

INHALTSVERZEICHNIS

1	Messunsicherheitsbegriffe und -Analyse	1
1.1	Grundbegriffe zur Beschreibung der Messunsicherheit	1
1.1.1	Messgenauigkeit, Messrichtigkeit, Messpräzision	1
1.1.1.1	Messgenauigkeit	1
1.1.1.2	Messrichtigkeit	1
1.1.1.3	Messpräzision	2
1.1.1.4	Anwendungsbeispiel	2
1.1.2	Messabweichung	2
1.1.2.1	Systematische Messabweichungen	3
1.1.2.2	Zufällige Messabweichungen	3
1.1.3	Bester Schätzer und Messunsicherheit	3
1.1.3.1	Messunsicherheitsbeiträge	3
1.2	Messunsicherheitsanalyse	4
1.2.1	Struktur	4
1.2.2	Unsicherheitsfortpflanzung	5
2	Dimensionelles Messen mittels Röntgen-Computertomografie	7
2.1	Messprinzip	7
2.2	Funktionsprinzip	7
2.2.1	Erzeugung der Durchstrahlungsbilddaten	8
2.2.1.1	Erzeugung von Röntgenstrahlung	8
2.2.1.2	Abschwächung von Röntgenstrahlung	12
2.2.1.3	Detektion von Röntgenstrahlung	16
2.2.2	Verarbeitung der Durchstrahlungsbilddaten	18
2.2.2.1	Bestimmung der Projektionswerte	19
2.2.2.2	Rekonstruktion der lokalen Abschwächung	19
2.2.2.3	Bestimmung von Grenzflächenpunkten	23
2.2.2.4	Bestimmung geometrischer Eigenschaften	24
2.3	Eigenschaften des Abbildungssystems	24
2.3.1	Vergrößerung	24
2.3.2	Messbereich	25
2.3.3	Orts- und Strukturauflösung	25

2.4	Messunsicherheitsbeiträge	27
2.4.1	Einflussgrößen	27
2.4.2	Artefakte	28
2.4.2.1	Verursacht durch Wechselwirkungsprozesse	28
2.4.2.2	Verursacht durch Unterabtastung	29
3	Einstellen von Parametern bei der Messung mittels Röntgentomografie	31
3.1	Einstellparameter	31
3.1.1.1	Erzeugung von Durchstrahlungsbilddaten	31
3.1.1.2	Verarbeitung von Durchstrahlungsbilddaten	32
3.2	Manuelles Einstellen von Einstellparametern	33
3.3	Ansätze zum automatischen Einstellen von Einstellparametern	34
3.3.1	Vordefinierte Einstellparametersätze	34
3.3.2	Belichtungsautomaten	34
3.3.3	Wissensbasiertes System	35
3.3.4	Künstliche neuronale Netze	35
3.3.5	Simulationsbasierte Lösungsansätze	35
3.4	Schwachstellen bestehender Lösungsansätze	36
3.5	Anforderungen an ein Verfahren zur Optimierung von Einstellparametern	37
4	Verfahren zur Optimierung von Einstellparametern	39
4.1	Definition der Messaufgabe	39
4.1.1	Messgerät	39
4.1.2	Messobjekt	40
4.1.2.1	Geometrie	40
4.1.2.2	Material	40
4.1.3	Geometrische Eigenschaften	41
4.1.3.1	Relevante Grenzflächenpunkte	41
4.1.3.2	Strukturauflösung	41
4.1.3.3	Einzelpunktstreuung oder Messzeit	42
4.2	Simulation der Einzelpunktstreuung	43
4.2.1	Erzeugung der Durchstrahlungsbilddaten	43
4.2.1.1	Projektionsgeometrie	44
4.2.1.2	Erzeugung von Röntgenstrahlung	45
4.2.1.3	Abschwächung von Röntgenstrahlung	46

4.2.1.4	Detektion von Röntgenstrahlung	48
4.2.1.5	Vorverarbeitung	55
4.2.1.6	Zusammenfassung der Erkenntnisse	56
4.2.2	Verarbeitung der Durchstrahlungsbilddaten	58
4.2.2.1	Bestimmung der Projektionswerte	58
4.2.2.2	Rekonstruktion der Schwächungskoeffizienten.....	59
4.2.2.3	Bestimmung von Grenzflächenpunkten.....	66
4.2.2.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse	71
4.3	Optimierung von Einstellparametern	78
4.3.1	Optimierung zeitinvarianter Parameter	79
4.3.1.1	Vorbereitung der Simulationsumgebung.....	80
4.3.1.2	Minimierung der Abschwächung durch den Vorfilter	83
4.3.1.3	Optimierung der Röhrenspannung.....	83
4.3.1.4	Optimierung der Röhrenleistung	83
4.3.2	Berechnung der normierten Einzelpunktstreuung	87
4.3.3	Bestimmung der zulässigen Gesamtbelichtungszeit.....	87
4.3.3.1	Bestimmung der mindestens erforderlichen Gesamtbelichtungszeit	87
4.3.3.2	Bestimmung der maximal zulässigen Gesamtbelichtungszeit.....	87
4.3.3.3	Bestimmung der einzustellenden Gesamtbelichtungszeit.....	88
4.3.4	Optimierung zeitvarianter Parameter.....	88
4.3.4.1	Minimierung der Integrationszeit	89
4.3.4.2	Maximierung der Drehschrittzahl oder Bildmittelungsanzahl.....	89
4.3.4.3	Optimierung der Bildmittelungsanzahl oder Drehschrittzahl	89
4.3.4.4	Bestimmung der Messzeitdifferenz	90
4.4	Abschätzung der Zielgrößen	90
4.4.1.1	Schätzung der Messzeit	90
4.4.1.2	Schätzung der mittleren oder maximalen Einzelpunktstreuung	90
4.5	Ausgabe und Einstellen der Einstellparameter.....	90
5	Experimentelle Überprüfung	91
5.1	Definition der Messaufgabe	91
5.1.1	Messgerät	91
5.1.2	Messobjekt.....	93

