Jacqueline Schmitt

Methodik zur prozessintegrierten Prüfung
der Produktqualität durch Einsatz prädiktiver
Data Mining Verfahren

Industrial Engineering | Band 33 (2021)

Methodik zur prozessintegrierten Prüfung der Produktqualität durch Einsatz prädiktiver Data Mining Verfahren

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau

der Technischen Universität Dortmund

genehmigte Dissertation

Jacqueline Schmitt, M. Sc.

aus

Witten

Dortmund, 2021

Prüfungskommission

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse
Mitberichter: Dr.-Ing. Ralph Richter
Prüfungsvorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Menzel
Mitprüfer: Univ.-Prof. Dr. Claus Weihs

Tag der mündlichen Prüfung: 04. Februar 2021

Schriftenreihe Industrial Engineering
hrsg. von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse

Band 33

Jacqueline Schmitt

**Methodik zur prozessintegrierten Prüfung der
Produktqualität durch Einsatz
prädiktiver Data Mining Verfahren**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

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.: Dortmund, Technische 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 978-3-8440-7961-6

ISSN 1867-1322

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 • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Produktionssysteme der Technischen Universität Dortmund.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse, dem Leiter des Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wertvolle Unterstützung und Förderung, die zum erfolgreichen Gelingen der Arbeit maßgeblich beigetragen haben.

Bei Herrn Dr.-Ing. Ralph Richter möchte ich mich für die Übernahme des Korreferats und die intensive Auseinandersetzung mit meiner Arbeit ganz herzlich bedanken.

Darüber hinaus gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr. Claus Weihs vom Lehrstuhl für Computergestützte Statistik der Technischen Universität Dortmund, Herrn o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Hubert Biedermann, Leiter Wirtschafts- und Betriebswissenschaften (wbw) der Montanuniversität Leoben und Prof. Matthias Thüner, PhD, Professor an der Jinan University Zhuhai, China, für ihre wertvollen Anmerkungen und den fachlichen Austausch zu meiner Arbeit. Ebenso möchte ich mich bei Frau Prof. Dr. Katharina Morik, Leiterin des Lehrstuhls für Künstliche Intelligenz der Technischen Universität Dortmund, herzlich für Ihre persönliche Unterstützung und Ratschläge bedanken.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen ehemaligen und aktuellen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Produktionssysteme und bei allen Projektpartnern, die mich bei der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben. Insbesondere bei Jürgen Mazarov und Lukas Schulte möchte ich mich für die zahlreichen fachlichen Diskussionen, das konstruktive Feedback und die mir entgegengebrachte persönliche Unterstützung bedanken.

Mein besonderer Dank gilt ebenso Philipp Krenkel und Sven Krzoska für ihre wertvollen Anmerkungen zu der fertiggestellten Arbeit.

Der größte Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden. Meinen Eltern gilt besonderer Dank für ihre uneingeschränkte Unterstützung, ihr Verständnis und ihr Vertrauen. Meinem Partner danke ich von Herzen für seine Rücksichtnahme, seine Geduld und den Verzicht auf viele gemeinsame Wochenend- und Abendstunden. Schließlich danke ich meinem Familien- und Freundeskreis, der mir stets Verständnis entgegengebracht und die rare Freizeit mit schönen und ausgleichenden Momenten gefüllt hat.

