwareprodukte wie der Datenmanagementsysteme, der Betriebssysteme oder der mathematischen Pakete sowie die Definition von Verknüpfung zu anderen Anwendungssystemen.

Im Kontext industrieller Produktion kommt Schnittstellenanforderungen eine besonders hohe Relevanz zu, da APS-Systeme in der Regel selten als isolierte Softwarelösungen betrieben werden. Vielmehr werden sie in ein komplexes Netzwerk aus ERP-, MES-Systemen, Finanzplanungs- und

Controlling-modulen sowie verschiedenen externen Planungs- und Optimierungstools integriert. Eine zuverlässige und standardisierte Schnittstellenarchitektur ist somit eine Grundvoraussetzung für die funktionale Leistungsfähigkeit und Systemintegration von APS-Lösungen. Ohne dieser Schnittstellenarchitektur können die in den vorherigen Abschnitten aufgelisteten funktionalen Anforderungen wie Robuste Planung gegenüber realen Unsicherheiten und Störungen, Integration und Koordination in der hierarchischen Planung, Unterstützung kollaborativer SC-Planung und Synchronisation auf Shopfloor-Ebene nicht erfüllt werden.

Trotz dieser zentralen Rolle zeigen viele empirische Studien und Fachveröffentlichungen auf, dass aktuelle APS-Systeme in Bezug auf Schnittstellen erheblich Defizite aufweisen. Bei der Integration von ERP- und APS-Systemen treten häufig technische und semantische Kompatibilitätsprobleme auf (Arica und Powell 2014, S. 160–161; Kjellsdotter Ivert 2012, S. 72; van Nieuwenhuysen et al. 2011, S. 7; Vidoni und Vecchietti 2015a, S. 326, 2015b, S. 39; Wang et al. 2021, S. 1–2). Gerade in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) erfolgt die Integration häufig ad hoc, was zu instabilen Schnittstellen und Dateninkonsistenzen führt (Vidoni und Vecchietti 2016, S. 433).

Divergierende Systemabstraktionen (z. B. Maschinenzustände vs. aggregierte Produktionspläne) erschweren eine standardisierte Schnittstelle (Da Silva et al. 2014, S. 192). Eine direkte Verbindung zwischen APS- und MES-Systemen ist häufig unterbrochen, wodurch Daten teilweise manuell übergeben oder durch papierbasierte Arbeitsaufträge vermittelt werden (Arica und Powell 2014, S. 160–161; Hahn und Packowski 2015, S. 47; Vidoni und Vecchietti 2015a, S. 326; Wang et al. 2021, S. 1–2). Dies führt zu Planungsverzögerungen, eingeschränkter Rückkopplung sowie reduzierter Produktionssicherheit und -transparenz. Einige Unternehmen haben bislang lediglich bilaterale Integrationen zwischen ERP- und MES-Systemen oder ERP- und APS-Systemen realisiert. Eine vollständige Integration entlang der Kette ERP-APS-MES-Systemen ist jedoch selten (Kucharska et al. 2015, S. 1–7). Darüber hinaus sind APS-Systeme häufig nicht in finanzielle Planungssysteme wie die Kostenträgerrechnung integriert (Hahn und Packowski 2015, S. 47). In operativen Planungsprozessen der Systeme finden diese Aspekte bislang kaum Berücksichtigung. Dies erschwert eine ganzheitliche Abstimmung zwischen finanziellen und produktionsbezogenen Zielen.

Neben der Anbindung an Unternehmenssysteme müssen APS-Systeme zunehmend auch externe und spezialisierte Module zur Entscheidungsunterstützung wie der Prognose der Bedarfe, der Optimierung bestimmter Produktionsparameter oder der Simulation von Szenarien integrieren. Solche Tools, die häufig von Drittanbietern stammen, benötigen klar definierte Schnittstellen zur strukturierten Übergabe von Planungsdaten und Rückführung von Optimierungsergebnissen (Neumann et al. 2022, S. 15). Fehlende Standards führen hier häufig zu Integrationsaufwänden oder isolierte Lösungen, die sich schlecht warten oder erweitern lassen. Ein modulares APS-System sind

daher Schnittstellen bereitzustellen, die eine reibungslose Anbindung solcher Tools ermöglichen und den bidirektionalen Datenaustausch sicherstellen.

Effektive kollaborative Planung setzt voraus, dass alle relevanten SC-Partner wie Kunden, Lieferanten, Dienstleister über einheitliche und standardisierte Schnittstellen mit den APS-Systemen kommunizieren können. Nur so lassen sich externe Eingaben wie Auftragsprioritäten, Produktkonfigurationen oder Rückmeldungen sowie gemeinsame Entscheidungsprozesse und Prozessabstimmungen effizient integrieren (Allaoui et al. 2019, S. 764; Kristianto et al. 2011, S. 124). Derzeit existieren jedoch kaum interoperable Schnittstellenstrukturen, was die unternehmensübergreifende Koordination erheblich erschwert und die Fähigkeit zur schnellen Reaktion auf Marktveränderungen deutlich mindert.

Um die oben beschriebenen funktionalen und strukturellen Defizite zu beheben, ergibt sich daraus folgende übergeordnete Schnittstellenanforderung an das APS-System, untergliedert in drei Teilanforderungen:

Das APS-System sollte über eine standardisierte, interoperable und erweiterbare Schnittstellenarchitektur verfügen, die folgende Integrationsanforderungen erfüllt:

(SA-1) Integration mit **bestehenden Unternehmenssystemen** wie ERP, MES, Finanz- und Servicemodulen, um konsistente Datenflüsse und durchgängige Planungsprozesse zu ermöglichen.

(SA-2) Anbindung **externer Prognosen-, Planungs- und Optimierungstools**, einschließlich der strukturierten Übergabe von Projektdaten sowie der Rückführung berechneter Produktionspläne.

(SA-3) Unterstützung einer **unternehmensübergreifender kollaborativer Planung** entlang der gesamten SC.

5.4 Datenanforderungen

Datenanforderungen beziehen sich gemäß der internationalen Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 auf die Spezifikation der Anforderungen an ein System im Umgang mit Informationen, die es empfängt, erzeugt oder ausgibt. Dies umfasst unter anderem die Typen und Mengen der zu speichernden Informationen, ihre Schutzmechanismen sowie Regelungen zu Datensicherung und Archivierung. Datenanforderungen sind eng mit den Schnittstellenanforderungen verknüpft. Nur wenn die ausgetauschten Daten standardisiert und vertrauenswürdig sind, kann ein APS-System effizient mit anderen Modulen und Systemen kommunizieren.

5.4.1 Standardisierte Datenstrukturen und Normenunterstützung

Eine zentrale Voraussetzung für die Interoperabilität zwischen APS-Systemen und anderen IT-Systemen und Modulen wie ERP, MES oder externen Planungstools ist die Verwendung standardisierter und maschinenlesbarer Datenstrukturen. Ohne diese ist eine konsistente Interpretation der ausgetauschten Informationen nicht möglich, insbesondere bei organisationsübergreifenden Integrationsszenarien (Allaoui et al. 2019, S. 764).

Die Europäische Kommission empfiehlt ausdrücklich den Einsatz von Standardmodellen und Automatisierung, um die Datenverfügbarkeit und Kommunikationsfähigkeit in der SC zu verbessern (Arica und Powell 2014, S. 160–161). Besonders hervorgehoben wird hierbei die Norm ANSI/ISA-95, welche sich in der Praxis als Referenzrahmen für den Informationsaustausch zwischen Geschäfts- und Steuerungssystemen etabliert hat. Diese Norm definiert nicht nur Rollenmodelle und Systemgrenzen, sondern bietet auch strukturierte Datenmodelle und Aufgabenklassifikationen, die eine automatisierte Schnittstellenentwicklung erleichtern.

(DA-1) Das APS-System sollte auf klar definierten, standardisierten Datenstrukturen basieren und bestehende Normen wie ANSI/ISA-95 zur Entwicklung von Schnittstellen unterstützen, um die Interoperabilität mit anderen Systemen sowie die Datenverfügbarkeit entlang der SC sicherzustellen.

5.4.2 Datenqualitätsprüfung und Validierung

APS-Systeme sind in hohem Maße auf zuverlässige und konsistente Daten angewiesen. Sind sie in der industriellen Praxis mit anderen IT-Systemen oder Modulen integriert, erweisen sich die von dort stammenden Daten jedoch häufig als veraltet, unvollständig oder inkonsistent (Garcia-Sabater et al. 2012, S. 207; Herrmann et al. 2022, S. 194; Kjellsdotter Ivert 2012, S. 72). Eine belastbare Planung ist nur dann möglich, wenn potenzielle Datenprobleme bereits vor der Systemimplementierung identifiziert werden. Dennoch fehlt es in vielen APS-Einführungsprojekten an geeigneten Methoden zu frühzeitiger Prüfung der Datenqualität. Dies kann entweder zu einer vorschnellen Projektablehnung oder zu hohen Aufwänden während der Implementierung führen (Herrmann et al. 2022, S. 195). Nicht nur eine Datenqualitätsprüfung vor der Implementierung, sondern auch eine kontinuierliche Validierung während des Betriebs stellt eine komplementäre Maßnahme zur Unterstützung einer robusten Integration von den APS-Systemen mit anderen IT-Systemen dar (Arica und Powell 2014, S. 160–161). Daraus lassen sich zwei Anforderungen ableiten:

(DA-2.1) Das APS-System sollte ein integriertes Verfahren zur Bewertung der Datenqualität vor der Systemimplementierung unterstützen, um Projektrisiken durch unzureichende Datenbasis zu minimieren.

(DA-2.2) Das APS-System sollte Mechanismen zur laufenden Validierung der Eingabedatenqualität bereitstellen, um fehlerhafte oder inkonsistente Daten frühzeitig zu erkennen, Rückmeldungen zu geben und Auswirkungen der Datenunsicherheiten auf die Planung zu begrenzen (Vidoni und Vecchiotti 2015a, S. 332).

5.4.3 Echtzeitdatenintegration aus der Produktion

In der Theorie liegt der Fokus vieler APS-Forschungsansätze auf der Optimierung mathematischer Modelle und Algorithmen. In der industriellen Praxis scheitert die Umsetzung jedoch häufig daran, dass aktueller Zustand und Verfügbarkeit realer Produktionsressourcen wie Maschinen, Personal und Material nicht in Echtzeit erfasst und in die Planung einbezogen werden (Zhong et al. 2013, S. 4). Dadurch entsteht eine Lücke zwischen berechneter Planung und tatsächlicher Ausführung, was zu Planabweichungen und Umsetzungsfehlern führt. Besonders kritisch wird dieses Problem in dynamischen Produktionsumgebungen, in denen sich Störungen und Unsicherheiten schnell auswirken. Wenn relevante Shopfloor-Daten nicht rechtzeitig im APS-System verfügbar sind, fehlt die Grundlage für eine reaktive oder adaptive Feinplanung (Arica und Powell 2014, S. 160–161; Li et al. 2022, S. 1356).

(DA-3) Das APS-System sollte Echtzeitinformationen über den Zustand von Produktionsressourcen aus der Fertigungsebene zu erfassen und in die Planungslogik integrieren. Auf dieser Weise können Produktionsstörungen und Unsicherheiten aus der Fertigungsebene zeitnah erkannt werden.

5.4.4 Erweiterte Asset-Beschreibung für digitale Zwillinge (DT)

Die Integration von APS-Systemen mit DT erfordert eine präzise und maschinenlesbare Beschreibung der physischen Produktionsressourcen. Diese Beschreibung bildet die Grundlage für eine zuverlässige Planung, Ausführung und Rückkopplung in cyber-physischen Produktionsumgebungen. Aktuelle Asset-Modelle in diesem Forschungsbereich bieten zwar generische Strukturen zur Anlagenbeschreibung, reichen jedoch nicht aus, um die operationellen Eigenschaften, Einschränkungen und dynamischen Zustände der Ressourcen im Detail abzubilden. Insbesondere in der operativen Planungs- und Ausführungsphase fehlen oft domänenspezifische Informationen wie Kapazitätsgrenzen, Rüstlogik, Energieverbrauchsprofile oder Umgebungskontexte. Die Folge ist eine eingeschränkte Verwendbarkeit der DT zur Echtzeitplanung sowie eine geringe Robustheit gegenüber Störungen (Park et al. 2024, S. 128).

(DA-4) Das APS-System sollte über eine detaillierte und standardkonforme Asset-Beschreibung verfügen, welche die komplexen operationellen Merkmale und Einschränkungen der DT vollständig abbildet, um eine belastbare Planung und Ausführung zu ermöglichen.

5.5 Anforderung an Systemsicherheit und Datenschutz

Die Sicherheitsanforderungen des Systems werden gemäß der Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 sowohl in Bezug auf die Einrichtung, in der das System untergebracht ist, als auch auf die operationellen Sicherheitsanforderungen des Systems selbst definiert. Dazu zählen die Zugriffsbeschränkungen auf das System, das Vorhandensein von Anmeldeverfahren und Passwörtern sowie von Methoden zum Datenschutz und zur Datenwiederherstellung.

APS-Systemen stellen die darin enthaltenen Produktions-, Kapazitäts- und Auftragsdaten zentrale Betriebswerte eines Unternehmens dar. Der Zugriff auf diese Daten muss daher streng kontrolliert erfolgen. Die Benutzeroberfläche und Zugriffsrechte sollen rollenbasiert konfiguriert werden, sodass etwa Administratoren umfassenden Systemzugriff besitzen, während Shopfloor-Techniker nur auf relevante Funktionen wie Auftragsstatus oder Rückmeldungen zugreifen können (Wang et al. 2023, S. 227). Dies erhöht sowohl die Systemsicherheit als auch die Bedienfreundlichkeit.

