



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Rupert Glass

**Methodik zur multivariaten Messung  
fachlich-methodischer Kompetenzen  
für die Produktion**

**Schriftenreihe des PTW  
„Innovation Fertigungstechnik“**

Herausgeber  
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele  
Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich  
Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

**PTW**  
TU DARMSTADT

# **Methodik zur multivariaten Messung fachlich-methodischer Kompetenzen für die Produktion**

Vom Fachbereich Maschinenbau

an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

**Rupert Glass, M. Sc.**

aus Darmstadt

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich  
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart  
Tag der Einreichung: 01.02.2021  
Tag der mündlichen Prüfung: 13.04.2021

Darmstadt 2021



Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

**Rupert Glass**

**Methodik zur multivariaten Messung fachlich-  
methodischer Kompetenzen für die Produktion**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Düren 2021

### **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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8108-4

ISSN 1864-2179

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**

Eine hohe Variantenvielfalt und Kundenindividualität, kurze Produkt- und Technologielebenszyklen oder auch die digitale Transformation setzen produzierende Unternehmen unter einen hohen Anpassungsdruck. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor zur Bewältigung dieser Herausforderungen sind die Kompetenzen der Mitarbeitenden und ihre zielgerichtete Weiterentwicklung. In der vorliegenden Dissertation wird ein Messverfahren für fachlich-methodische Kompetenzen entwickelt. Dieses ist in Lernfabriken und im Produktionsumfeld von Unternehmen einsetzbar. Auf Basis der Kompetenzmessung können Schulungen mit Hilfe von Erfolgsfaktoren verbessert werden.

Die Messmethodik beruht auf dem multivariaten, quantitativen Analyseansatz der Strukturgleichungsanalyse (SGA): Auf der Basis von Hypothesen über das Entstehen und Erkennen von Kompetenzen wird ein Strukturmodell erstellt. Die für die Modellanwendung notwendigen Daten werden im Rahmen von Trainings in der Prozesslernfabrik CiP erhoben, um daraus mit Hilfe von Indikatoren und Messinstrumenten einen Datensatz zu generieren. Das Messverfahren ergibt sich im explorativen Einsatz der SGA, wobei für das finale Messverfahren nur Indikatoren und Messinstrumente zugelassen werden, welche signifikante Ergebnisse liefern. Die Elimination von Messinstrumenten ohne signifikante Aussagen reduziert den notwendigen Aufwand zur Kompetenzmessung mithilfe der erarbeiteten Methode deutlich, so dass auch ein Einsatz in der Industrie in Frage kommt.

Mit Hilfe der so entwickelten Methodik lassen sich Schwachstellen in Schulungen identifizieren, die anschließend gezielt verbessert werden können. Damit leistet die vorliegende Dissertation einen interessanten und - bei richtigem Einsatz - wichtigen Beitrag zur Verbesserung von Weiterbildungsmaßnahmen in Lernfabriken aber auch der industriellen Praxis.



## **Vorwort des Autors**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt.

An dieser Stelle möchte ich Prof. Dr. Ing. Joachim Metternich für die Betreuung meiner Arbeit und die Zeit am Institut danken. Wenn auch die Fülle seiner neuen Ideen in unseren Gesprächen den Raum des Forschungsökonomisch-Machbaren oft zu sprengen drohte, waren seine Anmerkungen doch immer konstruktiv und wohl überlegt. Auch danke ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen während meiner Zeit am Institut, welche sich durch fordernde Vielfalt, Freiraum und Verantwortung auszeichnete. Prof. Dr. Ing. Gunther Reinhart danke ich für die Übernahme des Korreferats und das kritische und zugleich konstruktive Interesse an meiner Arbeit, auf das seine Knie ewig halten.

Den Kollegen aus den Reihen der wissenschaftlichen Mitarbeitenden möchte ich ebenfalls für die gemeinsamen Taten danken. So erinnere ich mich gerne an den fairen Wettkampf um die langlebigste Blume, die spannenden Fachvorträge auf dem Shopfloor der Zoologie und das ein oder andere abendliche und teils sportliche Soiree. Aus meinem Forschungsfeld möchte ich Thomas Riemann und Astrid Weyand für den inhaltlichen Austausch danken. Ein besonderer Dank geht dabei an Dr. Judith Enke und Antonio Kress für das intensive Feedback zu meiner Arbeit. Explizit sei weiterhin den Herren Dr. Busse, Dr. Schaede, Dr. Meister und Dr. Kaiser gedankt. So konnten mit ihnen vom Odenwald bis in den südöstlichen Teil Europas denkwürdige Erinnerungen geschaffen werden.