Bochum, im Februar 2021

Jacqueline Schmitt

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	vi
Abkürzungsverzeichnis	ix
Formelverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1. Motivation und Problemstellung	1
1.2. Zielsetzung und Vorgehensweise	3
2 Theoretischer Bezugsrahmen	6
2.1. Verständnis des Qualitätsbegriffs.....	6
2.2. Qualitätssicherung in der industriellen Produktion	7
2.2.1. Planung der Qualitätsprüfung	10
2.2.2. Prozessfähigkeitsuntersuchungen.....	17
2.3. Fähigkeitsnachweis von Mess- und Prüfverfahren.....	18
2.3.1. Normative Anforderungen.....	18
2.3.2. Forderungen an Mess- und Prüfverfahren.....	22
2.3.3. Analyse und Fähigkeitsnachweis von Mess- und Prüfverfahren.....	24
3 Wissensentdeckung in Daten und Data Mining	27
3.1. Begriffsdefinition und -abgrenzung.....	27
3.1.1. Daten, Information und Wissen	27
3.1.2. Wissensentdeckung in Daten und Data Mining	28
3.2. Vorgehensmodelle zur Wissensentdeckung in Daten	29
3.3. Aufgaben und Verfahren des Data Mining	34
3.4. Anwendungen von Data Mining in der Produktion	40
3.4.1. Anwendungsszenarien für Data Mining in der Produktion	41
3.4.2. Data Mining zur Qualitätsanalyse und -verbesserung	43
3.4.3. Qualitätsprognose, Softsensorik und virtuelle Metrologie	45
3.4.4. Relevante Publikationen und Anwendungsfälle.....	47
4 Forschungsbedarf und -ziele	53

5	Methodik zur Planung und Gestaltung modellbasierter Prüfprozesse	55
5.1.	Anforderungsdefinition	55
5.1.1.	Anforderungen an die Gesamtmethodik	55
5.1.2.	Anforderungen an die Daten und Datenbereitstellung	56
5.1.3.	Anforderungen an die Modellierung	57
5.1.4.	Anforderungen an den Fähigkeitsnachweis	58
5.1.5.	Anforderungen an die Prüfstrategie	58
5.2.	Gesamtaufbau der Methodik	58
5.3.	Abgrenzung des Betrachtungsrahmens	61
6	Datenselektion und -verarbeitung	63
6.1.	Horizontale Datenselektion	63
6.1.1.	Operationale Definition der Qualitätsmerkmale	63
6.1.2.	Beschreibung der Qualitätsregelkreise	66
6.1.3.	Bewertung der Datenverfügbarkeit und -abdeckung	68
6.2.	Vertikale Datenselektion	72
6.2.1.	Definition der Grundgesamtheit	72
6.2.2.	Auswahl einer geeigneten Trainingsstichprobe	73
6.2.3.	Bewertung der Stichprobengröße	76
6.3.	Datenaufbereitung	77
6.3.1.	Deskriptive und explorative Analyse der Daten	78
6.3.2.	Bewertung der Datenqualität	80
6.3.3.	Datenbereinigung	81
7	Modellbildung	83
7.1.	Formulierung der Lernaufgaben	83
7.2.	Aufbau des Modellierungsprozesses	84
7.3.	Trainieren und Validierung von Modellen	86
7.3.1.	Merkmalsselektion	86
7.3.2.	Auswahl von Lernalgorithmen	87
7.3.3.	Optimierung der Hyperparameter	89
7.3.4.	Validierung überwachter Lernverfahren	89

7.4. Bewertung und Auswahl von Modellen	92
7.4.1. Umgang mit unbalancierten Klassen bei Klassifikationsaufgaben	92
7.4.2. Bewertung der Güte überwachter Lernverfahren	95
7.4.3. Testen von Modellen	98
7.4.4. Modellvergleich und -selektion	99
8 Umsetzung und Integration	102
8.1. Fähigkeitsnachweis des modellbasierten Prüfverfahrens	102
8.1.1. Fähigkeitsnachweis von Regressionsmodellen	104
8.1.2. Fähigkeitsnachweis von Klassifikationsmodellen	110
8.1.3. Nachweis der Prognosebeständigkeit	111
8.2. Entwicklung von Prüfstrategien	115
8.2.1. Modellgestützte Prüfstrategien	117
8.2.2. Zeitsynchrone hybride Prüfstrategien	119
8.2.3. Zeitversetzte hybride Prüfstrategien	122
8.2.4. Prüfstrategien unter Einbezug der Prüfdaten	127
8.2.5. Bewertung und Auswahlhilfe	128
9 Validierung anhand industrieller Fallstudien	131
9.1. Design der Validierung	131
9.2. Validierung am Beispiel der Bestückung von SMT-Leiterplatten	133
9.2.1. Betrachtungsrahmen	133
9.2.2. Datenselektion und -verarbeitung	134
9.2.3. Modellbildung	142
9.2.4. Umsetzungs- und Integrationskonzept	146
9.2.5. Zusammenfassung und Ausblick der Fallstudie	148
9.3. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	149
10 Zusammenfassung und Ausblick	152
11 Literaturverzeichnis	155
Anhang A: Ergänzungen zur Messunsicherheit nach VDA Band 5	195
Anhang B: Verfahren der Messsystemanalyse	197
Anhang C: Ausgewählte Klassifikationsverfahren	200
Anhang D: Regressionsverfahren	207
Anhang E: Ergebnisse der Validierung	211