(SDA-1) Das APS-System muss eine rollenbasierte Zugriffskontrolle implementieren, bei der mindestens zwei Benutzerrollen, Administratoren und Shopfloor-Techniker, mit differenzierten Zugriffsrechten und benutzerspezifischen Oberflächen definiert werden.

5.6 Anforderungen an die Mensch-System-Integration

In komplexen und dynamischen Produktionsumgebungen ist die Mitwirkung erfahrener Planer und Bediener bei kritischen Entscheidungen von zentraler Bedeutung. Gemäß der Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 definiert diese Kategorie unter anderem die Anforderungen an die Zuweisung von Systemfunktionen an das Personal. Die Anforderungen werden identifiziert, die eine effektive, sichere und kontextsensitive Interaktion zwischen Menschen und APS-System ermöglichen, insbesondere unter Unsicherheit oder bei Störungen.

5.6.1 Allgemeine Unterstützung

Trotz der langen Entwicklungsgeschichte von APS-Systemen dominiert die Anwendung von Excel nach wie vor den Bereich der ERP- und APS-Systeme. Neben finanziellen Gründen spielt dabei auch die Sorge der Planer eine Rolle, beim Einsatz von APS-Systemen die Kontrolle über den Planungsprozess zu verlieren. Viele kommerzielle APS-Systeme erlauben keine Einsicht der verwendeten Modelle oder keine Anpassung zentraler Parameter der eingesetzten Algorithmen, was das System zur „Black Box“ macht. Selbst erstellte Excel-Tabellen sind den Anwendern in der Regel gut verständlich und vertraut (Hsu et al. 2018, S. 428; Kjellsdotter Ivert 2012, S. 14; Kreiter und Pferschy 2020, S. 1160; Liu et al. 2019, S. 1533; Man und Strandhagen 2018, S. 1227; Ovacik 2011, S. 42; Schuh et al. 2013, S. 478; Vieira et al. 2021, S. 389–390).

APS-Systeme zielen nicht darauf ab, die menschlichen Planer zu ersetzen. Vielmehr agieren sie als Entscheidungsunterstützungssysteme, indem sie alternative Lösungen vorschlagen und die Menge relevanter Entscheidungsoptionen eingrenzen. Die abschließende Entscheidungsverantwortung verbleibt beim Planer, der die vom System generierten Vorschläge prüfen, anpassen oder ablehnen kann.

(MA-1) Das APS-System sollte über transparente, nachvollziehbare und durch den Benutzer konfigurierbare Optimierungsmechanismen verfügen, um die Vertrauenswürdigkeit und Akzeptanz der Planungsergebnisse zu erhöhen. Das APS-System muss Planern eine aktive Kontrollmöglichkeit über den Planungsprozess geben und sollte Entscheidungen nicht vollständig autonom ohne Benutzerbeteiligung treffen. Das APS-System sollte auf die kognitiven Fähigkeiten und Grenzen menschlicher Planer abgestimmt sein, indem es sie gezielt unterstützt. Die zuletzt genannte Anforderung wird im folgenden Abschnitt näher behandelt.

5.6.2 Menschliche Mitwirkung bei Unsicherheiten

Die Rolle des Menschen wird bei der Konzeption und Implementierung von APS-Systemen oftmals unterschätzt. Wie in Abschnitt Robuste Planung gegenüber Unsicherheiten und Störungen 5.1.1 erläutert, stoßen APS-Systeme bei der Bewältigung von Nachfrage- und Angebotsunsicherheiten oftmals an ihre Grenzen. In der Literatur wird darauf hingewiesen, dass der vollständige Ersatz menschlicher Entscheidungen durch Algorithmen als einer der Hauptgründe für die mangelnde Flexibilität von APS-Systemen gilt (Mousavi et al. 2019, S. 1043). Im Falle von Lieferengpässen oder Übernachfragen beruhen die Entscheidungen über Auftragsabdeckung, Lieferzeitpunkte und Sicherheitsbestände häufig auf dem Fachwissen und der Erfahrung der Allokationsplaner. Frühere Zusagen müssen in diesen Fällen überprüft und angepasst werden. Diese Planer verfügen nicht nur über ein tiefgehendes Verständnis für bevorstehende Unsicherheiten und die strategische Ausrichtung des Unternehmens, sondern können durch kontinuierliche Kommunikation mit den Kunden auch deren Bedarfserwartungen frühzeitig antizipieren (Mousavi et al. 2023, S. 2; Stadtler 2012, S. 291). Zusammenfassend lässt sich folgende Anforderung ableiten:

(MA-2) Das APS-System sollte explizit so gestaltet sein, dass es die operative Mitwirkung erfahrener Planer oder der Experten bei der Bewältigung von Unsicherheiten ermöglicht. Dazu gehören Funktionen zur manuellen Anpassung von Auftragszusagen, zur Bewertung instabiler Bedarfs-/Versorgungssituationen sowie zur Interaktion mit Kunden und anderen Stakeholdern. Insbesondere bei Übernachfrage sollte die Entscheidung über Lieferzeitpunkte sowie die mengenmäßige Zuteilung verfügbarer Ressourcen an Kunden durch menschliche Intervention unterstützt werden.

Darüber hinaus treten in der realen Produktion mitunter spezifische Eingriffe auf, wie etwa die erzwungene lokale Fertigung bestimmter Bauteile oder die explizite Festlegung von Ausführungszeitpunkten für einzelne Arbeitsschritte. Solche Entscheidungen werden von Herstellern und Kunden häufig aus Gründen der Kostenersparnis oder im Rahmen von Preisverhandlungen getroffen. Bestehende APS-Systeme ignorieren derartige Eingriffe jedoch oftmals oder überschreiben sie automatisch (Neumann et al. 2022, S. 15).

(MA-3) Das APS-System muss in der Lage sein, gezielte Sondereingriffe durch Benutzer zu berücksichtigen und den Produktionsplan entsprechend anzupassen.

5.7 Benutzbarkeitsanforderungen

Benutzbarkeitsanforderungen sind eine Form von Qualitätsanforderungen und beziehen sich gemäß der Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 auf die Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit bei der Nutzung eines Systems in einem bestimmten Kontext. Sie beinhalten die Kriterien zur Zielerreichung und zur Vermeidung von Schäden durch Fehlbedienung.

(BA-1) Das APS-System sollte eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) zur Konfiguration des externen Planungs- und Optimierungsmoduls haben (Neumann et al. 2022, S. 15). Diese GUI muss klar definiert und benutzerfreundlich sein und allen wichtigen Stakeholdern zu Verfügung stehen (Vidoni und Vecchietti 2015a, S. 335). Diese Anforderungen stellen eine Erweiterung der Schnittstellenanforderungen dar.

Obwohl APS-Systeme in der Lage sind, optimierte Ergebnisse zu liefern, stellen sie lediglich Black-Box-Lösungen dar. Diese Planungslösungen sind häufig schwer nachvollziehbar, insbesondere für nicht-technische Nutzer.

(BA-2) Das APS-System sollte interaktive Analyse- und Visualisierungsfunktionen bereitstellen (Mousavi et al. 2023, S. 14), mit denen alle Nutzer komplexe Planungsergebnisse interpretieren, Szenarien vergleichen und kognitiv gestützt Entscheidungen treffen können.

5.8 Adaptierbarkeitsanforderungen

Die Kategorie der Adaptierbarkeitsanforderungen stellt eine Form der Qualitätsanforderung dar. Sie beschreibt die Fähigkeit eines Systems, sich an veränderte betriebliche Rahmenbedingungen, projektspezifische Anforderungen oder zukünftige Erweiterungen anzupassen (Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018; Vidoni und Vecchietti 2015a, S. 334).

Obwohl KMU einen erheblichen Anteil an der industriellen Fertigungslandschaft einnehmen, können bestehende kommerzielle APS-Systeme deren Anforderungen nicht ausreichend erfüllen. Diese Softwaresysteme wie SAP APO sind häufig sehr umfangreich und wenig anpassungsfähig an

unternehmensspezifische Produktionsmerkmale und Planungsrestriktionen von KMU (Gahm 2022, S. 2; Hsu et al. 2018, S. 428; Liu et al. 2019, S. 1533; Vidoni und Vecchiotti 2015a, S. 326–327; Vidoni et al. 2020, S. 361–363; Wang et al. 2021, S. 1).

Darüber hinaus bestehen erhebliche Einschränkungen hinsichtlich der branchenübergreifenden Einsetzbarkeit: Viele verfügbare APS-Produkte decken lediglich ein begrenztes Branchenspektrum ab. Sie sind in der Regel stark auf bestimmte Branchen, Unternehmen oder Prozesse zugeschnitten. Dies ermöglicht zwar in Einzelfällen eine hohe Präzision, schränkt jedoch zugleich die Modularität und Portabilität der Systeme ein. Infolgedessen lassen sich diese Systeme nur schwer auf andere Unternehmenskontexte übertragen und können nicht flexibel an neue Geschäftsmodelle oder sich wandelnde Prozessanforderungen angepasst werden (Fachini et al. 2018, S. 571–572; Li et al. 2022, S. 1356; Zhong et al. 2013, S. 2–4).

(AA-1) Das APS-System sollte über eine modular aufgebaute, **generisch erweiterbare Architektur** verfügen, die sowohl eine flexible Anpassung an unterschiedliche Unternehmensgrößen und Prozesse als auch an branchenspezifische Planungslogiken und produktionstechnische Besonderheiten ermöglicht, insbesondere wenn keine Standardlösungen verfügbar sind.

Neben der initialen Anpassungsfähigkeit an Unternehmen spielt auch die kontinuierliche Anpassung von APS-Systemen im laufenden Betrieb eine entscheidende Rolle. APS-Systeme beruhen in der Regel auf zu Beginn implementierten Planungsmodellen, die über einen längeren Zeitraum unverändert bleiben (Schuh et al. 2013, S. 478). Zwar setzen APS-Systeme in der Halbleiter- und Stahlindustrie zunehmend ein, insbesondere Rückwärtssimulation⁹, doch sind die Produktionsprozesse und Systeme in dieser Industrie weitgehend standardisiert. Daher genügt häufig ein einmalig erstelltes Modell, das anschließend mehrfach wiederverwendet werden kann. In vielen ETO-orientierten Industriezweigen wie dem Schiffbau existieren hingegen kaum standardisierte oder wiederholbare Aufträge. Neue Produktvarianten, zusätzliche Maschinen oder Prozessänderungen verändern fortlaufend die Produktionsbedingungen (Ju et al. 2020, S. 22). Da viele dieser Änderungen manuell in die Systeme übertragen werden müssen und dies mit erheblichem Aufwand verbunden ist, erfolgt in der Praxis häufig keine Anpassung und Aktualisierung der Modelle. Dies führt dazu, dass die in APS-Systeme abgebildeten Planungen zunehmend von den realen Produktionsabläufen abweichen.

⁹ Ein Modell für die Rückwärtssimulation wird erstellt, indem die Beziehungen zwischen den einzelnen Produktionsprozessen von einer vorwärtsgerichteten in eine rückwärtsgerichtete Abfolge umgewandelt werden (Ju et al. 2020, S. 31).

(AA-2) Das APS-System sollte **eine kontinuierliche Anpassung seiner Planungsmodelle an veränderte Produktionsbedingungen** ermöglichen, ohne dass für jede Veränderung ein manueller Mehraufwand oder der Aufbau eines vollständig neuen Simulationsmodells erforderlich ist.

5.9 Wirtschaftlichkeitsanforderung

Obwohl diese Kategorie nicht zu den im Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 spezifizierten Anforderungstypen zählt, stellt sie eine wesentliche Erwartung des Stakeholders dar. Daher wird sie in den Anforderungskatalog in dieser Arbeit aufgenommen.

Wirtschaftlichkeit stellt eine zentrale Herausforderung bei der Einführung von APS-Systemen dar, insbesondere für die KMU. Zahlreiche Studien heben hervor, dass hohe Implementierungskosten und der Mangel an kosteneffizienten Alternativen die Verbreitung solcher Systeme erheblich hemmen (Černá 2014, S. 748–749; Fachini et al. 2018, S. 571–572; Garcia-Sabater et al. 2012, S. 200; Hsu et al. 2018, S. 428; Krenczyk und Jagodzinski 2015, S. 452; Li et al. 2022, S. 1356; Liu et al. 2019, S. 1533; Vieira et al. 2021, S. 390; Wang et al. 2021, S. 2). Mit der voranschreitenden intelligenten Fertigung im Kontext von Industrie 4.0 sehen sich Unternehmen zunehmend gezwungen, in neue physische Infrastrukturen wie Server und Geräte zu investieren. Darüber hinaus verursacht der langfristige Personal- und Zeitaufwand für Installation, Konfiguration und Wartung der Systeme zusätzlichen wirtschaftlichen Druck. Dies führt insbesondere in ressourcenbegrenzten Unternehmen zu einer geringen Akzeptanz von APS-Systemen. Daraus ergibt sich folgende Anforderung:

(WA-1) Das APS-System sollte als leichtgewichtige Lösung mit geringem Installations-, Konfigurations- und Wartungsaufwand bereitgestellt werden, sodass die Implementierungskosten für Unternehmen signifikant gesenkt werden können.