Besonders möchte ich meiner Familie danken, die mich in meinem Tun bestärkt hat und mir auch in schwierigen Situationen Rückhalt gab. Allen voran meiner Frau Ivanna für ihre Unterstützung, ihre Liebe und unseren Sohn Nikolaj. Ebenso danke ich meinen Eltern für den Zuspruch und ihren Einsatz. Ohne euch wäre ich heute nicht da, wo ich jetzt stehe. Ihr habt mir Glück, Liebe und eine Familie geschenkt.





---

## Inhaltsverzeichnis

---

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2	Aufbau der Arbeit	3
2	Stand der Forschung	5
2.1	Der Kompetenzbegriff	5
2.1.1	Begriffsdefinitionen	5
2.1.2	Kompetenzdefinition und -modelle	12
2.1.3	Kompetenzbeschreibungen nach Erpenbeck und Rosenstiel	15
2.1.4	Fachlich-methodische Kompetenzen am Beispiel der Wertstromanalyse 4.0	16
2.2	Kompetenzentwicklung für die Produktion	18
2.2.1	Entwicklung produktionsrelevanter Kompetenzen	18
2.2.2	Lernfabriken und Kompetenzerwerb	19
2.2.3	Kompetenzorientierte Schulungsgestaltung	21
2.3	Kompetenzmessverfahren	24
2.3.1	Kompetenzmessverfahren in der Produktion	26
2.3.2	Schulungsüberarbeitung auf Basis von Kompetenzmessungen	33
2.3.3	Strukturgleichungsanalysen und der Einsatz zur Entwicklung eines Messverfahrens	34
3	Zielsetzung und Forschungskonzeption	37
3.1	Forschungsziele	37
3.2	Anforderungen an die Methodik	38
3.3	Forschungskonzeption	40
4	Entwicklung der Methodik	43
4.1	Spezifizierung des Verfahrens	43
4.1.1	Hypothesen und Modellbildung	43
4.1.2	Auswahl und Operationalisierung der Indikatoren	47

4.2 Datenaufnahme .....	57
4.2.1 Kompetenzorientierte Schulung zur Wertstromanalyse 4.0 .....	57
4.2.2 Durchführung der Untersuchungen.....	60
4.2.3 Stichproben-, Datensatzbeschreibung und notwendige Anpassungen .....	62
4.3 Ableiten von Gestaltungsregeln – Definition der Messmethodik .....	65
4.3.1 Güteprüfung .....	65
4.3.2 Modellschätzung mit AMOS .....	72
4.3.3 Evaluation des Gesamtmodells und Ergebnisinterpretation .....	79
4.3.4 Explorativer Einsatz der SGA – Ableitung von Gestaltungsregeln --	81
4.3.5 Untersuchung des finalen Modells und Ergebnisinterpretation ----	85
4.3.6 Finalisierung der Methodik .....	87
4.4 Schulungsüberarbeitung durch Ergebnisse der Kompetenzmessung .....	90
4.4.1 Teilnehmende .....	91
4.4.2 Lernumgebung .....	93
4.4.3 Trainer .....	94
4.4.4 Trainingsgestaltung .....	95
4.5 Leitfaden zur Kompetenzmessung und anschließenden Schulungsüberarbeitung.....	103
5 Evaluierung der Methodik.....	109
5.1 Fallstudien - Messung in der Produktion .....	110
5.2 Vergleich mit bestehender Methodik .....	116
5.2.1 Vergleichsvorgehen.....	116
5.2.2 Datenaufnahme.....	117
5.3 Ergebnisse der Schulungsüberarbeitung.....	120
5.4 Ergebnisse der Evaluierung.....	123
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	125
7 Literaturverzeichnis .....	129

