

Forschungsberichte aus dem  
**wbk** Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Florian Stamer

**Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung  
in variantenreicher Produktion**  
Ein adaptiver Ansatz mithilfe von  
Reinforcement Learning

Band 260



Forschungsberichte aus dem  
wbk Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer  
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza  
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Florian Stamer

**Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in  
variantenreicher Produktion**  
Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement  
Learning

Band 260



**Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in  
variantenreicher Produktion**  
**Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

**Dissertation**

von

M.Sc. Florian Stamer

Tag der mündlichen Prüfung: 11.07.2022

Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans
Korreferent:	Prof. Dr. Torbjörn Netland

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8803-8  
ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren  
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort des Herausgebers**

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze



## **Vorwort des Verfassers**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit als Hauptreferentin und das mir entgegengebrachte Vertrauen in den vergangenen Jahren. Ihre immerwährende Förderung ermöglichte nicht nur diese Arbeit, sondern auch meine persönliche Weiterentwicklung. Weiter danke ich Herrn Prof. Dr. Torbjørn Netland und Herrn Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans für ihr Interesse an meiner Arbeit und der Übernahme des Korreferats sowie Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin für den Prüfungsvorsitz.

Allen Kolleginnen und Kollegen des wbk in Karlsruhe, insbesondere im Bereich PRO, danke ich für die fortwährende Unterstützung und den kollegialen Austausch in den vergangenen Jahren. Namentlich seien an dieser Stelle Rainer Silbernagel, Sina Peukert, Shun Yang, Martin Benfer, Leonard Overbeck und Bastian Verhaelen erwähnt. Die gemeinsame Zeit wird mir immer in guter Erinnerung bleiben. Für das Korrekturlesen dieser Arbeit danke ich Sina Peukert, Bastian Verhaelen, Marvin May und Rainer Silbernagel. Besonders danken möchte ich außerdem Matthias Henzi, Fabian Ochs, Alexander Werle, Peter Lorenz und Paul Bizenberger.

Meinen Eltern Peter und Inge Stamer sowie meinen Geschwistern Felix Stamer, Julia Stamer und Philine Stamer danke ich von Herzen für ihre immerwährende Unterstützung und Rücksichtnahme - ohne Euch stünde ich nicht da, wo ich heute stehe. Abschließend gilt mein großer Dank Kirsten Rotmann für die Unterstützung, den Rückhalt und das Verständnis zu jeder Zeit auf dem langen Weg zur Erstellung dieser Arbeit.

Karlsruhe, im Juli 2022

Florian Stamer





## Zusammenfassung

Das Wertschöpfungsnetzwerk ist heute zur dominierenden Wertschöpfungsstruktur im Bereich der Produktion geworden. Für produzierende Unternehmen in solchen Netzwerken ist das Auftragsmanagement eine zentrale Aufgabe, die sich in einem Umfeld wachsender Herausforderungen befindet. Zum einen setzen kürzere Produktlebenszyklen und zunehmende Individualisierung die Unternehmen unter Druck. In diesem Zusammenhang hat die variantenreiche Produktion an Bedeutung gewonnen. Andererseits steigen die Wahrscheinlichkeit und die Auswirkungen von Störungen, insbesondere in Netzwerken, was die Leistungsfähigkeit von Produktionssystemen herausfordert.

Ein vielversprechender Ansatz in diesem Zusammenhang ist die Verwendung einer dynamischen Lieferzeit-Preisgestaltung über eine kontinuierliche Preis-Lieferzeit-Funktion. Durch den Einsatz einer dynamischen Lieferzeit-Preisgestaltung könnte es möglich sein, die Nachfrage im Netz mit den Fähigkeiten des Produktionssystems in Einklang zu bringen. Die Idee ist, Nachfragespitzen zu verschieben und die Kunden entsprechend ihrer individuellen Präferenzen zu beliefern. Auf diese Weise kann der Gesamtgewinn gesteigert werden, obwohl die Kapazitäten konstant bleiben.

Um die aufgestellten Hypothesen zu untersuchen, wird in dieser Arbeit eine Methodik zur dynamischen Lieferzeit-Preisgestaltung für die variantenreiche Produktion entwickelt. In einem ersten Schritt werden Leistungskennzahlen und eine Zielfunktion festgelegt. In einem zweiten Schritt wird ein Actor Critic Reinforcement-Learning-Verfahren als Grundlage für ein Lösungsmodell motiviert. Für das Training und das spätere Testen des resultierenden Lernagenten wird ein Simulationsmodell als Umgebung entwickelt und ein Verfahren zur Durchführung und Auswertung der Experimente ausgearbeitet.