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Ausgewählte Megatrends mit Wirkung auf die industrielle Produktion	2
Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit	4
Abbildung 2.1: Methoden der Fertigungsmesstechnik	9
Abbildung 2.2: Kriterien zur Bestimmung der Prüfnotwendigkeit der Einheit	14
Abbildung 2.3: Arbeitsschritte zur Auswahl von Prüfmerkmalen	15
Abbildung 2.4: Allgemeine Vorgehensweise zur Bestimmung der erweiterten Messunsicherheiten	20
Abbildung 2.5: Ablauf und Verfahren zum Fähigkeitsnachweis von Messprozessen	25
Abbildung 3.1: Begriffshierarchie und Differenzierungsmerkmale von Daten, Information und Wissen	27
Abbildung 3.2: Entwicklung von Vorgehensmodellen zur Wissensentdeckung in Daten und Anwendung von Data Mining	30
Abbildung 3.3: CRISP-DM Modell	31
Abbildung 3.4: SEMMA Modell von SAS	32
Abbildung 3.5: KDD-Modell nach Fayyad	33
Abbildung 3.6: Top 10 Data Mining Verfahren in 2017	39
Abbildung 3.7: Treiber des Data Mining	40
Abbildung 3.8: Anzahl der Publikationen pro Jahr zu den Suchbegriffen der Datenbankrecherche bei ScienceDirect	41
Abbildung 3.9: Anwendungsszenarien für Data Mining in der Produktion	42
Abbildung 3.10: Anzahl der Publikationen pro Jahr zu den Suchbegriffen der Datenbankrecherche bei ScienceDirect	47
Abbildung 5.1: Methodik zur Prüfung der Produktqualität durch prädiktive Data Mining Modelle	59
Abbildung 6.1: Operationale Definition der Qualitätsmerkmale	64
Abbildung 6.2: Abhängigkeit der Übereinstimmungs- und Unsicherheitsbereiche von der Größe der Messunsicherheit	66
Abbildung 6.3: Vereinfachte Visualisierung der Prozessbeschreibung	67
Abbildung 6.4: Qualitätsregelkreise im Produktionsprozess	67
Abbildung 6.5: Ishikawa-Diagramm zur Dokumentation qualitätsrelevanter Einflussgrößen	69
Abbildung 6.6: Schematische Darstellung hoher, mittlerer und geringer Datenabdeckung	70
Abbildung 6.7: Definition der Grundgesamtheiten anhand der spezifizierten Lernaufgaben	72
Abbildung 6.8: Lagemaße für verschiedene Skalenniveaus der Merkmale	78
Abbildung 6.9: Streuungsmaße	79

