

Dipl.-Ing. Thomas Boltze, Veldhoven

Parameterschätzung für die Feuchtemessung mit Mikrowellen

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-
und Regelungstechnik

Nr. **568**

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis häufig verwendeter Formelzeichen	IX
1 Einleitung	1
2 Physikalische Grundlagen	4
2.1 Wellenausbreitung	4
2.2 Dielektrizitätskonstante	5
2.3 Mischungsformeln	6
2.4 Zweitorbeschreibung	7
3 Problemstellung und Lösungsansatz	9
3.1 Aufbau zur Messung von Schüttgütern	9
3.1.1 Meßaufbau und -signal	9
3.1.2 Störeinflüsse	10
3.1.3 Referenzmessungen	10
3.2 Aufbau zur Messung in Wänden	11
3.2.1 Meßaufbau und -signal	11
3.2.2 Störeinflüsse	11
3.2.3 Referenzmessungen	12
3.3 Prinzipieller Lösungsansatz: Entkopplung	12
3.4 Spezieller Ansatz für die Schüttgutmessung	12
4 Aufbau zur Messung von Schüttgütern	14
4.1 Meßsignal und Modellierung	14
4.2 Bisherige Auswerteverfahren und Referenzverfahren	15
4.3 Entkopplung	18
4.4 Least Squares Verfahren	21

4.4.1	Allgemeine Grundlagen	21
4.4.2	Least Squares Lösung	22
4.4.3	Total Least Squares Lösung	23
4.4.4	LS/TLS-Lösung	23
4.4.5	Strukturierte TLS-Lösung	24
4.4.6	Split-TLS Algorithmus	24
4.4.7	Gewichtungsstrategien	25
4.4.8	Simulationsergebnisse	28
4.5	Verfahren mit Redundanzausnutzung	33
4.5.1	Txx-Verfahren	34
4.5.2	TLN/TAN	34
4.5.3	Lxx-Verfahren	35
4.5.4	LLN/LAN	36
4.5.5	Simulationsergebnisse	37
4.6	Verfahren ohne vollständiges De-embedding	38
4.6.1	Algorithmus	39
4.6.2	Simulationsergebnisse	40
4.7	Meßergebnisse	41
5	Feuchtebestimmung bei Schüttgütern	43
5.1	Mischungsmodelle	43
5.2	Maximum Likelihood Schätzung	46
5.3	Verbessertes Modell	48
5.3.1	Virtuelle Feuchte	49
5.3.2	Virtueller Lückengrad	49
5.3.3	Iterativer Schätzalgorithmus	50
5.3.4	Bestimmung der Modellparameter	53
5.4	Simulationsergebnisse	54
5.5	Meßergebnisse	54
6	Modellfreie Schätzung zur Messung von Schüttgütern	57
6.1	Minimum Varianz Schätzung	57
6.2	Anwendung auf die Feuchtemessung	59
6.3	Meßergebnisse	60
6.3.1	Schätzung der Schütthöhe	60
6.3.2	Schätzung der Feuchte	61
6.3.3	Schätzung der Feuchte und Schütthöhe	62

7	Aufbau zur Messung von Wänden	64
7.1	Meßsignal und Modellierung	64
7.2	Auswerteverfahren	67
7.2.1	Filterung oder Schätzung?	67
7.2.2	Direkte Auswertung der Wellengleichung	67
7.2.3	Prädiktionsansatz	69
7.2.4	Auswertung aufgrund der Zustandsbeschreibung	70
7.2.5	Maximum Likelihood Schätzung	73
7.3	Vergleich und Bewertung	76
7.3.1	Cramer-Rao Schranke	76
7.3.2	Rauschfreier Fall	76
7.3.3	Verhalten unter Rauscheinfluß	80
7.3.4	Einbrüche der Signalleistung	81
7.4	Konfidenzwerte und Detektion von Kanten	82
7.5	Einfluß eines Gleichanteils	84
7.6	Einfluß von Inhomogenitäten	86
7.7	Einfluß linearer Verzerrungen	89
7.7.1	Einfluß eines ortsinvarianten Systems	91
7.7.2	Bestimmung des Entzerrers	92
7.8	Methoden der Vorverarbeitung	95
7.9	Meßergebnisse	97
7.9.1	Messungen an PVC	97
7.9.2	Messungen an einem alten Schulgebäude	102
7.9.3	ML-Schätzung mit Gleichanteil und schrägen Grenzflächen	107
7.9.4	Vergleich Filterung und Hauptachsentransformation	108
7.10	Feuchteabhängigkeit bei Baustoffen	112
8	Zusammenfassung	114
A	Least Squares Verfahren	116
A.1	Eigenwerte, Eigenvektoren und die Matrixnorm	117
A.2	Singulärwertzerlegung und Matrizeneigenschaften	118
A.3	Einfaches Least-Squares Problem	121
A.4	Total-Least-Squares (TLS) Probleme	123
A.5	Die TLS Lösung von $\mathbf{Ax} \approx \mathbf{b}$	126
A.6	Gemischte Formen von LS- und TLS-Problemen	129
A.7	Householder Reflexionen	130
A.8	Strukturierte Total Least Squares Probleme	131
A.9	Die STLS Lösung von $\mathbf{Ax} \approx \mathbf{b}$	132

B	Minimum Varianz Schätzung	136
C	Analyse der Prädiktion	140
	Literaturverzeichnis	143