---

Anhang .....	153
A.1 Fragen der teilstrukturierten Interviews zur Ermittlung geeigneter Parameter zur Handlungsbewertung .....	153
A.2 Wissenstest .....	154
A.3 Lösungsblatt .....	158
A.4 Selbsteinschätzungsbogen nach der Schulung .....	159
A.5 Motivationsbogen .....	160
A.6 Parameter zur Bewertung von Handlungen .....	161
A.7 Beobachtungsbogen .....	162
A.8 Kompetenzmatrix der Studie .....	165
A.9 SPSS und SPSS AMOS Outputs .....	168
A.10 Leitfragen zur Schulungsüberarbeitung .....	172
A.11 Fragen der teilstrukturierten Interviews zur Erfüllung der formalen und qualitativen Anforderungen an die Messmethodik .....	177
A.12 Lebenslauf des Autors .....	183



---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1 Aufbau der Arbeit .....	3
Abbildung 2 Wissensarten (in Anlehnung an [PITT13] und [RENK08]) .....	6
Abbildung 3 Stufenmodell von North [NORT16].....	9
Abbildung 4 Tiefen- und Oberflächenstruktur – Zusammenhang zwischen Handeln und Lernen nach [JUNG10] .....	10
Abbildung 5 Behavioristisches, generisches und holistisches Kompetenzverständnis (in Anlehnung an [ERPE17] und [ABEL17]) .....	14
Abbildung 6 Die sechs Schritte der Wertstromanalyse 4.0 nach [MEUD17].....	18
Abbildung 7 Formen des Lernens basierend auf [ADOL14] und [ABEL17] .....	19
Abbildung 8 Lernfabriken im engeren und weiteren Sinn und Voraussetzungen zum erfolgreichen Kompetenzerwerb basierend auf [TISC17b], [ABEL15a].....	20
Abbildung 9 Vorgehen zur kompetenzorientierten Schulungsgestaltung nach [TISC18] .....	22
Abbildung 10 Ausschnitt einer Kompetenzmatrix mit verallgemeinerten Wissensarten .....	22
Abbildung 11 Vorgehen bei der Ausgestaltung der Aktivitäten einer Sequenz (in Anlehnung an [TISC18]) .....	23
Abbildung 12 Beispielhafte Darstellung eines Strukturgleichungsmodells .....	35
Abbildung 13 Beschreibung des Vorgehens .....	40
Abbildung 14 Zusammenhang von attitude, knowledge, skills und competence [CHRY13].....	44
Abbildung 15 Performanz als kompetentes Handeln (in Anlehnung an [STRA09] und [ERPE17b]) .....	45
Abbildung 16 System der Kausalhypothesen.....	46
Abbildung 17 Nach Recherche und Experteninterviews ausgewählte Parameter zur Bewertung von Handlungen (in Anlehnung an [BEER19]).....	51
Abbildung 18 Strukturgleichungsmodell aller latenten und manifesten Variablen .....	56
Abbildung 19 Aufteilung der Prozesslernfabrik CiP für die Studie in zwei voneinander getrennte simulierte Unternehmen.....	60
Abbildung 20 Ablauf einzelner Workshops für die Datenaufnahme der Studie.	61
Abbildung 21 Studierende bei der Durchführung der WSA4.0 in der Prozesslernfabrik CiP .....	62
Abbildung 22 Angaben der TN zur Beschreibung der Stichprobe.....	63

Abbildung 23 Scree-Plot der EFA für das Set Handlung .....	67
Abbildung 24 Boxplots über alle genutzten Variablen .....	72
Abbildung 25 Pfaddiagramm des vollständigen Kausalmodells (Mess- und Strukturmodell) .....	74
Abbildung 26 Vollständiges Pfaddiagramm mit standardisierter Lösung .....	78
Abbildung 27 Vollständiges Pfaddiagramm des finalen Modells mit standardisierter Lösung .....	84
Abbildung 28 Übersicht der erarbeiteten Erfolgsfaktoren und ihrer Cluster .....	91
Abbildung 29 Ergebnis der Expertenbefragung zu Erfolgsfaktoren für den Lernerfolg in Lernfabriken .....	102
Abbildung 30 Ablauf der Kompetenzmessung .....	103
Abbildung 31 Vorgehen zur Schulungsüberarbeitung durch Ergebnisse der Kompetenzmessung .....	105
Abbildung 32 Evaluierung der Methodik .....	109
Abbildung 33 Erarbeiteter Wertstrom in Unternehmen A .....	111
Abbildung 34 Ergebnisse der Befragung zur Erfüllung der gestellten Anforderungen auf einer Skala von -2 (nicht erfüllt) bis 2 (absolut erfüllt) ....	113
Abbildung 35 Studierende bei der Bearbeitung der Handlungsaufgabe (links) und beispielhafte Ergebnisse der systematischen Problemlösung auf einem Whiteboard (rechts) .....	118
Abbildung 36 Vorgehen zur systematischen Problemlösung .....	118
Abbildung 37 Vergleich zwischen den Verfahren - Mittelwerte der Beobachtung der Handlungen (H1 bis H9) .....	119
Abbildung 38 Pfaddiagramm der KFA und standardisierten Parameterschätzungen .....	171