Der Ansatz wurde im Rahmen der BMBF-Forschungsprojekte ReKoNeT und BaSys4SupplyQ diskutiert und angewendet. Die Ergebnisse aus zwei Anwendungsfällen zeigen, dass der Ansatz in der Lage ist, bei gleicher Kapazität deutlich höhere Gewinne zu erzielen und Nachfragespitzen in gewissem Umfang zu glätten. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass das Einsparen von Kapazitäten keine dominante Strategie zu sein scheint. Dies spiegelt die anwendungsspezifische Berücksichtigung verschiedener Ziele wie Service, Kapazitätskosten und Marge wider.



## **Abstract**

Today, the value network has become the dominant value creation structure in the area of production. For manufacturing companies in such networks the order management is a central task which faces an environment of growing challenges. On the one hand, shorter product life cycles and increasing individualisation are putting companies under pressure. In this context, multi-variant production has gained in importance. On the other hand, the probability and impact of disruptions are increasing, especially in networks, which challenges the capabilities of production systems.

A promising approach in this context is the use of dynamic pricing via a continuous price-lead-time function. By using a dynamic pricing it would be possible to bring the demands in the network in line with the capabilities of the production system. The idea is to shift demand peaks and to supply customers according to their individual preferences. This way, the overall profit can be increased although the capacities remain constant.

To achieve and examine the described effects, the aim of this thesis is to develop a methodology for dynamic pricing for the make to order and assemble to order production. In the first step, key performance indicators and an objective function are established. Second, an actor critic reinforcement learning method is motivated, since reinforcement learning has already proven its potential to handle complex optimisation tasks efficiently in comparable domains. For the training and the later testing of the resulting learning agent, a simulation model is developed as an environment and a procedure for the execution and evaluation of the experiments is worked out.

The approach has been discussed and applied within the BMBF research projects ReKoNeT and BaSys4SupplyQ. The results from two use cases show that the approach is able to achieve significantly higher profits with the same capacity and to smooth demand peaks to a certain extent. At the same time, the results indicate that saving on capacities does not seem to be a dominant strategy. Instead, it is reasonable to maximise service for selected customers in order to justify higher margins. This reflects the application-specific consideration of various targets, such as service, capacity costs and margin. Thus, the results also reveal the central importance of aligning the parameterisation of the method with the strategy and goals of the applying company.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Formelverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangslage	1
1.2 Forschungsfrage	3
1.3 Zielsetzung	3
1.4 Aufbau der Arbeit	5
<b>2 Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1 Variantenreiche Produktion	6
2.1.1 Allgemeine Grundlagen zur Produktion	6
2.1.2 Grundlagen der variantenreichen Produktion	8
2.2 Ablaufplanung und Auftragsmanagement als Teil der Produktionsplanung und -steuerung	9
2.2.1 Ablaufplanung als Teil der Produktionsplanung und -steuerung	10
2.2.2 Auftragsmanagement als Teil der Produktionsplanung und -steuerung	12
2.3 Preisgestaltung und Kundenverhalten	13
2.3.1 Grundlagen der dynamischen Lieferzeit-Preisgestaltung	14
2.3.2 Modellierung von Kundenverhalten mit Entscheidungstheorie	16
2.4 Simulation im Produktionsumfeld	18
2.4.1 Grundlagen der Simulation im Produktionsumfeld	18
2.4.2 Statistische Versuchsplanung und Tests in einer Simulationsstudie	19
2.5 Methoden für die dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung	22
2.6 Reinforcement Learning als Methode zur dynamischen Lieferzeit-Preisgestaltung	24
2.6.1 Grundlagen des Reinforcement Learning	24
2.6.2 Neuronale Netze zur Funktionsapproximation	28
2.6.3 Klassifikation von Reinforcement Learning Verfahren	31

---

2.6.4	Actor Critic Verfahren	32
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung</b>	<b>35</b>
3.1	Anforderungen an den Lösungsansatz	35
3.2	Vorstellung der Lösungsansätze	36
3.2.1	Ansätze mit Reinforcement Learning	36
3.2.2	Ansätze mit analytischen Lösungsverfahren	38
3.2.3	Ansätze mit Entscheidungsbaumverfahren	41
3.2.4	Ansätze mit Heuristiken	44
3.2.5	Sonstige Ansätze zur dynamischen Lieferzeit-Preisgestaltung	46
3.3	Ableitung des Forschungsdefizits	48
<b>4</b>	<b>Überblick des Lösungsansatzes</b>	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung für die variantenreiche Produktion</b>	<b>55</b>
5.1	Zielsystem und Reinforcement Learning Modell	55
5.1.1	Erläuterung des Zielsystems	55
5.1.2	Reinforcement Learning Lösungsmodell	60
5.2	Umweltmodul	62
5.2.1	Netzwerkebene	63
5.2.2	Standortebene	75
5.3	Agentenmodul	84
5.3.1	Ableitung der Belohnungsfunktion für den Belohnungswert $R_t$	85
5.3.2	Beobachtbarer Zustand $S_t$ der Umwelt	88
5.3.3	Aktion $A_t$ des Agenten	93
5.3.4	Konzeptionelle Architektur von Actor und Critic	98
5.3.5	Trainingsprozess von Actor und Critic	100
5.4	Versuchsmodul	101
5.4.1	Funktionsweise und Aufbau des Versuchsmoduls	102
5.4.2	Hyperparameteroptimierung	104
5.4.3	Hypothesen zum Testen des Ansatzes hinsichtlich des Potenzials	109

