

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>iii</b>
<b>1. Einführung und Motivation</b>	<b>1</b>
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
<b>2. Stand der Forschung</b>	<b>9</b>
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
<b>3. PTB-Lidar-System</b>	<b>15</b>
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
<b>4. Simulation des Messvorgangs</b>	<b>29</b>
4.1. Definition der Sensitivität . . . . .	29
4.2. Zentrale Messvolumengröße . . . . .	30
4.3. Simulation der Detektionsstatistik . . . . .	31

v

4.4. Simulation der Messabweichung durch Konvergenzfehler . . . . .	32
<b>5. Verfahren zur Rekonstruktion</b>	<b>37</b>
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 Phasenrauschen . . . . .	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
<b>6. Prüf- und Feldmessungen</b>	<b>117</b>
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
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>169</b>
7.1. Zusammenfassung . . . . .	169
7.2. Ausblick . . . . .	174
<b>8. Conclusion and Outlook</b>	<b>175</b>
8.1. Conclusion . . . . .	175
8.2. Outlook . . . . .	180
<b>A. Tabelle der Skalierungsfaktoren</b>	<b>181</b>
<b>B. Messabweichung durch Konvergenzfehler</b>	<b>183</b>
<b>C. Modulation des Sendesignals</b>	<b>185</b>
<b>D. Demodulation der Empfangssignale</b>	<b>187</b>
<b>E. Optimale FFT-Blocklänge</b>	<b>189</b>
<b>F. Überlagerung der Seitenbänder</b>	<b>191</b>
<b>G. Entwicklung der Modulationsphasen</b>	<b>193</b>
<b>H. Berechnung der Strahlintensität</b>	<b>195</b>
<b>I. Herleitung der Gaußkern-Bandbreite</b>	<b>197</b>
<b>J. Tabelle der Filterbreiten und Bandbreiten</b>	<b>199</b>
<b>K. Details zur Implementierung</b>	<b>201</b>
<b>L. Der Konvergenzfehler im globalen Kontext</b>	<b>207</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>209</b>
<b>Publikationen</b>	<b>215</b>