5.10 Anforderung an gesetzliche und betriebliche Transportrestriktionen

Gemäß der internationalen Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 sollen Anforderungen abgeleitet werden, die sich aus organisatorischen Richtlinien, betrieblichen Vorschriften und relevanten externen Regulierungen ergeben, sofern diese den Betrieb oder die Leistung des Systems beeinflussen. Hierzu zählen gesetzliche Arbeitszeitmodelle, Sicherheitsvorgaben oder branchenspezifische Regelwerke.

In bestehenden APS-Systemen werden komplexe gesetzliche und betriebliche Restriktionen bislang nur unzureichend berücksichtigt, insbesondere in TP-Modulen. Zwar sind aktuelle TP-Module grundsätzlich in der Lage, durchführbare Tourenpläne zu erstellen. Doch können sie spezifische regulatorische Anforderungen wie Lenk- und Ruhezeit sowie arbeitsrechtliche Einschränkungen für

Fahrer nicht vollständig oder korrekt abbilden (Stadtler 2012, S. 292). Dies kann in der Praxis dazu führen, dass erzeugte Pläne nicht rechtskonform oder realistisch zur Umsetzung sind. Daraus lässt sich folgende Anforderung ableiten:

(RA-1) Das APS-System sollte komplexe gesetzliche und betriebliche Restriktionen im Transportbereich realitätsnah abbilden und verbindlich in die Tourenplanung zu integrieren.

5.11 Anforderungen an die Lebenszyklusunterstützung

Anforderungen an die Lebenszyklusunterstützung des Systems beziehen sich gemäß der Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 auf die Maßnahmen, die erforderlich sind, um die Qualität und Einsatzfähigkeit eines Systems über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg sicherzustellen. Dazu zählen Integration von Experten, Initialausbildung und Schulung des Supportpersonals sowie organisatorische Unterstützung.

Optimierungsmodelle stellen einen zentralen Bestandteil von Softwaresystemen dar. Wenn deren Entwickler wie mathematische Modellierer nicht in die Architekturentwicklung der Software eingebunden sind, kann es zu Inkonsistenzen zwischen den Modellen und der Systemlogik kommen (Vidoni et al. 2017, S. 510–511, 2020, S. 364–365). Dies gefährdet die Wartbarkeit und Weiterentwicklung eines APS-Systems.

(SLA-1) Das APS-System sollte so gestaltet sein, dass Optimierungsexperten aktiv in den Entwurf und die Bewertung der Systemarchitektur eingebunden werden können, insbesondere im Hinblick auf die Integration der Optimierungsmodelle und deren Interaktion mit der Softwarelogik.

Selbst wenn APS-Systeme technisch korrekt konzipiert und implementiert sind, können sie in der betrieblichen Praxis dennoch scheitern, den erwarteten Nutzen zu erbringen. Dies liegt unter anderem an der hohen Komplexität der Systemarchitektur sowie an der Tatsache, dass viele Anwender nicht über das erforderliche Wissen zu den zugrunde liegenden Planungslogiken und Datenmodellen verfügen. Die Parametrisierung des Systems setzt ein tiefes Verständnis der betrieblichen Abläufe und Produktionsressourcen voraus (Vieira et al. 2021, S. 391). Auch die kollaborative Planung zwischen verschiedenen SC-Partnern wird häufig nur auf temporärer Basis organisiert. Dabei fehlt es den für die Pflege zentraler Geschäftsbeziehungen verantwortlichen Personen oftmals an systematischer Anleitung und struktureller Unterstützung (Allaoui et al. 2019, S. 764).

Darüber hinaus mangelt es in vielen Fällen an organisatorischer Unterstützung durch das obere Management (Kjellsdotter Ivert 2012, S. 72–73). Fehlende Kommunikation geplanter Prozessveränderungen sowie mangelnde strategische Einbindung stellen erhebliche Risiken für die

langfristige Nutzung und Integration der APS-Systeme dar. Zusammenfassend ergeben sich folgende Anforderungen:

(SLA-2) Das APS-System sollte durch strukturierte Schulungsprogramme und eine klare Rollenzuweisung an einen definierten Benutzerkreis eingeführt werden, um Implementierungskomplexität und Fehlbedienungen zu vermeiden (Kjellsdotter Ivert 2012, S. 72–73; Stadtler 2012, S. 289; Wang et al. 2021, S. 5).

(SLA-3) Die Einführung und der Betrieb des APS-Systems sollte durch das obere Management aktiv unterstützt und durch geeignete Kommunikationsmechanismen organisatorisch begleitet werden, um Akzeptanz und langfristige Integration in die Unternehmensprozesse sicherzustellen.

5.12 Verifizierbarkeit

Gemäß der Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018 definiert diese Kategorie geeignete Verifikationsansätze und -methoden zur Qualifizierung des Systems oder eines Systemelements. Aus den identifizierten Literaturquellen werden folgende Anforderungen zu dieser Kategorie gefunden:

(V-1) Das APS-System sollte eine systematische Evaluierung der Systemarchitektur und Modelle durch geeignete Metriken zur Qualitätsbewertung und Bewertungsverfahren ermöglichen.

Ohne entsprechende Evaluierungsmechanismen können architekturbedingte Schwachstellen nicht identifiziert oder behoben werden, was die Wartbarkeit und Weiterentwicklung des APS-Systems beeinträchtigen kann (Vidoni et al. 2017, S. 510–511).

Der Großteil der APS-bezogenen Forschung konzentriert sich auf theoretische Modelllösungen des Planungsproblems, anstatt das Gesamtsystem in seiner praktischen Implementierung zu betrachten. Diese starke Ausrichtung auf theoretische Modellierungen führt dazu, dass wesentliche Herausforderungen industrieller Produktionsumgebungen in der Systemkonzeption unzureichend berücksichtigt werden. Dadurch entsteht eine Lücke zwischen Systementwurf und praktischer Umsetzbarkeit im Produktionsalltag (Asmussen et al. 2018, S. 547; Sobottka et al. 2019, S. 1844; Vidoni und Vecchietti 2015a, S. 327; Zhong et al. 2013, S. 4).

(V-2) Das aus der akademischen Forschung hervorgegangener APS-Systementwurf sollte unter realen Industriebedingungen verifiziert und anhand praxisrelevanter Schlüsselkennzahlen validiert werden können, um eine anwendungstaugliche Implementierung sicherzustellen.

6 Bewertung der Lösungsansätze

In diesem Kapitel werden bestehende Lösungsansätze zur Bewältigung der Defizite von APS-Systemen auf Basis der 42 identifizierten Literaturquellen eingeordnet und diskutiert. Die Kategorien der Lösungsansätze wird im Folgenden aufgelistet:

Cloud-basierte APS-Lösungen

APS-Lösungen für kollaborative Planung

Datengetriebene Lösungsansätze

CPS-basierte APS-Lösungen

Ansätze zur Bewertung der Datenqualität

Entscheidungsunterstützungstools

Algorithmische und simulationsgestützte Erweiterungen

Architekturübergreifende Integrationsansätze

Weitere spezialisierte Lösungsansätze.

Hierzu wird der in Kapitel 5 entwickelte Anforderungskatalog als Bewertungsgrundlage herangezogen. Im Fokus steht die Frage, ob ein Lösungsansatz spezifische Anforderungen aus dem Katalog vollständig oder zumindest teilweise erfüllt. Ergänzend dazu werden technische und methodische Besonderheiten sowie die praktische Validierungsstatus der jeweiligen Ansätze dokumentiert. Dadurch kann aufgezeigt werden, welche Lösungsansätze als besonders vielversprechend für eine industrielle Anwendung gelten können. Anhang B enthält eine Übersicht der identifizierten Lösungsansätze und der jeweiligen Anforderungen, die durch diese erfüllt werden.

6.1 Cloud-basierte APS-Lösungen

Die Kombination von Cloud-Technologien mit APS-Systemen stellt einen vielversprechenden Lösungsansatz zur Senkung von Implementierungskosten und zur Erhöhung der Skalierbarkeit dar. Die drei Arbeiten (Hsu et al. 2018, S. 429–434; Liu et al. 2019, S. 1533–1539; Wang et al. 2021, S. 3–10) entwickeln sukzessive ein cloud-basiertes APS-System, das speziell auf die Anforderungen von KMUs zugeschnitten ist. Dabei wird ein simulationsbasierter Planungskern mit einer skalierbaren Cloud-Architektur kombiniert, um Produktionsdaten aus ERP, MES und manuellen Tabellen zu integrieren. Das vorgeschlagene APS-System wird auf der Amazon-Web-Services-Cloud-Plattform implementiert. Der Benutzerstatus wird über ein Application Programming Interfaces (API)-

Gateway authentifiziert, um die Datensicherheit zu gewährleisten. In zwei realen Industrieunternehmen in Taiwan konnte der Einsatz von diesem cloud-basierten APS-System erfolgreich validiert werden, wobei sowohl die Planungsqualität als auch die Implementierungsgeschwindigkeit deutlich verbessert wurden.

Ergänzend entwirft Gahm (2022, S. 11–21) ein generisches Architekturkonzept zur Integration von Cloud Computing und APS-Systemen. Dabei werden vier Nutzungstypen sowie passende Service-Modelle diskutiert. Besonders betont werden Software-as-a-Service (SaaS), das vollständige Planungsanwendungen bereitstellt, sowie Result-as-a-Service (RaaS), bei dem lediglich Optimierungsergebnisse auf Anfrage geliefert werden. Diese Modelle senken insbesondere für KMU die technischen und organisatorischen Einstiegshürden. Zudem werden verschiedene Cloud-Bereitstellungs- (z. B. Private vs. Public Cloud) und Abrechnungsmodelle (z. B. Pay-per-use, Flatrates) thematisiert. Insbesondere für sicherheitskritische Unternehmensanwendungen wird Private Cloud empfohlen. Dieses Konzept befindet sich noch im Stadium.

Die simulationsbasierte Cloud-Planung ermöglicht eine synchronisierte Planung über Subsysteme hinweg. Jedoch sind eine standardisierte und interoperable Schnittstellenarchitektur sowie Funktionen zur unternehmensübergreifenden Kollaboration bislang nicht implementiert (Gahm 2022, S. 23–24).

6.2 APS-Lösungen für kollaborative Planung

Kollaborative Planung bietet erhebliches Potenzial zur Überwindung isolierter Entscheidungslogiken in modernen Produktionsnetzwerken. Jedoch wurden nur zwei Lösungsansätze aus den identifizierten Quellen gefunden, die unterschiedliche technologische Wege zur Umsetzung kollaborativer APS-Systeme aufzeigen.

Ein modulbasiertes APS-System wird zur Unterstützung kollaborativer Planung zwischen Lieferanten- und Kundenunternehmen entwickelt (Kristianto et al. 2011, S. 114–124). In diesem System werden mehrere zentrale Module integriert: MP, Bedarfsplanung, strategische Bestandsallokation, PS und unterstützendes Demand-Supply-Matching. Das integrierte APS-Modell wird anschließend mit dem offenen Agile-Supply-Demand-Network-Simulator gekoppelt, um die Modellleistung zu validieren. Diese Netzwerke ist eine kostenkose Open-Source-Plattform, bei der alle Module in Excel implementiert sind, was indirekt auf geringe Kosten hinweist. Eine industrielle Umsetzung wurde bislang nicht dokumentiert. Die manuelle Anbindung der Module weist auf bestehende Schnittstellenprobleme hin.

Im Gegensatz dazu wird ein kollaboratives Entscheidungsunterstützungssystem vorgeschlagen, das die simultane Optimierung ökonomischer, ökologischer und sozialer Ziele in der SC-Planung ermöglicht (Allaoui et al. 2019, S. 765–771). Das System wurde im Rahmen eines dreijährigen

Projekts in Nordwesteuropa in drei realen Pilotprojekten getestet. Die Lösung unterstützt sowohl vertikale als auch horizontale Koordination und ermöglicht beispielsweise die Konsolidierung von Transporten zwischen Unternehmen sowie die Berücksichtigung temperaturkritischer und multimodaler Lieferwege. Die Implementierung in agrar- und lebensmittelspezifischen SCs zeigt das Potenzial für eine breitere industrielle Anwendung.

6.3 Datengetriebene Lösungsansätze

Zunehmend verfügbare Daten und moderne Speichertechnologien eröffnen neue Möglichkeiten zur Verbesserung bestehender APS-Systeme. Hahn und Packowski (2015, S. 45–50) analysieren den Einsatz von In-Memory-Datenbanktechnologien (z. B. Oracle Exalytics) zur Echtzeitanalyse und Entscheidungsunterstützung in APS-Systemen. Bei diesen Technologien werden die Planungsdaten direkt im Arbeitsspeicher statt auf Festplatten gespeichert und verarbeitet werden, um eine deutlich schnellere Reaktion und Simulation zu ermöglichen. Dadurch lassen sich klassische Defizite traditioneller APS-Architekturen adressieren, wie rigide Hierarchien, mangelnde ereignisgesteuerte Verarbeitung oder fehlende Integration mit Finanz- und MES-Systemen. Die Autoren zeigen anhand einer Marktanalyse von 41 kommerziellen Systemen, dass In-Memory-Technologien vor allem die Interaktivität, Planungspräzision und Bewertung der Szenarien signifikant verbessern können. Jedoch wird darauf hingewiesen, dass eine stochastische Modellierung bislang nicht berücksichtigt wird. Lean Management kann ohne einem umfassenden stochastischen Planungsansatz die Auswirkungen der Unsicherheiten reduzieren, jedoch in sehr begrenztem Umfang (Hahn und Packowski 2015, S. 50).