5.1.3	Geometrische Eigenschaften	93
5.1.3.1	Relevante Grenzflächenpunkte	93
5.1.3.2	Strukturauflösung	93
5.1.3.3	Einzelpunktstreuung oder Messzeit.....	93
5.2	Simulation der Einzelpunktstreuung.....	94
5.2.1	Erzeugung der Durchstrahlungsbilddaten.....	95
5.2.2	Verarbeitung der Durchstrahlungsbilddaten	96
5.2.2.1	Bestimmung der Projektionswerte	96
5.2.2.2	Rekonstruktion der Schwächungskoeffizienten	97
5.2.2.3	Bestimmung von Grenzflächenpunkten	99
5.2.2.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse	100
5.3	Optimierung von Einstellparametern	106
5.3.1	Optimierung zeitinvarianter Parameter.....	106
5.3.1.1	Vorbereitung der Simulationsumgebung	106
5.3.1.2	Minimierung der Abschwächung durch den Vorfilter	106
5.3.1.3	Optimierung der Röhrenspannung	106
5.3.1.4	Optimierung der Röhrenleistung	107
5.3.2	Berechnung der normierten Einzelpunktstreuung	108
5.3.3	Bestimmung der zulässigen Gesamtbelichtungszeit	108
5.3.3.1	Vorgabe Einzelpunktstreuung	108
5.3.3.2	Vorgabe Messzeit.....	108
5.3.4	Optimierung zeitvarianter Parameter	108
5.4	Abschätzung der Zielgrößen.....	109
5.5	Ausgabe und Einstellen der Einstellparameter	109
6	Untersuchung des Nutzens für den Anwender	111
6.1	Definition der Messaufgabe.....	111
6.1.1	Messgerät	111
6.1.2	Messobjekt	111
6.1.3	Geometrische Eigenschaften	112
6.1.3.1	Relevante Grenzflächenpunkte	112
6.1.3.2	Erforderliche Strukturauflösung.....	112
6.1.3.3	Messzeit oder Einzelpunktstreuung.....	112
6.2	Optimierung von Einstellparametern	113

6.2.1	Optimierung zeitinvarianter Parameter	113
6.2.1.1	Minimierung der Abschwächung durch den Vorfilter	113
6.2.1.2	Optimierung der Röhrenspannung	114
6.2.1.3	Optimierung der Röhrenleistung	115
6.2.2	Berechnung der normierten Einzelpunktstreuung	115
6.2.3	Bestimmung der zulässigen Gesamtbelichtungszeit	115
6.2.4	Optimierung zeitvarianter Parameter	116
6.3	Abschätzung der Zielgrößen	116
6.4	Ausgabe und Einstellen der Einstellparameter	117
7	Schwachstellen und Vorschläge zur Verbesserung	119
7.1	Definition der Messaufgabe	119
7.1.1	Messobjekt	119
7.1.1.1	Geometrie	119
7.1.1.2	Material	120
7.1.2	Geometrische Eigenschaften	120
7.1.2.1	Relevante Grenzflächenpunkte	120
7.1.2.2	Strukturauflösung	121
7.1.3	Messzeit oder Einzelpunktstreuung	121
7.2	Simulation der Streuung geometrischer Eigenschaften	122
7.2.1.1	Erzeugung der Durchstrahlungsbilddaten	122
7.2.1.2	Verarbeitung der Durchstrahlungsbilddaten	122
7.3	Optimierung von Einstellparametern	123
7.3.1	Zeitinvariante Parameter	123
7.3.1.1	Auswahl des Tomografieverfahrens	123
7.3.1.2	Optimierung der Projektionsgeometrie	123
7.3.1.3	Optimierung von Parametern der digitalen Verarbeitung	123
8	Zusammenfassung	125
	Literaturverzeichnis	127
	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	133
	Abbildungsverzeichnis	139
	Tabellenverzeichnis	145