---

**Tabellenverzeichnis**


---

Tabelle 1 Kategorisierung von Kompetenzmessverfahren -----	27
Tabelle 2 Ergebnis der Literaturrecherche bestehender Kompetenzmessverfahren für fachlich-methodische Kompetenzen zum Einsatz in der Produktion -----	28
Tabelle 3 Quantitative Auswertung der Recherche, jeweils bezogen auf alle 17 untersuchten Verfahren -----	30
Tabelle 4 Auszug der für die Studie genutzten Kompetenzmatrix -----	58
Tabelle 5 SPSS-Output der erklärenden Gesamtvarianz der EFA für das Set Handlung -----	67
Tabelle 6 Reliabilitätsberechnung der KFA mit standardisierten Faktorladungen in Anlehnung an [WEIB14] -----	70
Tabelle 7 Latente Variable und Messvariablen im Kausalmodell-----	75
Tabelle 8 Parameterschätzung, Standardabweichung, Signifikanzwert (p-Wert), standardisierte Parameter und C.R. des vollständigen Modells-----	79
Tabelle 9 Parameterschätzung, Standardabweichung, Signifikanzwert (p-Wert) und standardisierte Parameter des finalen Modells -----	85
Tabelle 10 Standardisierte totale Effekte des finalen Modells -----	87
Tabelle 11 Lernprinzipien nach Ischebeck [ISCH14] -----	95
Tabelle 12 Ergebnisse der Literaturrecherche im Bereich Erfolgsfaktoren -----	100
Tabelle 13 Auszug der in Unternehmen C genutzten Kompetenzmatrix zur Schulerstellung und Kompetenzmessung [HART20]-----	112
Tabelle 14 Ausgewählte Verbesserungsideen und Anzahl gefundener Ideen aus vier Gesprächen-----	122
Tabelle 15 Übersicht recherchierter Parameter zur Bewertung von Handlungen inkl. ihrer zu Grunde gelegten Literaturquellen-----	161
Tabelle 16 Tests auf Normalverteilung mittels Kolmogorov-Smirnov Test-----	168
Tabelle 17 Deskriptive Statistiken der einzelnen Messvariablen -----	169
Tabelle 18 Korrelationsmatrix der angepassten finalen Version der Strukturgleichungsanalyse-----	170
Tabelle 19 Output der Faktorwerte des finalen Modells aus AMOS-----	171
Tabelle 20 Verhaltensanker der Vergleichsübung zum Thema systematische Problemlösung -----	180
Tabelle 21 Bewertungstabelle des Verfahrens nach Hambach [HAMB16] -----	182





## Abkürzungen und Formelzeichen

Kurzzeichen	Begriff
ASCOT	Technology-based Assessment of Skills and Competences in Vocational Education and Training
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CFI	Comparative Fit Index
GiP	Center für industrielle Produktivität
CIRP	College International pour la Recherche en Productique
CMT	Competence Management Tool
C.R.	Critical Ratio
DBIS	Datenbank-Infosystem
DEV	durchschnittliche extrahierte Varianz
EFA	explorative Faktorenanalyse
FIML	Full Information Maximum Likelihood
FIZ	Fachinformationszentrum
IALF	International Association of Learning Factories
Idefix	Innovative Lernmodule und -fabriken
IFI	Inkremental Fit Index
IRT	Item Response Theorie
KFA	konfirmatorische Faktoranalyse
KMO	Kaiser, Meyer und Olkin Prüfgröße
ML	Maximum Likelihood
PM	Produktionsmechaniker
ProMech	Messung fachlicher Kompetenzen von Fachkräften im Bereich der Mechatronik und der Elektrotechnik
p-Wert	Signifikanzwert
PTW	Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen
Rel	Reliabilität
RMSEA	Root Mean Square of Error Approximation
SMC	Squared Multiple Correlations
Smk	sozial und methodischen Kompetenzen
SGA	Strukturgleichungsanalyse
SGM	Strukturgleichungsmodell / -ierung
SRMR	Standardized Root Mean Square Residual
TK	Teilkompetenz
TN	Teilnehmende
WSA / WSA4.0	Wertstromanalyse / Wertstromanalyse 4.0