Die Fähigkeit, Produktionsplanungen auf Basis von Echtzeitdaten zu aktualisieren, gilt als Schlüsseleigenschaft moderner APS-Systeme. Ein konzeptioneller Rahmen zur Integration von ERP-, MES- und APS-Systemen wird auf Basis der ISA-95-Norm präsentiert (Arica und Powell 2014, S. 161–164). Durch die Kombination mit RFID-basiertem Datenerfassungskonzept sollen planungsrelevante Informationen automatisiert und verzögerungsfrei in die Produktionssteuerung eingebunden werden. Kucharska et al. (2015, S. 7–14) verfolgen einen ähnlichen Integrationsansatz, betonen jedoch zusätzlich den Aufbau einer durchgängigen und konsistenten Datenbasis über alle Planungsebenen (strategisch, taktisch, operativ) hinweg. Ziel ist die horizontale und vertikale Kopplung von den drei Systemen, um redundante Datenhaltung zu vermeiden und Planungsschleifen zu verkürzen. Eine industrielle Umsetzung von beiden Ansätzen blieb jedoch aus.

Darüber hinaus stellen Zhong et al. (2013, S. 5–12) ein bereits umgesetztes und servicebasiertes APS-System vor, in das RFID-gestützte Echtzeitinformationen integriert werden. Dabei werden klassische Strukturen der hierarchischen Produktionsplanung beibehalten und durch Webservices, rollenbasierte Schnittstellen und Gantt-basierte Sichtbarkeit ergänzt. Der praktische Einsatz in

einem chinesischen Automobilzulieferer über sechs Monate hinweg zeigt messbare Verbesserungen in der Planqualität. Dieser Ansatz wird erweitert, um horizontale und vertikale Synchronisation auf Shopfloor-Ebene zu ermöglichen (Lin et al. 2018, S. 3–8). Dabei werden Echtzeitinformationen zum Bearbeitungsstand laufender Aufträge sowie zum Auftragsstatus zur Priorisierung und Maschinenbelegung herangezogen. Die Lösung wurde bislang nur simulativ getestet.

Während sich diese Ansätze primär auf die physische Produktionssynchronisation konzentrieren, adressiert folgender Ansatz datengestützte Entscheidungslogiken auf höherer Planungsebene. Ein Allokationsansatz der Kundenprognosen wird vorgeschlagen, der gezielt systematische Prognoseverzerrungen in der Kundenplanung berücksichtigt (Seitz et al. 2020, S. 3–11). Dieser Ansatz kann in das DP-Modul integriert werden. Durch die Berechnung eines Prioritätswerts, der sich aus Kundenprofitabilität und Prognosegenauigkeit zusammensetzt, wird die Angebotsverteilung auf granularer Kundenebene dynamisch angepasst. Kunden mit verlässlicher Prognose erhalten bevorzugte Belieferung. Somit wird gezielt Anreize zur wahrheitsgemäßen Bedarfsprognose geschaffen und „Forecast Gaming“ entgegengewirkt. Die Methode wurde anhand realer Daten aus der Halbleiterindustrie validiert und zeigte signifikante Effizienzgewinne bei gleichzeitiger Reduktion von Lagerbeständen.

Schließlich kombinieren TSAI et al. (2024, S. 345–355) Maschinelles Lernen mit Echtzeitdaten aus MES-Systemen, um eine dynamische Produktivitätsprognose zu ermöglichen. Mittels der metaheuristischen Verfahren werden Produktionspfade optimiert und Maschinenlaufzeiten in Echtzeit vorhergesagt. Durch die Integration eines Feature-Selektion-Mechanismus, der stark korrelierte Merkmale identifiziert, kann zudem die Produktionsdauer insbesondere für neue und unbekannte Produkte präziser abgeschätzt werden. Das System befindet sich derzeit noch im experimentellen Entwicklungsstadium, weist jedoch bereits signifikant geringere Prognoseabweichung als bestehende Verfahren auf.

6.4 CPS-basierte APS-Lösungen

Gestützt auf die in dem vorherigen Abschnitt dargestellten Echtzeitdatenkonzepte gewinnt der Einsatz von CPS zunehmend an Bedeutung für die Verbesserung von Planungstreue, Flexibilität und Reaktionsfähigkeit von APS-Systemen. Die folgende Lösungsansätze zeigen, wie durch die enge Kopplung physischer Produktionsprozesse mit digitalen Planungssystemen Echtzeitsteuerung, Resilienz und Prognosegenauigkeit erhöht werden können.

Schuh et al. (2013, S. 479–483) schlagen ein cyber-physisches Produktionskonzept vor, das bestehende APS-Systeme ergänzt und auf realen Produktionsdaten eines Kleinserienherstellers validiert wurde. Ein weiterer CPS-basierter APS-Ansatz wird entwickelt, bei dem komplexe

Planungsprobleme durch räumlich-zeitliche Diskretisierung in kleinere und deterministische Teilprobleme zerlegt werden (Li et al. 2020, S. 1231–1235; Li et al. 2022, S. 1358–1370). Diese werden lokal, flexibel und asynchron verarbeitet. Echtzeitdaten dienen dabei als Grundlage für die dynamische Ressourcenbewertung sowie die horizontale und vertikale Synchronisation. Beide Studien zeigen das Potenzial dezentraler Echtzeitsteuerung, befinden sich jedoch noch im Stadium laborbasierter Validierung.

Den aktuell systematischsten Ansatz einer cyber-physischen Integration mittels DT-Technologie stellen Park et al. (2024, S. 128–151) vor. Ihr modellgestütztes System basiert auf einem standardisierten Asset-Beschreibungsmodell gemäß der Norm ANSI/ISA-95, das Produkt, Prozess, Plan, Plant und Ressource gleichzeitig abbildet. Die dadurch ermöglichte bidirektionale Kopplung zwischen realem Produktionsumfeld und digitalem Planungsmodell unterstützt sowohl horizontale als auch vertikale Integration. Durch Snapshot-Synchronisation sowie Prognose- und Reaktionsfunktionen wird eine resiliente, zustandsbasierte Planung ermöglicht. Die Lösung wurde bereits in zwei realen Pilotumgebungen erfolgreich implementiert.

Trotz des hohen Potenzials zur Behebung zahlreicher APS-Defizite ist die Realisierbarkeit und breite Umsetzung CPS-basierter Ansätze in der industriellen Praxis noch offen.

6.5 Ansätze zur Bewertung der Datenqualität

Die Qualität der Eingangsdaten gilt als Schlüsselfaktor für die Leistungsfähigkeit von APS-Systemen. Zwei identifizierte Lösungsansätze widmen sich gezielt der strukturierten Bewertung der Datenqualität von ERP-Systemen vor deren Integration in APS-Lösungen.

Vidoni und Vecchietti (2015b, S. 40–49) präsentieren mit ein prototypisches, auf intelligenten Agenten basierendes Tool, das die Datenstrukturen gemäß der Norm ANSI/ISA-95 analysiert. Der Ansatz wurde in drei Fallstudien getestet. Daneben verfolgen Herrmann et al. (2022, S. 196–201) einen datenwissenschaftlich geprägten Ansatz und nutzen ein Bayes'sches Netzwerk zur automatisierten Bewertung der Datenqualität. Die Trainingsdaten stammen aus einem mittelständischen Industrieunternehmen und wurden durch Experteninterviews ergänzt. Das Tool kombiniert subjektives Expertenwissen mit objektiv erhobenen Daten und ist daher kontinuierlich lernfähig. Daraus ergibt sich ein praxisnahes Instrument zur frühzeitigen Machbarkeitseinschätzung und Risikominimierung vor der APS-Einführung. Die Methode wurde erfolgreich in einem APS-Einführungsprojekt angewendet, zeigt jedoch aufgrund des hohen Modellierungs- und Trainingsaufwands eine eingeschränkte Übertragbarkeit.

6.6 Entscheidungsunterstützungstools

Entscheidungsunterstützungstools stellen ein zentrales Instrument der Mensch-System-Interaktion dar und eignen sich besonders dazu, die aktive Beteiligung von Planenden zu fördern und APS-Systeme gezielt steuernd zu unterstützen. Kallestrup et al. (2014, S. 52–61) zeigen anhand einer hierarchisch geplanten Raffinerie, dass sie die Urteilsfähigkeit von Planenden wirksam ergänzen können, ohne vollständig in die APS-Algorithmen einzugreifen. Im Fokus steht die Bereitstellung relevanter Informationen zur Unterstützung planerischer Entscheidungen.

In den anderen Studien wird die Bedeutung menschlicher Entscheidungsbeteiligung betont, insbesondere bei Unsicherheiten wie Nachfragesteigerung oder Lieferengpässen (Mousavi et al. 2019, S. 1045–1048; Mousavi et al. 2023, S. 5–20). Die Autoren kritisieren eine vollständige Automatisierung als potenziell unflexibel und schlagen stattdessen eine kooperative APS-Lösung vor, in der menschliche Planer als integraler Bestandteil der Systemarchitektur berücksichtigt werden. Ergänzt wird das Modell durch ein webbasiertes Entscheidungsunterstützungstool, das eine interaktive Analyse und einen visuellen Szenarienvergleich im Rahmen der Kundenallokation ermöglicht (Mousavi et al. 2023, S. 6–13). Das System wurde prototypisch in einer europäischen Halbleiterlieferkette getestet und von Industrieanwendern positiv bewertet. Eine vollständige Implementierung in einem produktiven Umfeld steht allerdings noch aus.

6.7 Algorithmische und simulationsgestützte Erweiterungen

Mehrere Arbeiten verfolgen Ansätze zur Verbesserung klassischer APS-Funktionalitäten durch mathematische Optimierung, Heuristiken oder Simulation. Diese Lösungen zielen darauf ab, komplexe Produktionsrestriktionen zu berücksichtigen, die Rechenzeiten zu verkürzen oder Planungslogiken über Systemgrenzen hinweg zu erweitern.

Steger-Jensen et al. (2011, S. 801–805) schlagen eine hybride Planungsstrategie im PP&S-Modul vor, bei der ein MILP-Modell zur Maschinenzuweisung mit einem CP-Verfahren zur Überprüfung der zeitlichen Durchführbarkeit kombiniert werden. Kreiter und Pferschy (2020, S. 1146–1175) vergleichen weiterhin ein MIP-Modell mit SAP APO für die kurzfristige Sequenzplanung in einer mehrstufigen Mischmodell-Montagelinie. Während SAP APO durch schnelle Integration überzeugt, liefert das MIP-Modell bei hoher Restriktionskomplexität genauere, jedoch langsamere Ergebnisse, insbesondere bei mehrstufigem Ressourcenausgleich. Außerdem erweitern Montesco et al. (2015, S. 2274–2280) klassische Engpassanalysen durch eine ressourcensensitive Heuristik auf Basis dynamischer Zeitfenster und CP. Im Gegensatz zu klassischen Verfahren werden bevorzugt Lose eingeplant, die den Engpass am wenigsten belasten. Ziel ist es, Engpässe frühzeitig zu entlasten und die Restprobleme für nachgelagerte Optimierungsverfahren wie MIP zu vereinfachen.

Darüber hinaus wird ein MIP-basiertes Modell zur Planung und Steuerung von ETO-Projekten vorgeschlagen, welches speziell für KMU konzipiert und über API-Schnittstellen in cloudbasierte APS-Systeme integrierbar ist (Neumann et al. 2022, S. 2–15, 2024, S. 5–11). Dieses Modell kombiniert genetische Algorithmen zur Berücksichtigung von nicht-physischer Aufgaben wie Konstruktion und zur besseren Abbildung ETO-spezifischer Charakteristika, leidet jedoch unter langen Rechenzeiten. Keine der genannten mathematischen Verfahren wurde bislang in realen Produktionsumgebungen implementiert oder validiert.

Einige Lösungsansätze setzen auf die Integration von Simulation zur Unterstützung von APS-Systemen. Krenczyk und Jagodzinski (2015, S. 451–460) fokussieren auf die automatische Umwandlung von APS-Produktionsplänen in simulationsfähige Modelle zur Verifikation. In einem prototypischen Umfeld wird eine Verbindung zwischen ERP- und APS-Systemen realisiert. Auf Basis realer Produktionsdaten aus dem ERP-System generiert das APS-System Produktionspläne, die anschließend mithilfe eines angebundenes kommerziellen Simulationssystems visuell überprüft und bewertet werden.

Sobottka et al. (2019, S. 1847–1851) kombinieren simulationsbasierte Multiobjektoptimierung mit künstlichen neuronalen Netzen, um komplexe Planungsszenarien hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Kriterien zu bewerten. Die Methode wurde in einer industriellen Bäckerei erfolgreich getestet, weist aber bei größeren Datenmengen Skalierungsprobleme auf. Daneben entwickeln Ju et al. (2020, S. 22–34) simulationsgestützte Planungsmodelle für den Schiffbau, die prozessorientiert aufgebaut sind und somit rückwärtige Terminierung bei ETO-Produkten unterstützen. Im Mittelpunkt steht die praxisnahe Strukturierung und die Wiederverwendbarkeit der Simulationsbausteine. Eine reale Implementierung über vier Schiffsprojekte hinweg wurde simulativ validiert.

Diese Erweiterungen zeigen, dass durch die Kombination algorithmischer Tiefe mit simulationsgestützter Visualisierung komplexe Restriktionen besser abbildbar sind und somit die Lücke zwischen theoretischer Modelllogik und betrieblicher Umsetzbarkeit verringert werden kann.