Abbildung 7.1: Ableitung der Lernaufgaben auf Basis des Skalenniveaus der Qualitätsmerkmale	84
Abbildung 7.2: Aufbau des Modellierungsprozesses	85
Abbildung 7.3: Vorgehensweisen zur datenbasierten Merkmalsauswahl	86
Abbildung 7.4: Bias-Varianz Trade-Off	90
Abbildung 7.5: Teilen der Originaldatenmenge in Trainings-, Validierungs- und Test-Menge	98
Abbildung 7.6: ROC-Kurven zur Gegenüberstellung verschiedener Modelle	99
Abbildung 8.1: Angepasster Fähigkeitsnachweis für prädiktive Data Mining Modelle....	103
Abbildung 8.2: Residuendiagramm Residuum über Prognosewert.....	106
Abbildung 8.3: Grafische Residuenanalyse	107
Abbildung 8.4: Autokorrelationsbereiche der Durbin-Watson-Testgröße	110
Abbildung 8.5: Arten von Concept Drift.....	112
Abbildung 8.6: Übersicht der Prüfstrategien unter Einsatz prädiktiver Data Mining Modelle	116
Abbildung 8.7: Modellgestützte Prüfstrategien.....	117
Abbildung 8.8: Zeitsynchrone hybride Prüfstrategien	119
Abbildung 8.9: Zeitsynchrone Ergänzungsprüfung	122
Abbildung 8.10: Zeitversetzte hybride Prüfstrategien	123
Abbildung 8.11: Ablauf der vorgelagerten ergebnisbasierten Stichprobenprüfung	123
Abbildung 8.12: Kombinationsmöglichkeiten von Optimierungskriterien, Auswertungs- und Stichprobenstrategien bei vorgelagerter ensemble-basierter Stichprobenprüfung.....	126
Abbildung 8.13: Mehrschrittiger Prüfprozess mit zeitdiskreten Prüfpunkten	127
Abbildung 9.1: Typische Fertigungslinie der SMT-Bestückung.....	134
Abbildung 9.2: Aggregationsebenen der betrachteten Produktvariante	134
Abbildung 9.3: Qualitätsregelkreise im SMT-Bestückungsprozess.....	135
Abbildung 9.4: Einflussfaktoren der Lötstellenqualität im SMT-Prozess	136
Abbildung 9.5: Verteilungen der Prozessgrößen	139
Abbildung 9.6: Zeitlicher Werteverlauf der Prozessgröße.....	140
Abbildung 9.7: Korrelationsmatrix und Verteilungen der ausgewählten Prozessgrößen.	141
Abbildung 9.8: ROC-Kurven der Modelle in der ersten Modellbildungsiteration	144
Abbildung 9.9: Aufbau des finalen Modellbildungsprozesses	144
Abbildung 9.10: ROC-Kurve des finalen GBT-Modells auf der Testdatenmenge	145
Abbildung C.1: Schematische Darstellung der Funktionsweise der SVM	206
Abbildung E.1: ROC-Kurve des finalen GBT-Modells auf der Validierungsdatenmenge .	213

