

# Inhaltsverzeichnis

|  |            |
|--|------------|
| <b>Kurzfassung</b>   | <b>III</b> |
| <b>Abstract</b>  | <b>V</b>   |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b>   | <b>IX</b>  |
| <b>Symbolverzeichnis</b>   | <b>XI</b>  |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1 Problemstellung und Motivation . . . . .                             | 1          |
| 1.2 Zielsetzung der Arbeit . . . . .                                     | 6          |
| 1.3 Gliederung und Überblick . . . . .                                   | 9          |
| <b>2 Stand der Forschung</b>   | <b>11</b>  |
| 2.1 Assistenzsysteme in der Logistik . . . . .                           | 11         |
| 2.1.1 Ladungsdetektion mit Ultraschallsensoren . . . . .                 | 12         |
| 2.1.2 IMOTRIS: Laderaumüberwachung . . . . .                             | 13         |
| 2.1.3 TU-Dortmund: Ladungsüberwachung . . . . .                          | 15         |
| 2.1.4 Forschungsprojekt - „Das Staplerauge“ . . . . .                    | 17         |
| 2.1.5 Der Paketroboter . . . . .   | 19         |
| 2.2 Sensortechnologien zur 3D-Tiefenmessung . . . . .                    | 21         |
| 2.2.1 Stereokamerasysteme . . . . .                                      | 22         |
| 2.2.2 Triangulation . . . . .  | 26         |
| 2.2.3 Time-of-Flight . . . . .   | 29         |
| <b>3 Theoretische Grundlagen der Bildverarbeitung und Fusionsansätze</b> | <b>35</b>  |
| 3.1 Grundlagen der digitalen Bildverarbeitung . . . . .                  | 35         |
| 3.2 Raumabbildung mittels Tiefendaten . . . . .                          | 36         |
| 3.2.1 Datenstrukturen . . . . .  | 36         |
| 3.2.2 Merkmale von Punktfolgen . . . . .                                 | 40         |
| 3.3 Segmentierungsverfahren . . . . .                                    | 42         |
| 3.3.1 Kantenbasierte Segmentierung . . . . .                             | 45         |
| 3.3.2 Region Growing . . . . .   | 54         |
| 3.3.3 RANSAC . . . . .   | 55         |
| 3.3.4 K-Means Verfahren . . . . .  | 57         |
| 3.3.5 Mean-Shift Verfahren . . . . .                                     | 59         |
| 3.3.6 Zusammenfassende Betrachtung . . . . .                             | 61         |
| 3.4 Fusionsprinzipien und -konzepte . . . . .                            | 62         |
| <b>4 Konzeptionierung des Demonstratorsystems</b>                        | <b>67</b>  |
| 4.1 Systemkonzept . . . . .  | 67         |

|                              |  |            |
|------------------------------|--|------------|
| 4.2                          | Technisches Konzept des Systems zur Ladegutüberwachung . . . . . | 74         |
| 4.2.1                        | Kamerasytem . . . . .  | 75         |
| 4.2.2                        | Beschleunigungswertaufnehmer . . . . .                           | 83         |
| 4.3                          | Integrationskonzept in ein Nutzfahrzeug . . . . .                | 84         |
| <b>5</b>                     | <b>Sensordatenfusion zur Ladungsüberwachung</b>                  | <b>87</b>  |
| 5.1                          | Softwarearchitektur . . . . .                                    | 87         |
| 5.2                          | Anwendungsspezifische Methoden der Bildverarbeitung . . . . .    | 89         |
| 5.2.1                        | Vorverarbeitung der Bilddaten . . . . .                          | 89         |
| 5.2.2                        | Analyse der 2D-Bilddaten . . . . .                               | 91         |
| 5.2.3                        | Segmentierung der 3D-Bilddaten . . . . .                         | 99         |
| 5.3                          | Profil der Beschleunigungsdaten . . . . .                        | 104        |
| 5.4                          | Implementierter Fusionsansatz . . . . .                          | 108        |
| <b>6</b>                     | <b>Evaluation der Laborversuche und Messfahrten</b>              | <b>115</b> |
| 6.1                          | Testszenarien unter Laborbedingungen . . . . .                   | 115        |
| 6.1.1                        | Bewertung der Tiefenauflösung des Kamerasytems . . . . .         | 116        |
| 6.1.2                        | Translationsdetektion des Messobjekts . . . . .                  | 120        |
| 6.1.3                        | Rotationsdetektion des Messobjekts . . . . .                     | 125        |
| 6.2                          | Messfahrtanalyse . . . . .                                       | 127        |
| 6.2.1                        | Schwingungsabhängigkeit des Kamerasytems im Fahrbetrieb .        | 129        |
| 6.2.2                        | Verschiebungsdetektion . . . . .                                 | 130        |
| 6.3                          | Diskussion der Ergebnisse . . . . .                              | 133        |
| <b>7</b>                     | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                              | <b>137</b> |
| 7.1                          | Zusammenfassung . . . . .  | 137        |
| 7.2                          | Ausblick . . . . .   | 139        |
| <b>Literaturverzeichnis</b>  |  | <b>143</b> |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b> |  | <b>157</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>   |  | <b>159</b> |
| <b>A</b>                     | <b>Anhang</b>  | <b>161</b> |
| A.1                          | 3D-Sobel Operator . . . . .                                      | 161        |
| A.2                          | Ergebnistabelle der Tiefenauflösung der Kinect . . . . .         | 161        |
| A.3                          | Messfahrten mit dem Demonstratorsystem . . . . .                 | 165        |