6.8 Architekturübergreifende Integrationsansätze

Mehrere Arbeiten beschäftigen sich mit der methodischen und strukturellen Integration unterschiedlicher Planungsebenen und Funktionsbereiche innerhalb und außerhalb von APS-Systemen. Ziel ist es, bestehende Fragmentierungen zwischen Modulen, Zeithorizonten oder externen Subsystemen zu überwinden.

Da Silva et al. (2014, S. 192–196) schlagen eine konzeptionelle Integrationsarchitektur zur Kopplung von Intelligenten Instandhaltungssystemen und APS-Komponenten in der Ersatzteilplanung vor. Vorausschauende Wartungsbedarfe, die auf Sensordaten basieren, werden mit den

Planungsfunktionen des APS verknüpft, um Systemverfügbarkeit zu erhöhen und Lagerbestände zu optimieren. Die Architektur berücksichtigt mehrere Systemebenen – von der Werkstatt bis zur übergeordneten SC – und verdeutlicht die Relevanz durchgängiger Informationsflüsse.

Auch Asmussen et al. (2018, S. 551–561) greifen diese systemübergreifende Perspektive auf, indem sie ein MILP-Modell zur Verknüpfung von strategischen Investitionsentscheidungen mit taktischer Produktionsplanung entwickeln. Hintergrund ist die zunehmende Auslagerung von Fertigungsprozessen und die Verkürzung von Produktlebenszyklen, die klassische Planungshierarchien infrage stellen. Das Modell soll die Lücke zwischen theoretischen APS-Konzepten und praktischen Anforderungen in dynamischen Unternehmensumfeldern schließen.

Weitere Beiträge fokussieren auf die Kopplung unterschiedlicher APS-Module. Ehm und Freitag (2016, S. 586–589) integrieren das PS- und TP-Modul in ein gemeinsames MIP-Modell, um deren enge Wechselwirkungen bei kurzfristiger Produktionsplanung besser zu berücksichtigen. Samaranyake et al. (2014, S. 1275–1279) schlagen ein unitäres Rahmenwerk vor, das Bedarfsplanung und PP&S in einer Struktur vereint, um die Trennung zwischen mittel- und kurzfristiger Planung aufzulösen.

Abschließend adressieren Márquez et al. (2024, S. 2–25) die mangelnde Flexibilität vieler Planungsansätze durch ein modulares, quelloffenes Scheduling-Framework, das sechs Varianten des Job-Shop-Scheduling-Problems unterstützt. Das Framework ist auf APS-Systeme integrierbar und trägt zur Überwindung starrer Planungskonzepte bei, indem es praxisnahe Anwendungsvielfalt ermöglicht.

6.9 Weitere spezialisierte Lösungsansätze

Die letzte Kategorie umfasst eine Reihe spezialisierter Ansätze, die gezielt einzelne Schwachstellen von APS-Systemen adressieren oder branchenspezifische Lösungen bereitstellen. Yuan et al. (2020, S. 1291–1295) präsentieren ein ganzheitliches APS-System mit geschlossener Mehrressourcensteuerung. Es integriert fünf Ressourcentypen – Personal, Anlagen, Material, Logistik und Prozesse – in eine simultane Planung und Rückkopplung. Jedes Subsystem wird separat modelliert und zentral koordiniert, wobei Technologien wie IoT, Künstliche Intelligenz und cloudbasierte Dienste integriert werden können. Trotz der umfassenden Architektur wurde das System bislang nicht in einem realen Industriebetrieb eingesetzt.

Für die Systemsicherheit und den Datenschutz entwerfen Wang et al. (2023, S. 227–228) ein Geschäftsprozessmodell für APS-Systeme, das sich an den aktuell verfügbaren Unternehmensdaten orientiert. Die zugrunde liegende Datenbankstruktur basiert auf vier zentralen Elementen: Benutzer, Rollen, Menüs und Zugriffsrechte. Sie dient der gezielten Steuerung von Berechtigungen

je nach Benutzerrolle. Ziel ist es, den Zugriff auf sensible Unternehmensdaten zu regeln und damit sowohl die Systemsicherheit als auch den Datenschutz zu gewährleisten.

Fachini et al. (2018, S. 574–585) schlagen ein kostenreduziertes, benutzerfreundliches APS-Framework für die Glasbehälterindustrie vor, das vollständig auf Excel-basierten Planungs- und Optimierungstools beruht. Das System wurde über zwölf Monate in einem Werk getestet und erhielt durchweg positives Feedback hinsichtlich Genauigkeit, Einfachheit und Integration in bestehende Abläufe. Der Ansatz eignet sich besonders für KMU mit begrenzten Ressourcen und erfüllt die Wirtschaftlichkeitsanforderung.

Der letzte Lösungsansatz bietet eine generische Referenzarchitektur der APS-Systeme. Vidoni und Vecchiotti (2015a, S. 326–338) definiert zunächst grundlegende Merkmale von APS-Systemen und entwickelt darauf aufbauend eine Referenzarchitektur aus Sicht des Softwareengineerings. Diese Architektur ist so gestaltet, dass sie sich gut mit anderen Unternehmenssystemen wie ERP oder MES verknüpfen lässt. In späteren Arbeiten wird darauf hingewiesen, dass es bislang kaum Möglichkeiten gibt, APS-Architekturen systematisch zu bewerten (Vidoni und Vecchiotti 2016, S. 433–440; Vidoni et al. 2017, S. 510–517). Deshalb wird ein verbessertes Rahmenwerk vorgeschlagen, das sowohl bei der Entwicklung als auch bei der Bewertung solcher Systeme helfen soll. Eine speziell angepasste Variante dieser Architektur wird abschließend vorgestellt (Vidoni et al. 2020, S. 361–382). Sie ist auf die Bedürfnisse kleinerer Betriebe zugeschnitten und enthält sogenannte Variationspunkte, mit denen sich das System flexibel an verschiedene Anwendungsszenarien anpassen lässt. Diese Architektur wurde bereits erfolgreich in einem KMU aus der Verpackungsbranche eingesetzt. Insgesamt verfolgt die Forschungsreihe das Ziel, eine robuste, anpassungsfähige und praxisnahe Grundlage für die Entwicklung moderner APS-Systeme zu schaffen.

7 Schlussfolgerung

Nach der Analyse bestehender Defizite aktueller APS-Systeme und der systematischen Ableitung von Anforderungen lässt sich feststellen, dass die Schwächen vor allem in zwei zentralen Bereichen liegen: Erstens fehlt es an wirksamen Mechanismen zur Bewältigung stochastischer Störungen und Risiken, die für die volatile Realität industrieller Produktion charakteristisch sind; zweitens mangelt es an einer ausreichenden Berücksichtigung von Kooperationsbeziehungen und kollaborativen Planungsprozessen entlang der gesamten SC. Beide Aspekte repräsentieren aktuelle Schlüsselthemen in der Weiterentwicklung von APS-Systemen.

Der in Kapitel 5 entwickelte Anforderungskatalog basiert unmittelbar auf den identifizierten Defiziten sowie aus der Literatur abgeleiteten, bislang unzureichend erfüllten Anforderungen. Damit wird industriellen Anwendern eine praxisorientierte Perspektive geboten, die über die oftmals idealisierte Darstellung von Softwareanbietern hinausgeht. Durch die systematische Strukturierung des Katalogs mithilfe der internationalen Standards im Bereich des Softwareengineerings liefert die Arbeit zugleich eine Grundlage für die gezielte Weiterentwicklung oder Neugestaltung von APS-Modulen.

Kapitel 6 stellt ergänzend verschiedene Lösungsansätze aus den identifizierten Literaturquellen der letzten Dekade. Diese Ansätze versuchen, den erkannten Defiziten zu begegnen und zeigen potenzielle Innovationspfade auf. Dabei dient der zuvor entwickelte Anforderungskatalog als Bewertungsrahmen, um den Deckungsgrad einzelner Lösungen kritisch zu reflektieren. Es wird deutlich, dass kein Ansatz eine universelle Lösung darstellt. Vielmehr ist es notwendig, zwischen widersprüchlichen Anforderungen abzuwägen und Prioritäten zu setzen, die abhängig von den Zielen und Bedingungen des jeweiligen Unternehmens sind. Dies erfordert nicht nur technologische Kompetenz, sondern auch ein gutes Verständnis für die praktischen Herausforderungen im Betrieb, sowohl auf Seiten der Unternehmen als auch der Softwareentwickler.

Aus der Diskussion der Lösungsansätze lässt sich ein kontinuierlicher Fortschritt erkennen: Neue Systeme greifen häufig auf etablierte Konzepte zurück und erweitern diese gezielt, um bestehende Defizite zu bewältigen. Dennoch bleibt die praktische Anwendbarkeit in industriellen Kontexten eine große Herausforderung. Der Fokus der aktuellen Forschung liegt stark auf der Weiterentwicklung von Algorithmen und Modellansätzen, während Aspekte der praktischen Umsetzung, insbesondere in der Nutzungsphase, bislang eher vernachlässigt wurden. Dabei ist gerade diese Phase entscheidend dafür, ob ein APS-System in der Realität tatsächlich den angestrebten Nutzen erbringen kann.

Darüber hinaus existieren bislang nur wenige Studien, die sich mit den vorbereitenden Maßnahmen vor der Implementierung der APS-Systeme beschäftigen. Dazu zählen unter anderem die Schulung der Anwender, der Aufbau formalisierter Planungsprozesse sowie die Einrichtung bereichsübergreifender Unterstützung im Unternehmen. Diese Faktoren sind jedoch entscheidend für den Erfolg solcher Systeme. In der Praxis scheitern viele APS-Projekte an unzureichender organisatorischer Vorbereitung. Daraus ergibt sich ein deutliches Forschungspotenzial für die zukünftige Entwicklung entsprechender Anforderungen an die Systemeinführung und -nutzung.

Gleichzeitig zeigt sich ein Spannungsfeld: Einerseits entstehen im Zuge von Industrie 4.0 und der fortschreitenden Digitalisierung zahlreiche neue Technologien mit großem Potenzial für automatisierte Entscheidungsprozesse und intelligente Systeme. Andererseits stagniert die praktische Entwicklung von PPS seit Jahren, insbesondere aufgrund der weiterhin weitverbreiteten Nutzung von Excel-basierten Tools. Viele der neuen technologischen Konzepte werden bisher nicht erfolgreich in reale APS-Umgebungen übertragen und verbleiben im experimentellen Stadium. Zukünftige Forschung sollte sich daher verstärkt mit der Frage befassen, wie diese Konzepte praxistauglich umgesetzt werden können, um die Resilienz, Transparenz und Effizienz industrieller Produktionsplanung langfristig zu verbessern.

8 Literaturverzeichnis

- Allaoui, Hamid; Guo, Yuhan; Sarkis, Joseph (2019): Decision support for collaboration planning in sustainable supply chains. In: *Journal of Cleaner Production* 229, S. 761–774. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.367.
- Arica, Emrah; Powell, Daryl J. (2014): A framework for ICT-enabled real-time production planning and control. In: *Adv. Manuf.* 2 (2), S. 158–164. DOI: 10.1007/s40436-014-0070-5.
- Asmussen, Jesper Normann; Kristensen, Jesper; Steger-Jensen, Kenn; Wæhrens, Brian Vejrum (2018): When to integrate strategic and tactical decisions? Introduction of an asset/inventory ratio guiding fit for purpose production planning. In: *IJPDLM* 48 (5), S. 545–568. DOI: 10.1108/IJPDLM-02-2018-0058.
- Betge, David; Leisten, Rainer (Hg.) (2006): Koordination in Advanced Planning und Scheduling-Systemen. Zugl.: Duisburg-Essen, Univ. Campus Duisburg, Diss., 2005. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. (Gabler Edition Wissenschaft Produktion und Logistik).
- Beyer, Thomas (2022): Did you know that on average 50% of projects for implementing Advanced Planning and Scheduling (APS) solutions in manufacturing companies fail. Online verfügbar unter <https://www.linkedin.com/pulse/did-you-know-average-50-projects-implementing-advanced-thomas-beyer>, zuletzt aktualisiert am 21.11.2022, zuletzt geprüft am 04.05.2025.
- Bocca, Felipe Ferreira; Rodrigues, Luiz Henrique Antunes; Arraes, Nilson Antonio Modesto (2015): When do I want to know and why? Different demands on sugarcane yield predictions. In: *Agricultural Systems* 135, S. 48–56. DOI: 10.1016/j.agsy.2014.11.008.
- Borrego, Maura; Foster, Margaret J.; Froyd, Jeffrey E. (2014): Systematic Literature Reviews in Engineering Education and Other Developing Interdisciplinary Fields. In: *J of Engineering Edu* 103 (1), S. 45–76. DOI: 10.1002/jee.20038.
- Černá, Marie (2014): Aspects of Information Management in Context with IS Selection by SME. In: *Procedia Engineering* 69, S. 745–750. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.03.050.
- Da Silva, Thiago Regal; Saalman, Philipp; Cordes, Ann-Kristin; Giacomolli, Anderson; Pereira, Carlos Eduardo; Hellingrath, Bernd (2014): Integration Architecture of Intelligent Maintenance Systems and Spare Parts Supply Chain Planning. In: *Procedia CIRP* 25, S. 192–198. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.029.
- Dilda, Valerio; Driesen, Annouck; Fenelli, Pierluigi; Fischer, Julian (2023): The winning recipe for transforming advanced planning systems. McKinsey & Company. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-winning-recipe-for->

transforming-advanced-planning-systems, zuletzt aktualisiert am 20.01.2023, zuletzt geprüft am 04.05.2025.