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Übersicht der Klassifizierungskriterien für Prüfungen	12
Tabelle 2.2:	Einflussparameter und Gegenüberstellung der Ermittlungsverfahren nach MSA 4 und VDA Band 5.....	21
Tabelle 3.1:	Einsatz von Vorgehensmodellen zur Durchführung von Data Mining Projekten.....	29
Tabelle 3.2:	Vergleich zwischen KDD, CRISP-DM und SEMMA	33
Tabelle 3.3:	Übersicht ausgewählter Data Mining Aufgabentypen, Verfahren und Algorithmen.....	36
Tabelle 3.4:	Beschreibung der Top 10 Klassifikatoren	37
Tabelle 3.5:	Arten der Regression	38
Tabelle 3.6:	Weiterführende Literatur zu exemplarischen Beispielen der verschiedenen Anwendungsszenarien	43
Tabelle 3.7:	Online-Datenbankrecherche zum Einsatz der Qualitätsprognose in der Produktion.....	48
Tabelle 3.8:	Bewertung ausgewählter Publikationen im Hinblick auf die ganzheitliche Herangehensweise	51
Tabelle 6.1:	Exemplarische Darstellung der Rohdatenmatrix.....	76
Tabelle 7.1:	Datentabelle als Input für die Bildung prädiktiver Modelle	85
Tabelle 7.2:	Bewertung verschiedener Lernalgorithmen anhand definierter Kriterien ..	88
Tabelle 7.3:	Gütekriterien zur Bewertung von Regressionsmodellen	95
Tabelle 7.4:	Konfusionsmatrix bei binärer Klassifikation.....	96
Tabelle 7.5:	Gütekriterien zur Bewertung von Klassifikationsmodellen	96
Tabelle 8.1:	Betrachtungsrahmen der modellbasierten Prüfung.....	115
Tabelle 8.2:	Relevante Ordnungskriterien für die Entwicklung und Auswahl von Prüfstrategien unter Einsatz prädiktiver Data Mining Modelle.....	116
Tabelle 8.3:	Auswertung der Prognose- und Prüfergebnisse bei zeitsynchroner hybrider Prüfung zur Schlupfreduktion.....	120
Tabelle 8.4:	Auswertung der Prognose- und Prüfergebnisse bei zeitsynchroner hybrider Prüfung zur Pseudofehlerreduktion.....	121
Tabelle 8.5:	Auswertungsstrategie der Einzelergebnisse	125
Tabelle 8.6:	Bewertung der Prüfstrategien anhand definierter Kriterien	130
Tabelle 9.1:	Randbedingungen der industriellen Fallstudien	132
Tabelle 9.2:	Operationale Definition der Lötstellenqualität	136
Tabelle 9.3:	Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse für die Erschließung der qualitätsrelevanten Datenquellen im SMT-Prozess	137
Tabelle 9.4:	Extrahierter Datenauszug zur Vorbereitung der Trainingsdatenmenge ..	138
Tabelle 9.5:	Prozessdaten zur Beschreibung der Lage und Dimension der Lotpaste	138

Tabelle 9.6:	Ausgewählter Datenauszug für die Modellbildung	141
Tabelle 9.7:	Stratifizierte Teilung in Trainings- und Testdatenmenge	142
Tabelle 9.8:	Ausgewählte Lernverfahren und Wertebereiche der Hyperparameter	143
Tabelle 9.9:	Klassifikationsgüte der trainierten Modelle in der ersten Modellbildungsiteration	143
Tabelle 9.10:	Konfusionsmatrix des finalen GBT-Modells auf der Testdatenmenge	145
Tabelle 9.11:	Ergebnisse des GBT-Modells auf der Testdatenmenge bei unterschiedlichen Konfidenzschwellwerten	148
Tabelle A.1:	Typische Unsicherheiten eines Messsystems	195
Tabelle A.2:	Bestimmung der Erweiterten Messunsicherheit des Messsystems, des Messprozesses und dessen Eignung	196
Tabelle E.1:	Konfusionsmatrix des Decision Tree in der ersten Modellbildungsiteration	211
Tabelle E.2:	Konfusionsmatrix der SVM in der ersten Modellbildungsiteration	211
Tabelle E.3:	Konfusionsmatrix der Gradient Boosted Trees Tree in der ersten Modellbildungsiteration	211
Tabelle E.4:	Konfusionsmatrix des Naive Bayes in der ersten Modellbildungsiteration	212
Tabelle E.5:	Konfusionsmatrix des k-Nearest Neighbor in der ersten Modellbildungsiteration	212
Tabelle E.6:	Konfusionsmatrix des finalen GBT-Modells auf der Validierungsdatenmenge	213
Tabelle E.7:	Konfusionsmatrix des GBT-Modells auf der Testdatenmenge mit KO_{IO} = 0,7	214
Tabelle E.8:	Konfusionsmatrix des GBT-Modells auf der Testdatenmenge mit KO_{IO} = 0,8	214
Tabelle E.9:	Konfusionsmatrix des GBT-Modells auf der Testdatenmenge mit KO_{IO} = 0,85	214
Tabelle E.10:	Konfusionsmatrix des GBT-Modells auf der Testdatenmenge mit KO_{IO} = 0,86	214