---

5.5	Implementierung, Nutzung und Verifikation	111
5.5.1	Implementierung	111
5.5.2	Nutzung	114
5.5.3	Verifikation	114
<b>6</b>	<b>Erprobung des Lösungsansatzes</b>	<b>116</b>
6.1	Anwendung im Bereich der Hochpräzisionsgewichte	116
6.1.1	Vorstellung des Anwendungsfalls	116
6.1.2	Exemplarische Anwendung und Ergebnisse	122
6.2	Anwendung im Bereich der Pneumatikzylinderproduktion	139
6.2.1	Vorstellung des Anwendungsfalls	140
6.2.2	Exemplarische Anwendung und Ergebnisse	144
<b>7</b>	<b>Diskussion, kritische Würdigung und Ausblick</b>	<b>153</b>
7.1	Diskussion der Ergebnisse	153
7.2	Kritische Würdigung	155
7.3	Ausblick	158
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>161</b>
<b>9</b>	<b>Liste der eigenen Veröffentlichungen</b>	<b>163</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>165</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>		<b>I</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>		<b>IV</b>
<b>Anhang</b>		<b>IX</b>
A1	Ausführungen zu den Grundlagen der Simulation im Produktionsumfeld	IX
A1.1	Weiterführende Grundlagen zu Simulation im Produktionsumfeld	IX
A1.2	Vorgehensmodell zur Durchführung einer Simulationsstudie	XI
A2	Beispiel einer Exponentialverteilung als Bestellhäufigkeit	XIII
A3	Beispiel einer Poissonverteilung als Bestellmenge	XIII
A4	Beispiel einer Dreiecksverteilung als Fertigungszeit	XIV
A5	Algorithmus zur Ablaufplanung	XIV



---

A6	Ergänzung zur Bestimmung des Nutzenmaximums	XVI
A7	Erläuterungen zur Wahl der zufallsbasierten Suche	XVI
A8	Überlegungen zur Softwarearchitektur	XVII
A9	Erläuterungen zur Konfigurationsdatei	XXI
A10	Beispiel für ein Hochpräzisionsgewicht nach Norm	XXV
A11	Normtabelle der OIML	XXVI
A12	Prozessdiagramm für E1-Gewichte	XXVII
A13	Prozessdiagramm für E2-Gewichte	XXVIII
A14	Prozessdiagramm für F1-Gewichte	XXIX
A15	Prozessdiagramm für F2-Gewichte	XXX
A16	Prozessdiagramm für M-Gewichte	XXXI
A17	Beispiel für einen Fertigungsplan für Anwendungsfall 1	XXXII
A18	Fertigungszeiten am Beispiel E2 für Anwendungsfall 1	XXXIII
A19	Statistische Details – statische Lieferzeit – Szenario 1 – Anwendungsfall 1	XXXV
A20	Statistische Details – flexible Lieferzeit – Szenario 1 – Anwendungsfall 1	XXXVI
A21	Statistische Details – statische Lieferzeit – Szenario 2 – Anwendungsfall 1	XXXVII
A22	Statistische Details – flexible Lieferzeit – Szenario 2 – Anwendungsfall 1	XXXVIII
A23	Statistische Details – statische Lieferzeit – Szenario 3 – Anwendungsfall 1	XXXIX
A24	Statistische Details – flexible Lieferzeit – Szenario 3 – Anwendungsfall 1	XL
A25	Beispiel für einen Pneumatikzylinder	XLI
A26	Herleitung der verkaufsrelevanten Daten im zweiten Anwendungsfall	XLI
A27	Bestimmung der Bestellmenge einer Bestellung in Anwendungsfall 2	XLII
A28	Fertigungszeiten für den Pneumatikzylinder	XLIII
A29	Herleitung der Maschinenanzahl	XLVI
A30	Maschineninvestitionskosten	XLVII

---

A31	Ausführungen zur Potenzialanalyse in Anwendungsfall 2	XLVII
A32	Statistische Details – statische Lieferzeit – Szenario 1 – Anwendungsfall 2	LII
A33	Statistische Details – flexible Lieferzeit – Szenario 1 – Anwendungsfall 2	LIII
A34	Statistische Details – statische Lieferzeit – Szenario 2 – Anwendungsfall 2	LIV
A35	Statistische Details – flexible Lieferzeit – Szenario 2 – Anwendungsfall 2	LV
A36	Statistische Details – statische Lieferzeit – Szenario 3 – Anwendungsfall 2	LVI
A37	Statistische Details – flexible Lieferzeit – Szenario 3 – Anwendungsfall 2	LVII