Ehm, Jens; Freitag, Michael (2016): The Benefit of Integrating Production and Transport Scheduling. In: *Procedia CIRP* 41, S. 585–590. DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.143.

Fachini, Ramon Faganello; Esposto, Kleber Francisco; Camargo, Victor Claudio Bento (2018): A framework for development of advanced planning and scheduling (APS) systems in glass container industry. In: *JMTM* 29 (3), S. 570–587. DOI: 10.1108/JMTM-06-2017-0126.

Fink, Arlene (2014): Conducting research literature reviews. From the internet to paper. Fourth edition. Thousand Oaks California: SAGE.

Fleischmann, Bernhard; Meyr, Herbert (2003): Planning Hierarchy, Modeling and Advanced Planning Systems. In: A. G. de Kok und Stephen C. Graves (Hg.): Supply chain management. Design, coordination and operation, Bd. 11. 1. ed. Amsterdam, Heidelberg: Elsevier (Handbooks in Operations Research and Management Science, 11), S. 455–523.

Fleischmann, Bernhard; Meyr, Herbert; Wagner, Michael (2015): Advanced Planning. In: Hartmut Stadler, Christoph Kilger und Herbert Meyr (Hg.): Supply Chain Management and Advanced Planning. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 71–95.

Gahm, Christian (2022): A conceptual framework for cloud-based advanced planning systems. In: *Journal of Decision Systems* 32 (1), S. 49–78. DOI: 10.1080/12460125.2020.1855701.

Garcia-Sabater, Jose P.; Maheut, Julien; Garcia-Sabater, Julio J. (2012): A two-stage sequential planning scheme for integrated operations planning and scheduling system using MILP: the case of an engine assembler. In: *Flex Serv Manuf J* 24 (2), S. 171–209. DOI: 10.1007/s10696-011-9126-z.

Hahn, G. J.; Packowski, J. (2015): A perspective on applications of in-memory analytics in supply chain management. In: *Decision Support Systems* 76, S. 45–52. DOI: 10.1016/j.dss.2015.01.003.

Herrmann, Jan-Phillip; Tackenberg, Sven; Padoano, Elio; Hartlief, Jörg; Rautenstengel, Jens; Loeser, Christine; Böhme, Jörg (2022): An ERP Data Quality Assessment Framework for the Implementation of an APS system using Bayesian Networks. In: *Procedia Computer Science* 200, S. 194–204. DOI: 10.1016/j.procs.2022.01.218.

Hillnhagen, Simon; Schulz, Jonah; Mütze, Alexander; Nyhuis, Peter; Schmidt, Matthias (2022): Konfiguration der PPS. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 117 (11), S. 728–732. DOI: 10.1515/zwf-2022-1155.

Hoppe, Gerd (2014): High-Performance Automation verbindet IT und Produktion. In: Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel und Birgit Vogel-Heuser (Hg.): Industrie 4.0 in Produktion,

Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 249–275.

Hsu, Tzu-Han; Wang, Li-Chih; Chu, Pei-Chun (2018): Development of a Cloud-based Advanced Planning and Scheduling System. In: *Procedia Manufacturing* 17, S. 427–434. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.10.066.

Hvolby, Hans-Henrik; Steger-Jensen, Kenn (2010): Technical and industrial issues of Advanced Planning and Scheduling (APS) systems. In: *Computers in Industry* 61 (9), S. 845–851. DOI: 10.1016/j.compind.2010.07.009.

IEEE Thesaurus (2025): IEEE Thesaurus. Version 1.05. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. Online verfügbar unter <https://www.ieee.org/content/dam/ieee-org/ieee/web/org/pubs/ieee-thesaurus.pdf>, zuletzt geprüft am 06.03.2025.

Jäger, Jens M.; Görzig, David; Paulus-Rohmer, Dominik; Schatton, Heike; Baku, Sina; Weskamp, Markus; Lucke, Dominik (2015): Industrie 4.0 – Chancen und Perspektiven für Unternehmen der Metropolregion Rhein-Neckar. Studie im Auftrag der Industrie- und Handelskammern Rhein-Neckar, Pfalz und Darmstadt Rhein Main Neckar erstellt durch das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA. Fraunhofer IPA. Online verfügbar unter <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Publikationen/studien/studie-industrie40-chancen-perspektiven.html>.

Ju, Suheon; Sung, Saenal; Shen, HuiQiang; Jeong, Yong-Kuk; Shin, Jong Gye (2020): System development for establishing shipyard mid-term production plans using backward process-centric simulation. In: *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 12, S. 20–37. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2019.05.005.

Kallestrup, Kasper Bislev; Lyng, Lasse Hadberg; Akkerman, Renzo; Oddsdottir, Thordis Anna (2014): Decision support in hierarchical planning systems: The case of procurement planning in oil refining industries. In: *Decision Support Systems* 68, S. 49–63. DOI: 10.1016/j.dss.2014.09.003.

Kilger, Christoph; Reuter, Boris; Stadler, Hartmut (2015): Collaborative Planning. In: Hartmut Stadler, Christoph Kilger und Herbert Meyr (Hg.): *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 257–277.

Kitchenham, Barbara; Charters, Stuart M. (2007): Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. In: *Keele University and Durham University Joint Report*, zuletzt geprüft am 17.03.2025.

Kjellsdotter Ivert, Linea (2012): Use of advanced planning and scheduling (APS) systems to support manufacturing planning and control processes. Zugl.: Göteborg, Univ., Diss., 2012. Göteborg: Chalmers Univ. of Technology (Doktorsavhandlingar vid Chalmers Tekniska Högskola, N.S., 3410).

Kreiter, Tobias; Pferschy, Ulrich (2020): Integer programming models versus advanced planning business software for a multi-level mixed-model assembly line problem. In: *Cent Eur J Oper Res* 28 (3), S. 1141–1177. DOI: 10.1007/s10100-019-00642-z.

Krenczyk, Damian; Jagodzinski, Mieczyslaw (2015): ERP, APS and Simulation Systems Integration to Support Production Planning and Scheduling. In: Álvaro Herrero, Javier Sedano, Bruno Baruque, Héctor Quintián und Emilio Corchado (Hg.): 10th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications, Bd. 368. Cham, s.l.: Springer International Publishing (SpringerLink Bücher, 368), S. 451–461.

Kristianto, Yohanes; Ajmal, Mian M.; Helo, Petri (2011): Advanced planning and scheduling with collaboration processes in agile supply and demand networks. In: *Business Process Management Journal* 17 (1), S. 107–126. DOI: 10.1108/14637151111105607.

Kucharska, Edyta; Grobler-Dębska, Katarzyna; Gracel, Jarosław; Jagodziński, Mieczysław (2015): Idea of Impact of ERP-APS-MES Systems Integration on the Effectiveness of Decision Making Process in Manufacturing Companies. In: Stanisław Kozielski, Daniel Kostrzewa, Dariusz Mrozek, Paweł Kasprowski und Bożena Małyśiak-Mrozek (Hg.): Beyond databases, architectures and structures. 11th international conference, BDAS 2015, Ustroń, Poland, May 26-29, 2015 ; proceedings, Bd. 521. Cham: Springer (Communications in Computer and Information Science, 521), S. 551–564.

Kudos Solutions (2023): The 4 Most Common Reasons That Basic APS Systems Fail. Online verfügbar unter <https://www.kudossolutions.co.uk/the-4-most-common-reasons-that-basic-aps-systems-fail/>, zuletzt aktualisiert am 04.01.2023, zuletzt geprüft am 04.05.2025.

Kuhnle, Andreas (2020): Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning: Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry. Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Lackes, Richard; Siepermann, Markus (2018): Definition: Anforderungsdefinition. Online verfügbar unter <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/anforderungsdefinition-29440>, zuletzt aktualisiert am 19.02.2018, zuletzt geprüft am 04.03.2025.

Lebreton, Baptiste; Meyr, Herbert; Rosič, Heidrun; Seipl, Christian; Wetterauer, Ulrich (2015): Architecture of Selected APS. In: Hartmut Stadtler, Christoph Kilger und Herbert Meyr (Hg.):

Supply Chain Management and Advanced Planning. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 341–361.

Leu, Jun-Der; Krischke, Andre; Lee, Yi-Ping; Lee, Larry Jung-Hsing; Huang, Yi-Wei (2018): An ERP-based Solution for the Supply Chain Planning of Medium-sized Global Manufacturing Company. In: 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management. IEEE IEEM2018 : 16-19 Dec., Bangkok, Thailand. 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Bangkok, 12/16/2018 - 12/19/2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1201–1205.

Li, Mingxing; Jiang, Min; Lyu, Zhongyuan; Chen, Qiqi; Wu, Haoye; Huang, George Q. (2020): Spatial-Temporal Finite Element Analytics for Cyber-Physical System-enabled Smart Factory: Application in Hybrid Flow Shop. In: *Procedia Manufacturing* 51, S. 1229–1236. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.172.

Li, Mingxing; Zhong, Ray Y.; Qu, Ting; Huang, George Q. (2022): Spatial–temporal out-of-order execution for advanced planning and scheduling in cyber-physical factories. In: *J Intell Manuf* 33 (5), S. 1355–1372. DOI: 10.1007/s10845-020-01727-2.

Lin, Peng; Li, Ming; Kong, Xiangtianrui; Chen, Jian; Huang, George Q.; Wang, Meilin (2018): Synchronisation for smart factory - towards IoT-enabled mechanisms. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 31 (7), S. 624–635. DOI: 10.1080/0951192X.2017.1407445.

Liu, Jen-Li; Wang, Li-Chih; Chu, Pei-Chun (2019): Development of a Cloud-based Advanced Planning and Scheduling System for Automotive Parts Manufacturing Industry. In: *Procedia Manufacturing* 38, S. 1532–1539. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.133.

Lupeikiene, Audrone; Dzemyda, Gintautas; Kiss, Ferenc; Caplinskas, Albertas (2014): Advanced Planning and Scheduling Systems: Modeling and Implementation Challenges. In: *Informatica* 25 (4), S. 581–616. DOI: 10.15388/Informatica.2014.31.

Man, Johannes Cornelis de; Strandhagen, Jan Ola (2018): Spreadsheet Application still dominates Enterprise Resource Planning and Advanced Planning Systems. In: *IFAC-PapersOnLine* 51 (11), S. 1224–1229. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.423.

Márquez, Carlos R. H.; Braganholo, Vanessa; Ribeiro, Celso C. (2024): An open-source framework for solving shop scheduling problems in manufacturing environments. In: *Ann Oper Res* 2024. DOI: 10.1007/s10479-024-05995-6.

März, Lothar; Weigert, Gerald (2011): Simulationsgestützte Optimierung. In: Lothar März, Wilfried Krug, Oliver Rose und Gerald Weigert (Hg.): *Simulation und Optimierung in Produktion und*

Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch), S. 3–12.

Meudt, Tobias; Malte, Pohl; Metternich, Joachim (2017a): Die Automatisierungspyramide - Ein Literaturüberblick. In: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/cgi/users/home?screen=EPrint%3A%3AView&eprintid=6298>.

Meudt, Tobias; Wonnemann, Andreas; Metternich, Joachim (2017b): Produktionsplanung und -steuerung (PPS) – ein Überblick der Literatur der unterschiedlichen Einteilung von PPS-Konzepten. Darmstadt. Online verfügbar unter <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/6654/>.

Meyr, Herbert; Wagner, Michael; Rohde, Jens (2015): Structure of Advanced Planning Systems. In: Hartmut Stadtler, Christoph Kilger und Herbert Meyr (Hg.): Supply Chain Management and Advanced Planning. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 99–106.

Moher, David; Liberati, Alessandro; Tetzlaff, Jennifer; Altman, Douglas G. (2009): Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. In: *Journal of clinical epidemiology* 62 (10), S. 1006–1012. DOI: 10.1016/j.jclinepi.2009.06.005.

Montesco, Richard A. Estombelo; Pessoa, Marcosiris A.O.; Blos, Mauricio F. (2015): Scheduling heuristic resourced-based on task time windows for APS (Advanced planning and scheduling) Systems. In: *IFAC-PapersOnLine* 48 (3), S. 2273–2280. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.426.

Mousavi, Behrouz Alizadeh; Azzouz, Radhia; Heavey, Cathal (2019): MATHEMATICAL MODELLING OF PRODUCTS ALLOCATION TO CUSTOMERS FOR SEMICONDUCTOR SUPPLY CHAIN. In: *Procedia Manufacturing* 38, S. 1042–1049. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.190.

Mousavi, Behrouz Alizadeh; Heavey, Cathal; Millauer, Chirine; Tian, Zhikang; Ehm, Hans (2023): Improvement of demand fulfillment in Advanced Planning System through decentralized decision support system. In: *Journal of Industrial Information Integration* 35, S. 100487. DOI: 10.1016/j.jii.2023.100487.

Myrach, Thoma (2019): Anforderungsdefinition -. Online verfügbar unter <https://wilex.de/index.php/lexikon/entwicklung-und-management-von-informationssystemen/systementwicklung/hauptaktivitaeten-der-systementwicklung/anforderungsdefinition/>, zuletzt aktualisiert am 09.04.2019, zuletzt geprüft am 12.03.2025.

Neumann, Anas; Hajji, Adnene; Rekik, Monia; Pellerin, Robert (2022): A model for advanced planning systems dedicated to the Engineer-To-Order context. In: *International Journal of Production Economics* 252, S. 108557. DOI: 10.1016/j.ijpe.2022.108557.