Abkürzungsverzeichnis

AHC	Agglomeratives Hierarchisches Clustering
AIAG	Automotive Industry Action Group
ANOVA	Varianzanalyse (engl. analysis of variance)
AOI	Automatisch optische Inspektion
APC	Advanced Process Control
AQL	Acceptable Quality Level
ARM	Mittelwert-Spannweiten-Methode (engl. average and range method)
AXI	Automatische Röntgeninspektion (engl. automatic X-ray inspection)
CAM	Rechnerunterstützte Fertigung (engl. computer aided manufacturing)
CAQ	Rechnerunterstützte Qualitätssicherung (engl. computer aided quality)
CNN	Condensed Nearest Neighbor Rule
CRISP-DM	Cross Industry Standard Process for Data Mining
DIN	Deutsches Institut für Normung
DoE	Statistische Versuchsplanung (engl. design of experiments)
EM	Erwartungsmaximierungsalgorithmus
ENN	Edited Nearest Neighbor Rule
FMT	Fertigungsmesstechnik
FOV	Sichtfeld (engl. field of view)
FPM	First Principle Modell
GE	Geldeinheit
GQR	Großer Qualitätsregelkreis
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
ICT	Funktionsprüfung (engl. in-circuit-test)
iO	in Ordnung
ISO	International Organization of Standardization

IT	Informationstechnik
KDD	Knowledge Discovery in Databases
KDID	Knowledge Discovery in Industrial Databases
KI	Künstliche Intelligenz
k-NN	k-Nearest-Neighbor-Klassifikator
KNN	Künstliche Neuronale Netze
KQR	Kleiner Qualitätsregelkreis
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
MAR	Zufällig fehlende Werte (engl. missing at random)
MCAR	Absolut zufällig fehlende Werte (engl. missing completely at random)
ML	Maschinelles Lernen
MLR	Multiple lineare Regression
MNAR	Nicht-zufällig fehlende Werte (engl. missing not at random)
MPC	Model Predictive Control
MSA	Messsystemanalyse
NB	Naive Bayes
NCL	Neighborhood Cleaning Rule
niO	Nicht in Ordnung
OEG	Obere Eingriffsgrenze
OGW	Oberer Grenzwert
OSG	Obere Spezifikationsgrenze
OSS	One-Side Selection
PCA	Hauptkomponentenanalyse (engl. principal component analysis)
PCB	Leiterplatte (engl. printed circuit board)
PCR	Hauptkomponentenregression (engl. principle component regression)
PPM	Teile pro Million (engl. parts per million)
QM	Qualitätsmanagement

QRK	Qualitätsregelkreis
ROC	Receiver operating characteristic
SEMMA	Sample, Explore, Modify, Model, Assess
SMOTE	Synthetic Minority Oversampling Technique
SMT	Surface mount technology
SOM	Selbstorganisierende Karte (engl. self organizing map)
SPC	Statistische Prozessregelung (engl. statistical process control)
SPI	Lotpasteninspektion (engl. solder paste inspection)
SVM	Stützvektormethode (engl. support vector machine)
TQM	Total Quality Management
TSA	Zeitreihenanalyse (engl. time series analysis)
UEG	Untere Eingriffsgrenze
UGW	Unterer Grenzwert
USG	Untere Spezifikationsgrenze
VDA	Verband der Automobilindustrie
VM	Virtuelle Metrologie
WE	Wareneingang
ZE	Zeiteinheit