Formelzeichen	
Kurzzeichen	Größe
$\alpha$ (Alpha)	Cronbachs Alpha bzw. Reliabilität
$\beta$ (Beta)	Pfadkoeffizient zwischen zwei endogenen Variablen
B (Beta)	Matrix der Pfadkoeffizienten endogener Variablen
$\gamma$ (Gamma)	Pfadkoeffizient zwischen exogener und endogenen Variablen
$\Gamma$ (Gamma)	Matrix der Pfadkoeffizienten
$\delta$ (Delta)	Residualvariable zu einer Messvariablen x
$\varepsilon$ (Epsilon)	Residualvariable zu einer Messvariablen y
$\zeta$ (Zeta)	Residualvariable zu einer endogenen Variablen
$\eta$ (Eta)	latente endogene Variable
$\lambda$ (Lambda)	Faktorladung
$\Lambda_x$ (Lambda-x)	Matrix der Pfade zwischen x und $\xi$ -Variablen (Faktorladungen)
$\Lambda_y$ (Lambda-y)	Matrix der Pfade zwischen y und $\eta$ -Variablen (Faktorladungen)
$\xi$ (Ksi)	latente exogene Variable
$\pi$ (Pi)	geschätzter unstandardisierter Parameterwert
$\sigma_i^2$ (Sigma)	Varianz des Indikators i
$\sigma_x^2$ (Sigma)	Varianz des Konstrukts x
$\Sigma$ (Sigma)	modelltheoretische Korrelationsmatrix
$\Phi$ (Phi)	Korrelationsmatrix der manifesten Messvariablen der latent endogenen Variablen (y)
C	Korrelationsmatrix der manifesten Messvariablen der latent exogenen Variablen (x)
D	Korrelationsmatrix der manifesten Messvariablen der latent exogenen und endogenen Variablen
$DEV(\xi_i)$	durchschnittliche extrahierte Varianz des Faktors i
$e_i$	Fehlerterme
F	Wert der Maximum Likelihood-Schätzung
G	Korrelationsmatrix der manifesten Messvariablen der latent exogenen und endogenen Variablen
$H_{ijh}$	Handlung h der Teilkompetenz j der Hauptkompetenz i
$H_{Norm}$	normierter Wert für Handlung
$K_i$	Hauptkompetenz i
$M_{Norm}$	normierter Wert für Motivation
$M_{max}$	maximale Punktzahl des Motivationsfragebogens
m	Anzahl betrachteter Kompetenzen der Überkompetenz
$m_i$	Teilnehmerangabe i auf Motivationsfragebogen
n	Anzahl der Teilkompetenzen pro Kompetenz
l	Anzahl der Handlungen pro Teilkompetenz
P	Anzahl manifester Variablen

ÜK	übergeordnete Kompetenz
q	Anzahl der zu schätzenden Parameter
$R^2$	Bestimmungsmaß
$\text{Rel}(x_i)$	Indikatorreliabilität des Indikators i
$\text{Rel}(\xi_i)$	Faktorreliabilität des Faktors i
S	empirische Kovarianzmatrix der manifesten Messvariablen
$S.E_j$	Standardfehler der Schätzung des Parameters j
T	standardisierter totaler Effekt
$TK_{ij}$	Teilkompetenz j der Hauptkompetenz i
$W_{ijk}$	Wissenselement k der Teilkompetenz j der Hauptkompetenz i
$W_{\text{Norm}}$	normierter Wert für Wissen
$w_i$	erreichte Punkte der Wissensfrage i
$w_{\text{imax}}$	maximale Punktzahl der Wissensfrage i
$X_O$	Messwert
$X_T$	wahrer Wert
$X_S$	systematischer Messfehler
$X_R$	zufälliger Messfehler
x	manifeste Messvariable für eine latente exogene Variable
y	manifeste Messvariable für eine latente endogene Variable
z	Anzahl der im Wissenstest genutzten Wissensfragen