Neumann, Anas; Hajji, Adnene; Rekik, Monia; Pellerin, Robert (2024): Integrated planning and scheduling of engineer-to-order projects using a Lamarckian Layered Genetic Algorithm. In: *International Journal of Production Economics* 267, S. 109077. DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.109077.

Open Next (2024): Anforderungskatalog. Online verfügbar unter <https://open-next.de/wiki/anforderungskatalog/#h-rolle-des-anforderungskatalogs-in-der-digitalen-transformation>, zuletzt aktualisiert am 15.10.2024, zuletzt geprüft am 18.03.2025.

Ovacik, Irfan M. (2011): Advanced Planning and Scheduling Systems: The Quest to Leverage ERP for Better Planning. In: Karl G. Kempf, Pinar Keskinocak und Reha Uzsoy (Hg.): *Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise. A State of the Art Handbook*, Volume 1, Bd. 151. Boston, MA: Springer US (SpringerLink Bücher, 151), S. 33–43.

Papaioannou, Diana; Sutton, Anthea; Carroll, Christopher; Booth, Andrew; Wong, Ruth (2010): Literature searching for social science systematic reviews: consideration of a range of search techniques. In: *Health information and libraries journal* 27 (2), S. 114–122. DOI: 10.1111/j.1471-1842.2009.00863.x.

Park, Kyu Tae; Yang, Jinho; Noh, Sang Do (2021): VREDI: virtual representation for a digital twin application in a work-center-level asset administration shell. In: *J Intell Manuf* 32 (2), S. 501–544. DOI: 10.1007/s10845-020-01586-x.

Park, Kyu-Tae; Lee, Ju-Yong; Park, Moon-Won; Park, Yang Ho; Lee, Joung-Yun; Choi, Yun-Hyok (2024): Models and P4R asset description for digital twin-based advanced planning and scheduling using cyber-physical integration for resilient production operation. In: *Journal of Manufacturing Systems* 77, S. 127–153. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.08.030.

Petticrew, Mark; Roberts, Helen (2006): *Systematic reviews in the social sciences. A practical guide*. 12. [Dr.]. Malden, Mass.: Blackwell Publ.

Pohl, Klaus; Rupp, Chris (2015): *Basiswissen Requirements Engineering : Aus- und Weiterbildung nach IREB-Standard zum Certified Professional for Requirements Engineering Foundation Level*. Heidelberg, GERMANY: dpunkt.verlag. Online verfügbar unter <http://ebookcentral.proquest.com/lib/ulbdarmstadt/detail.action?docID=2029882>.

Qu, T.; Yang, H. D.; Huang, George Q.; Zhang, Y. F.; Luo, H.; Qin, W. (2012): A case of implementing RFID-based real-time shop-floor material management for household electrical appliance manufacturers. In: *J Intell Manuf* 23 (6), S. 2343–2356. DOI: 10.1007/s10845-010-0476-2.

Reis, Jacqueline Zonichenn; Gonçalves, Rodrigo Franco (2018): The Role of Internet of Services (IoS) on Industry 4.0 Through the Service Oriented Architecture (SOA). In: Ilkyeong Moon, Gyu M. Lee, Jinwoo Park, Dimitris Kiritsis und Gregor von Cieminski (Hg.): *Advances in Production*

Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0. IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2018, Seoul, Korea, August 26-30, 2018, Proceedings, Part II, Bd. 536. Cham: Springer International Publishing (SpringerLink Bücher, 536), S. 20–26.

Reuter, Boris; Rohde, Jens (2015): Coordination and Integration. In: Hartmut Stadtler, Christoph Kilger und Herbert Meyr (Hg.): Supply Chain Management and Advanced Planning. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 241–256.

Sablič, Gregor (2024): Why do 50% of projects for the implementation of APS solutions fail? Qlector. Online verfügbar unter <https://qlector.com/blog/why-do-50-of-projects-for-the-implementation-of-aps-solutions-fail/>, zuletzt aktualisiert am 04.05.2025, zuletzt geprüft am 04.05.2025.

Samaranayake, P.; Kiridena, S. B.; Cai, D. (2014): Planning and scheduling across the supply chain: Simulation-based validation of the unitary structuring technique. In: 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM 2014). Petaling Jaya], Selangor Darul Ehsan, Malaysia, 9 - 12 December 2014. 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Selangor Darul Ehsan, Malaysia, 12/9/2014 - 12/12/2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1275–1279.

Santa-Eulalia, Luis Antonio de; DAmours, Sophie; Frayret, Jean-Marc; Cesar, Claudio; Cambiaghi, Rodrigo (2011): Advanced Supply Chain Planning Systems (APS) Today and Tomorrow. In: Dilek Onkal (Hg.): Supply Chain Management. Pathways for Research and Practice. Erscheinungsort nicht ermittelbar: IntechOpen.

Schuh, Guenther; Potente, Till; Thomas, Christina; Hauptvogel, Annika (2013): Cyber-Physical Production Management. In: Vittal Prabhu, Marco Taisch und Dimitris Kiritsis (Hg.): Advances in production management systems. Sustainable production and service supply chains; IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2013, State College, PA, USA, September 9-12, 2013; proceedings, Bd. 415. Heidelberg: Springer (IFIP International Federation for Information Processing, 415), S. 477–484.

SEBoK Editorial Board (2014): The guide to the systems engineering body of knowledge (SEBoK), version 1.3. BKCASE Editorial Board. Online verfügbar unter https://students.aiu.edu/submissions/profiles/resources/onlineBook/B9i9W4_systems%20engineering.pdf, zuletzt geprüft am 14.03.2025.

Seitz, Alexander; Grunow, Martin; Akkerman, Renzo (2020): Data driven supply allocation to individual customers considering forecast bias. In: *International Journal of Production Economics* 227, S. 107683. DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107683.

Siepmann, David (2016): Industrie 4.0 – Grundlagen und Gesamtzusammenhang. In: Armin Roth (Hg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, S. 17–82.

Smart Businessplan (2025): Produkt & Dienstleistungen. Online verfügbar unter <https://smartbusinessplan.de/businessplan-lexikon/produkt-dienstleistungen/>, zuletzt aktualisiert am 19.03.2025, zuletzt geprüft am 19.03.2025.

Sobottka, Thomas; Kamhuber, Felix; Faezirad, Mohammadali; Sihn, Wilfried (2019): Potential for Machine Learning in Optimized Production Planning with Hybrid Simulation. In: *Procedia Manufacturing* 39, S. 1844–1853. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.254.

SOFTSELECT (2025): Erfahren Sie hier: Was ist und was bedeutet Anforderungskatalog? Online verfügbar unter <https://www.softselect.de/business-software-glossar/anforderungskatalog>, zuletzt aktualisiert am 18.03.2025, zuletzt geprüft am 18.03.2025.

Stadtler, Hartmut (2012): Final Remarks. In: Hartmut Stadtler, Bernhard Fleischmann, Martin Grunow, Herbert Meyr und Christopher Sürle (Hg.): *Advanced Planning in Supply Chains*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 289–293.

Stadtler, Hartmut (2015): Supply Chain Management: An Overview. In: Hartmut Stadtler, Christoph Kilger und Herbert Meyr (Hg.): *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 3–28.

Steger-Jensen, Kenn; Hvolby, Hans-Henrik; Nielsen, Peter; Nielsen, Izabela (2011): Advanced planning and scheduling technology. In: *Production Planning & Control* 22 (8), S. 800–808. DOI: 10.1080/09537287.2010.543563.

Norm ISO/IEC/IEEE 29148:2018, 2018-11: Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering.

Norm ISO/IEC/IEEE 12207:2017, 2017-11: Systems and software engineering — Software life cycle processes.

t2informatik (2019): Was ist ein Anforderungskatalog? - Wissen kompakt. Online verfügbar unter <https://t2informatik.de/wissen-kompakt/anforderungskatalog/>, zuletzt aktualisiert am 19.03.2019, zuletzt geprüft am 18.03.2025.

TSAI, MING-FONG; LI, WEI-TSE; CHEN, LIEN-WU (2024): Dynamic Productivity Prediction and New Production Feature Selection Methods for Advanced Planning Scheduling. In: *Journal of Information Science and Engineering* 40 (2), S. 341–357. DOI: 0009.

van Nieuwenhuyse, Inneke; Boeck, Liesje de; Lambrecht, Marc; Vandaele, Nico J. (2011):

Advanced resource planning as a decision support module for ERP. In: *Computers in Industry* 62 (1), S. 1–8. DOI: 10.1016/j.compind.2010.05.017.

Vidoni, Melina; Montagna, Jorge Marcelo; Vecchietti, Aldo (2017): Improving the Assessment of Advanced Planning Systems by Including Optimization Experts' Knowledge. In: Slimane Hammoudi, Michal Smialek, Oliver Camp und Joaquim Filipe (Hg.): Proceedings of the 19th International Conference on Enterprise Information Systems, Volume 1. April 26 - 29, 2017, Porto, Portugal. 19th International Conference on Enterprise Information Systems. Porto, Portugal, 4/26/2017 - 4/29/2017. SCITEPRESS: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, S. 510–517.

Vidoni, Melina; Montagna, Jorge Marcelo; Vecchietti, Aldo (2020): Analysis, design and development of advanced planning systems. In: *IJISE* 36 (3), Artikel 110937, S. 361–382. DOI: 10.1504/IJISE.2020.110937.

Vidoni, Melina; Vecchietti, Aldo (2016): Towards a Reference Architecture for Advanced Planning Systems. In: Slimane Hammoudi, Leszek Maciaszek, Michele M. Missikoff, Olivier Camp und José Cordeiro (Hg.): ICEIS 2016. Proceedings of the 18th International Conference on Enterprise Information Systems : Rome, Italy, April 25-28, 2016. 18th International Conference on Enterprise Information Systems. Rome, Italy, 4/25/2016 - 4/28/2016. Institute for Systems and Technologies of Information, Control and Communication. Setúbal, Portugal: SCITEPRESS - Science and Technology Publications Lda, S. 433–440.

Vidoni, Melina C.; Vecchietti, Aldo R. (2015a): A systemic approach to define and characterize Advanced Planning Systems (APS). In: *Computers & Industrial Engineering* 90, S. 326–338. DOI: 10.1016/j.cie.2015.10.006.

Vidoni, Melina C.; Vecchietti, Aldo R. (2015b): An intelligent agent for ERP's data structure analysis based on ANSI/ISA-95 standard. In: *Computers in Industry* 73, S. 39–50. DOI: 10.1016/j.compind.2015.07.011.

Vieira, Jaison; Deschamps, Fernando; Valle, Pablo Deivid (2021): Advanced Planning and Scheduling (APS) Systems: A Systematic Literature Review. In: Linda Newnes, Susan Lattanzio, Bryan R. Moser, Josip Stjepandić und Nel Wognum (Hg.): Transdisciplinary Engineering for Resilience: Responding to System Disruptions: IOS Press (Advances in Transdisciplinary Engineering).

Wang, Chen; Zhang, Yongbin; Fu, Xiuli; Ding, Haodong (2023): Design of APS-based production planning system for automotive companies. In: Proceedings of the 2023 4th International Conference on Big Data Economy and Information Management. BDEIM 2023: 2023 4th

International Conference on Big Data Economy and Information Management. Zhengzhou China, 08 12 2023 10 12 2023. Erscheinungsort nicht ermittelbar: Association for Computing Machinery (ACM Digital Library), S. 225–229.

Wang, Li-Chih; Chen, Chun-Chih; Liu, Jen-Li; Chu, Pei-Chun (2021): Framework and deployment of a cloud-based advanced planning and scheduling system. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 70, S. 102088. DOI: 10.1016/j.rcim.2020.102088.

Wiendahl, Hans-Hermann; Kluth, Andreas (2018): Advanced Planning & Scheduling - APS. In: IT-Matchmaker.guide Business Lösungen Industrie 4.0-. Aachen: Trovarit, S. 14–17.

Wiers, Vincent C. S.; Kok, A. G. de (2018): Designing, Selecting, Implementing and Using APS Systems. Cham: Springer International Publishing.

Yuan, X.; Chen, Y. W.; Liu, B.; Ming, X. G. (2020): Advanced Planning and Scheduling System Based on Multi-resource Closed-loop Management. In: IEEE IEEM virtual. 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) : 14-17 December 2020. 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Singapore, Singapore, 12/14/2020 - 12/17/2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1291–1295.

Zhong, Ray Y.; Li, Z.; Pang, L. Y.; Pan, Y.; Qu, T.; Huang, George Q. (2013): RFID-enabled real-time advanced planning and scheduling shell for production decision making. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 26 (7), S. 649–662. DOI: 10.1080/0951192X.2012.749532.