Formelverzeichnis

Laufvariablen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
A, B	[-]	Zufallsereignisse
i, j, k, m, n, r	[-]	allgemeine Laufvariablen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
AUC	[-]	Fläche unter der ROC-Kurve (engl. area under the curve)
AV	[-]	Bedienereinfluss (engl. appraiser variation)
α	[-]	Signifikanzniveau
$Bias$	[-]	Systematische Messabweichung
β_i	[-]	Regressionskoeffizienten
β	[-]	Gewichtungsfaktor
$\hat{\beta}_i$	[-]	Schätzwerte der Regressionskoeffizienten
c	[-]	Schwellwert auf der ROC-Kurve
c^*	[-]	Optimaler Schwellwert auf der ROC-Kurve
C	[-]	Skalar, $C \in \mathbb{R}$
C_m, C_{mk}	[-]	Maschinenfähigkeitsindex
C_p, C_{pk}	[-]	Kurzzeitige Prozessfähigkeit
$Cov(\varepsilon_i)$	[-]	Kovarianz der Residuen ε_i
$d(y, x)$	[-]	Distanz zwischen x und y , $x, y \in \mathbb{R}^p$
$d_H(x, y)$	[-]	Hamming-Abstand zwischen x und y , $x, y \in \mathbb{R}^p$
$d_x(x)$	[-]	Mittlere absolute Abweichung
dw	[-]	Durbin-Watson-Testgröße

$E(A)$	[-]	Entropie des Attributs A
e	[-]	Absolute Messabweichung, Messfehler
$\tilde{\varepsilon}_i$	[-]	Standardisierte Residuen
ε	[-]	Fehler / Prognosefehler
ε_i	[-]	Residuen der Regression
$\varepsilon_{(i)}$	[-]	Aufsteigend sortierte Residuen
$\mathbb{E}(\varepsilon_i)$	[-]	Erwartungswert der Residuen ε_i
ESS	[-]	Erklärte Streuung (engl. explained sum of squares)
EV	[-]	Gerätstreuung (engl. equipment variation)
F_m	[-]	F-Maß
FN	[-]	Falsch Negativ
FNR	[-]	Falsch-Negativ-Rate
FP	[-]	Falsch Positiv
FPR	[-]	Falsch-Positiv-Rate
$Gini(A)$	[-]	Gini-Koeffizient des Attributs A
GM	[-]	Geometrisches Mittel
$\%GRR$	[-]	Kennwert für die Wiederhol- und Vergleichspräzision
h	[-]	Hyperebene
H_0	[-]	Nullhypothese
H_1	[-]	Alternativhypothese
$H(X)$	[-]	Entropie der Klassenvariable
IR	[-]	Imbalance Ratio
K_1	[-]	Skalar, $K_1 \in \mathbb{R}$
K_2	[-]	Skalar, $K_2 \in \mathbb{R}$
$K_{PM,j}$	[GE]	Kosten für den Einsatz von Prüfmittel j
$K_{P,j}$	[GE]	Prüfkosten bei Einsatz von Prüfmittel j
$K_{F,ab}$	[GE]	Fehlerkostensatz für ein fälschlich abgelehntes Gutteil

$K_{F,an}$	[GE]	Fehlerkostensatz für ein fälschlich angenommenes Schlechtteil
KO	[-]	Konfidenz
$\lim(\dots)$	[-]	Grenzwert von ...
$\%LIN$	[-]	Kennwert für die Linearität eines Messmittels
$\max_{i=1,\dots,n} \{x_i\}$	[-]	Maximum der Werte $x_i, i = 1, \dots, n$
MAE	[-]	Mittlerer absoluter Fehler (engl. mean absolute error)
MSE	[-]	Mittlerer quadrierter Fehler (engl. mean squared error)
μ	[-]	Erwartungswert
$\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$	[-]	Normalverteilung mit Mittelwert μ und Standardabweichung σ^2
ndc	[-]	Number of distinct categories
NPW	[-]	Negativer Prädiktiver Wert
$O(\dots)$	[ZE]	Laufzeit eines Algorithmus
Θ_i	[-]	Parameter der nicht-linearen Regression
PPW	[-]	Positiver Prädiktiver Wert
p	[-]	Minkowski-Konstante, $p \geq 1$
p	[-]	Relative Häufigkeit
$p(A)$	[-]	A-priori-Wahrscheinlichkeit des Ereignisses A
$p(A B)$	[-]	Wahrscheinlichkeit des Ereignisses A unter der Bedingung, dass B eingetreten ist
$p(x)$	[-]	Auftretenswahrscheinlichkeit
$p_{ab,j}$	[-]	Anzahl fälschlich abgelehnter Gutteile
$p_{an,j}$	[-]	Anzahl fälschlich angenommener Schlechteile
P_p, P_{pk}	[-]	Langfristige Prozessfähigkeit
Q	[-]	Quartilsabstand
R	[-]	Spannweite
R^2	[-]	Bestimmtheitsmaß
RAE	[-]	Relativer Absoluter Fehler (engl. relative absolute error)
RE	[-]	Auflösung (engl. resolution)

