

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	iii
1. Einführung und Motivation	1
1.1. Relevanz von Wind-Lidar-Messungen	1
1.2. Das bistatische Wind-Lidar der PTB	2
1.3. Voraussetzungen für die Rekonstruktion	4
1.4. Ziel und Struktur der Arbeit	6
2. Stand der Forschung	9
2.1. Verbund mit mehreren Lidar-Systemen	9
2.2. Detektionsstatistik überlagerter Messvolumina	10
2.3. Verfahren zur Turbulenzfilterung	11
2.4. Verfahren zur Hydrometeorfilterung	11
2.5. Verfahren zur Zeitreihenrekonstruktion	12
3. PTB-Lidar-System	15
3.1. Grundlegendes Messprinzip	15
3.1.1. Berechnung des Geschwindigkeitsvektors	16
3.1.2. Bestimmung der absoluten Dopplerfrequenzen	18
3.1.3. Bestimmung der relativen Dopplerfrequenzen	18
3.1.4. Konvergenzkriterium und Konvergenzfehler	20
3.2. Aufbau und Funktionsweise	21
3.2.1. Modulation des Sendesignals	21
3.2.2. Demodulation der Empfangssignale	22
3.2.3. Berechnung der Empfangsspektren und KKFen	23
3.2.4. Bestimmung der Messhöhen	26
3.2.5. Dynamikbereich und Auflösung	27
3.2.6. Verfügbare Rechenleistung und Speicherkapazität	28
3.2.7. Grundprinzip der PTB-Lidar-Messung	28
4. Simulation des Messvorgangs	29
4.1. Definition der Sensitivität	29
4.2. Zentrale Messvolumengröße	30
4.3. Simulation der Detektionsstatistik	31

4.4.	Simulation der Messabweichung durch Konvergenzfehler	32
5.	Verfahren zur Rekonstruktion	37
5.1.	Globale Darstellungen spektraler Charakteristika	37
5.1.1.	Spektrogramme	37
5.1.2.	Korrelogramme	40
5.1.3.	Auto-Gain und Auto-Range	42
5.2.	Turbulenzfilterung mittels Gauß-Filterung	45
5.2.1.	Systemtheorie	45
5.2.2.	Filterbreiten und Bandbreiten	47
5.2.3.	Reduktion des Phasenrauschens	49
5.2.4.	Verstetigung der Maxima	53
5.2.5.	Reduktion unvollständiger Detektionen	56
5.2.6.	Statistische Interpretation und Metrik	64
5.3.	Hydrometeorfilterung mittels Pilot-Peak-Methode	76
5.3.1.	Nutzband und Störband	77
5.3.2.	Übersteuerung des Spektrogramms	79
5.3.3.	Gauß-Filterung des Spektrogramms	82
5.3.4.	Gauß-Fensterung des Spektrogramms	84
5.3.5.	Einflüsse auf die Messabweichung	86
5.4.	Zeitreihenrekonstruktion mittels Kalman-Filterung	89
5.4.1.	Zustandsraumdarstellung	90
5.4.2.	Filterstruktur	92
5.4.3.	Konstantes Messrauschen	93
5.4.4.	Zeitabhängiges Messrauschen	99
5.4.5.	Messunsicherheit des Geschwindigkeitsvektors	105
5.5.	Wetter-Klassifikation mittels Machine Learning	108
5.5.1.	Vorverarbeitung	108
5.5.2.	ML-Modell und Training	112
5.5.3.	Validierung und Ergebnisse	115
6.	Prüf- und Feldmessungen	117
6.1.	Allgemeines zur Durchführung der Vergleiche	117
6.1.1.	Bewertungskriterien	117
6.1.2.	Konvergenzkriterium	118
6.1.3.	Darstellung in Reynolds-Zerlegung	119
6.1.4.	Konfiguration des neuen Verfahrens	119
6.2.	Prüfmessungen in der Windkanalmesseinrichtung	121
6.2.1.	Einschränkungen der Vergleichbarkeit	121
6.2.2.	Ausrichtung der Messvolumina	122
6.2.3.	Laminare Strömung mit Geschwindigkeitsrampe	124
6.2.4.	Turbulente Strömung hinter Pendel	131

6.3.	Feldmessungen bei variierenden Wetterbedingungen	138
6.3.1.	Einschränkungen der Vergleichbarkeit	138
6.3.2.	Trockene Wetterbedingungen	141
6.3.3.	Regnerische Wetterbedingungen	149
6.3.4.	Wetterbedingungen mit Schneefall	156
6.4.	Zusammenfassung der Ergebnisse	163
6.4.1.	Detektionsstatistik	163
6.4.2.	Regressionsparameter	166
7.	Zusammenfassung und Ausblick	169
7.1.	Zusammenfassung	169
7.2.	Ausblick	174
8.	Conclusion and Outlook	175
8.1.	Conclusion	175
8.2.	Outlook	180
A.	Tabelle der Skalierungsfaktoren	181
B.	Messabweichung durch Konvergenzfehler	183
C.	Modulation des Sendesignals	185
D.	Demodulation der Empfangssignale	187
E.	Optimale FFT-Blocklänge	189
F.	Überlagerung der Seitenbänder	191
G.	Entwicklung der Modulationsphasen	193
H.	Berechnung der Strahlintensität	195
I.	Herleitung der Gaußkern-Bandbreite	197
J.	Tabelle der Filterbreiten und Bandbreiten	199
K.	Details zur Implementierung	201
L.	Der Konvergenzfehler im globalen Kontext	207
	Literaturverzeichnis	209
	Publikationen	215