A Tabelle zum Anforderungskatalog

| Funktionale Anforderungen | |
|---------------------------|---|
| FA-1 | Robuste Planung gegenüber realen Unsicherheiten und Störungen: (Li et al. 2020, S. 1229) |
| FA-1.1 | Ereignisgesteuerte Planung: (Hahn und Packowski 2015, S. 47) (Park et al. 2024, S. 127–129) |
| FA-1.2 | Stochastische Modellierung: (Bocca et al. 2015, S. 48–54) (Hahn und Packowski 2015, S. 47) |
| FA-1.3.1 FA-1.3.2 | Differenzierte Modellierung nicht-physischer Aufgaben: (Neumann et al. 2022, S. 4) (Neumann et al. 2024, S. 2–4) |
| FA-1.4 | Szenarien-basierte Planung im SNP-Modul: (Neumann et al. 2022, S. 4) (Stadtler 2012, S. 291–292) |
| FA-1.5 | Planung und Prognose für neue Produkte: (TSAI et al. 2024, S. 342) |
| FA-1.6.1 FA-1.6.2 | Verhaltensensitive Allokation: (Montesco et al. 2015, S. 2280) (Seitz et al. 2020, S. 1–2) |
| FA-2 | Multiobjektivoptimierung: (Allaoui et al. 2019, S. 763) |

| | | |
|-------------|--|---|
| FA-3 | Integration und Koordination in der hierarchischen Planung: | |
| | (Asmussen et al. 2018, S. 546) | |
| | (Bocca et al. 2015, S. 45) | |
| | (Ehm und Freitag 2016, S. 585) | |
| | (Kallestrup et al. 2014, S. 49) | |
| | (Márquez et al. 2024, S. 25) | |
| | (Mousavi et al. 2023, S. 1–2) | |
| | FA-3.1 | Simultane Berücksichtigung von Losgrößen- und Ablaufplanung: |
| | | (Hahn und Packowski 2015, S. 47) |
| | | (Samaranayake et al. 2014, S. 1275) |
| | | (Stadtler 2012, S. 291–292) |
| | FA-3.2 | Synchronisation der Teilpläne: |
| | | (Li et al. 2020, S. 1230) |
| | | (Li et al. 2022, S. 1356) |
| FA-4 | Unterstützung kollaborativer SC-Planung: | |
| | FA-4.1 | (Allaoui et al. 2019, S. 764) |
| | FA-4.2 | (Kristianto et al. 2011, S. 108) |
| | | (Kristianto et al. 2011, S. 124) |
| | | (Leu et al. 2018, S. 1205) |
| FA-5 | Koordination der Ressourcen: | |
| | (Samaranayake et al. 2014, S. 1275) | |
| | (Yuan et al. 2020, S. 1295) | |
| FA-6 | Synchronisation auf Shopfloor-Ebene: | |
| | (Lin et al. 2018, S. 4) | |
| | FA-6.1 | Dynamische Maschinenlaufzeit: |

| | | |
|-------------------------------------|---------------|--|
| | | (TSAI et al. 2024, S. 342) |
| | FA-6.2 | Sequenzierung und Ressourcenausgleich: (Kreiter und Pferschy 2020, S. 1141–1144) (Hsu et al. 2018, S. 428) (Liu et al. 2019, S. 1533) (Schuh et al. 2013, S. 478) (Vieira et al. 2021, S. 390) |
| | FA-7 | Berücksichtigung komplexer Produktionsrestriktionen: (Krenczyk und Jagodzinski 2015, S. 452) (Liu et al. 2019, S. 1536) (Montesco et al. 2015, S. 2273) (Wang et al. 2021, S. 1–2) |
| Leistungsanforderung: | | |
| | LA-1 | Rechenzeiten: (Kreiter und Pferschy 2020, S. 1164) (Neumann et al. 2022, S. 15) (Sobottka et al. 2019, S. 1846) (Steger-Jensen et al. 2011, S. 805) (Wang et al. 2021, S. 1–2) |
| Schnittstellenanforderungen: | | |
| | SA-1 | Integration mit bestehenden Unternehmenssystemen: (Arica und Powell 2014, S. 160–161) (Da Silva et al. 2014, S. 192) (Hahn und Packowski 2015, S. 47) (Kjellsdotter Ivert 2012, S. 72) |

| | |
|---|--|
| | <p>(Kucharska et al. 2015, S. 1–7)</p> <p>(van Nieuwenhuysse et al. 2011, S. 7)</p> <p>(Vidoni und Vecchietti 2015a, S. 326)</p> <p>(Vidoni und Vecchietti 2015b, S. 39)</p> <p>(Vidoni und Vecchietti 2016, S. 433)</p> <p>(Wang et al. 2021, S. 1–2)</p> |
| SA-2 | <p>Anbindung externer Prognosen-, Planungs- und Optimierungstools:</p> <p>(Neumann et al. 2022, S. 15)</p> |
| SA-3 | <p>Schnittstellen für unternehmensübergreifende kollaborative Planung:</p> <p>(Allaoui et al. 2019, S. 764)</p> <p>(Kristianto et al. 2011, S. 124)</p> |
| Datenanforderungen | |
| DA-1 | <p>Standardisierte Datenstrukturen und Normenunterstützung:</p> <p>(Allaoui et al. 2019, S. 764)</p> <p>(Arica und Powell 2014, S. 160–161)</p> |
| Datenqualitätsprüfung und Validierung: | |
| DA-2.1 | <p>(Arica und Powell 2014, S. 160–161)</p> <p>(Garcia-Sabater et al. 2012, S. 207)</p> <p>(Herrmann et al. 2022, S. 194–195)</p> <p>(Kjellsdotter Ivert 2012, S. 72)</p> |
| DA-2.2 | <p>(Arica und Powell 2014, S. 160–161)</p> <p>(Vidoni und Vecchietti 2015a, S. 332)</p> |
| DA-3 | <p>Echtzeitdatenintegration aus der Produktion:</p> <p>(Arica und Powell 2014, S. 160–161)</p> <p>(Li et al. 2022, S. 1356)</p> |

| | |
|---|---|
| | (Zhong et al. 2013, S. 4) |
| DA-4 | Erweiterte Asset-Beschreibung für DT-basiertes APS: (Park et al. 2024, S. 128) |
| Anforderung an Systemsicherheit und Datenschutz: | |
| SDA-1 | (Wang et al. 2023, S. 227) |
| Anforderungen an die Mensch-System-Integration: | |
| MA-1 | Allgemeine Unterstützung: (Hsu et al. 2018, S. 428) (Kjellsdotter Ivert 2012, S. 14) (Kreiter und Pferschy 2020, S. 1160) (Liu et al. 2019, S. 1533) (Man und Strandhagen 2018, S. 1227) (Ovacik 2011, S. 42) (Schuh et al. 2013, S. 478) (Vieira et al. 2021, S. 389–390) |
| MA-2 | Menschliche Mitwirkung bei Unsicherheiten: (Mousavi et al. 2019, S. 1043) (Mousavi et al. 2023, S. 2) (Stadtler 2012, S. 291) |
| MA-3 | Berücksichtigung gezielter Sondereingriffe: (Neumann et al. 2022, S. 15) |
| Benutzbarkeitsanforderungen: | |
| BA-1 | (Neumann et al. 2022, S. 15) (Vidoni und Vecchietti 2015a, S. 335) |
| BA-2 | (Mousavi et al. 2023, S. 14) |

| Adaptierbarkeitsanforderungen: | |
|--|---|
| AA-1 | <p>generisch erweiterbare Architektur:</p> <p>(Gahm 2022, S. 2)</p> <p>(Fachini et al. 2018, S. 571–572)</p> <p>(Hsu et al. 2018, S. 428)</p> <p>(Li et al. 2022, S. 1356)</p> <p>(Liu et al. 2019, S. 1533)</p> <p>(Vidoni und Vecchietti 2015a, S. 326–327)</p> <p>(Vidoni et al. 2020, S. 361–363)</p> <p>(Wang et al. 2021, S. 1)</p> <p>(Zhong et al. 2013, S. 2–4)</p> |
| AA-2 | <p>kontinuierliche Anpassung an veränderte Produktionsbedingungen:</p> <p>(Ju et al. 2020, S. 22)</p> <p>(Schuh et al. 2013, S. 478)</p> |
| Wirtschaftlichkeitsanforderung | |
| WA-1 | <p>(Černá 2014, S. 748–749)</p> <p>(Fachini et al. 2018, S. 571–572)</p> <p>(Garcia-Sabater et al. 2012, S. 200)</p> <p>(Hsu et al. 2018, S. 428)</p> <p>(Krenczyk und Jagodzinski 2015, S. 452)</p> <p>(Li et al. 2022, S. 1356)</p> <p>(Liu et al. 2019, S. 1533)</p> <p>(Vieira et al. 2021, S. 390)</p> <p>(Wang et al. 2021, S. 2)</p> |
| Anforderung an gesetzliche und betriebliche Transportrestriktionen: | |

| | |
|--|---|
| RA-1 | (Stadtler 2012, S. 292) |
| Anforderungen an die Lebenszyklusunterstützung: | |
| SLA-1 | Optimierungsexperten in den Entwurf und die Bewertung der Systemarchitektur: (Vidoni et al. 2017, S. 510–511) (Vidoni et al. 2020, S. 364–365) |
| SLA-2 | Schulungsprogramme: (Allaoui et al. 2019, S. 764) (Kjellsdotter Ivert 2012, S. 72–73) (Stadtler 2012, S. 289) (Vieira et al. 2021, S. 391) (Wang et al. 2021, S. 5) |
| SLA-3 | Unterstützung des oberen Managements: (Kjellsdotter Ivert 2012, S. 72–73) |
| Verifizierbarkeit: | |
| V-1 | Systematische Evaluierung der Systemarchitektur und Modelle: (Vidoni et al. 2017, S. 510–511) |
| V-2 | Praxistauglichkeit: (Asmussen et al. 2018, S. 547) (Sobottka et al. 2019, S. 1844) (Vidoni und Vecchiotti 2015a, S. 327) (Zhong et al. 2013, S. 4) |

B Tabelle zur Bewertung der Lösungsansätze

| Lösungsansatz | Erfüllte Anforderungen |
|---|---|
| Cloud-basierte APS-Systeme: | |
| (Hsu et al. 2018, S. 429–434) (Gahm 2022, S. 11–21) (Liu et al. 2019, S. 1533–1539) (Wang et al. 2021, S. 3–10) | AA-1, BA-1, BA-2, FA-3.2, SA-1, SDA-1, WA-1 |
| APS-Lösungen für kollaborative Planung: | |
| (Kristianto et al. 2011, S. 114–124) | FA-4.1, SA-3, WA-1 |
| (Allaoui et al. 2019, S. 765–771) | FA-2, FA-4.1, SA-3 |
| Datengetriebene Lösungsansätze: | |
| (Hahn und Packowski 2015, S. 45–50) | DA-3, FA-1.1, LA-1, SA-1 |
| (Arica und Powell 2014, S. 161–164) (Kucharska et al. 2015, S. 7–14) | DA-1, DA-3, SA-1, FA-3 |
| (Zhong et al. 2013, S. 5–12) (Lin et al. 2018, S. 3–8) | BA-2, FA-3, DA-3, AA-1, FA-6, SDA-1 |
| (Seitz et al. 2020, S. 3–11) | DA-3, FA-1.6.2, SA-2 |
| (TSAI et al. 2024, S. 345–355) | DA-3, FA-1.5, FA-6.1, SA-1 |
| CPS-basierte APS-Systeme: | |
| (Schuh et al. 2013, S. 479–483) (Li et al. 2022, S. 1358–1364) (Li et al. 2022, S. 1358–1364) (Park et al. 2024, S. 144–151) | FA-1, FA-1.1, FA-6.2, DA-3, FA-6.1, FA-3.2, DA-1, DA-4 |
| Ansätze zur Bewertung der Datenqualität: | |
| (Vidoni und Vecchietti 2015b, S. 40–49) | DA-1, DA-2.1, DA-2.2, SA-1 |

| | |
|---|---|
| (Herrmann et al. 2022, S. 196–201) | |
| Entscheidungsunterstützungstools: | |
| (Kallestrup et al. 2014, S. 52–61) | FA-6.3, MA-2, |
| (Mousavi et al. 2019, S. 1045–1048) | |
| (Mousavi et al. 2023, S. 5–20) | BA-1, BA-2, LA-1, MA-1 |
| Algorithmische und simulationsgestützte Erweiterungen: | |
| (Steger-Jensen et al. 2011, S. 801–805) | LA-1 |
| (Kreiter und Pferschy 2020, S. 1146–1175) | FA-6.2, FA-7 |
| (Montesco et al. 2015, S. 2274–2280) | FA-1, FA-7, LA-1 |
| (Neumann et al. 2022, S. 2–15) | AA-1, AA-2, FA-1.3.1, FA-1.3.2, SA-2, SDA-1 |
| (Neumann et al. 2024, S. 5–11) | |
| (Krenczyk und Jagodzinski 2015, S. 451–460) | BA-1, BA-2, FA-7, SA-1, SA-2 |
| (Sobottka et al. 2019, S. 1847–1851) | FA-2, SA-1 |
| (Ju et al. 2020, S. 22–34) | AA-2 |
| Architekturübergreifende Integrationsansätze: | |
| (Da Silva et al. 2014, S. 192–196) | FA-3, SA-1 |
| (Asmussen et al. 2018, S. 551–561) | FA-3, V-2 |
| (Ehm und Freitag 2016, S. 586–589) | FA-3 |
| (Samaranayake et al. 2014, S. 1275–1279) | FA-3, FA-3.1 |
| (Márquez et al. 2024, S. 2–25) | FA-3.1, SA-2, V-2 |
| Weitere spezialisierte Lösungsansätze: | |
| (Yuan et al. 2020, S. 1291–1295) | FA-5 |
| (Wang et al. 2023, S. 227–228) | SDA-1 |
| (Fachini et al. 2018, S. 574–585) | AA-1, AA-2, V-2, WA-1 |
| (Vidoni und Vecchietti 2015a, S. 326–338) | AA-1, SA-1, SLA-1, V-1, V-2 |



| | |
|--|--|
| (Vidoni und Vecchietti 2016, S. 433–440) | |
| (Vidoni et al. 2017, S. 510–517) | |
| (Vidoni et al. 2020, S. 361–382) | |