$\%RE$	[-]	Auflösung in Relation zu einer Bezugsgröße, z. B. der Toleranz
$RMSE$	[-]	Mittleres Abweichungsquadrat (engl. root-mean-squared error)
RN	[-]	Richtig Negativ
RNR	[-]	Richtig-Negativ-Rate
RP	[-]	Richtig Positiv
RPR	[-]	Richtig-Positiv-Rate
$R\&R$	[-]	Wiederholbarkeit und Vergleichspräzision (engl. repeatability & reproducibility)
$R\&R\%$	[%]	Wiederholbarkeit und Vergleichspräzision in Relation zu einer Bezugsgröße, z. B. der Toleranz
RSE	[-]	Relativer Quadrierter Fehler (engl. relative squared error)
RSS	[-]	Nicht erklärte Streuung (engl. residual sum of squares)
R_x	[-]	Differenz aus dem größten und kleinsten Gesamtmittelwert bei der Berechnung des Bedienerinflusses
s, σ^2	[-]	Standardabweichung
s^2	[-]	Varianz
s_g	[-]	Zufällige Messabweichung des Messgeräts
T	[-]	Toleranz
T_i	[-]	i -te Teilmenge
TSS	[-]	Gesamtstreuung (engl. total sum of squares)
U	[-]	Erweiterte Messunsicherheit
$u(x_i)$	[-]	Standardunsicherheit
u_{AV}	[-]	Unsicherheitskomponente „Vergleichbarkeit der Bediener“
u_{BI}	[-]	Unsicherheitskomponente „Systemische Messabweichung“
u_{CAL} / U_{CAL}	[-]	Unsicherheitskomponente „Kalibrierung Referenzteil“
u_{EV}	[-]	Unsicherheitskomponente „Wiederholbarkeit“
u_{EVR}	[-]	Unsicherheitskomponente „Wiederholbarkeit am Referenzteil“
u_{LIN}	[-]	Unsicherheitskomponente „Linearitätsabweichung“
u_{MS}	[-]	Kombinierte Standardunsicherheit „Messsystem“

u_{MP}	[-]	Kombinierte Standardunsicherheit „Messprozess“
u_{OBJ}	[-]	Unsicherheitskomponente „Inhomogenität Prüfobjekt“
u_{RE}	[-]	Unsicherheitskomponente „Auflösung Anzeige“
u_{REST}	[-]	Unsicherheitskomponente „Rest“
u_{STAB}	[-]	Unsicherheitskomponente „Vergleichbarkeit Zeitpunkte“
u_T	[-]	Unsicherheitskomponente „Temperatur“
W	[-]	Shapiro-Wilk-Teststatistik
X_i	[-]	Regressoren der nicht-linearen Regression
$\bar{x}$	[-]	Mittelwert einer Messreihe
$\tilde{x}$	[-]	Modus einer Messreihe
$\vec{x}$	[-]	Merkmalsvektor
x_i	[-]	Merkmal, Messwert
x_m	[-]	Richtiger Wert des Normals
x_{min}	[-]	Kleinster Wert / Minimum
x_{max}	[-]	Größter Wert / Maximum
x_p	[-]	Prognosewert
$\tilde{x}_p$	[-]	p -Quantil
x_r	[-]	Richtiger Wert
Y, y	[-]	Zielvariable
$\hat{y}$	[-]	Geschätzte Regressionsgerade
$\ x\ $	[-]	Norm von $x \in \mathbb{R}^P$