

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                        |      |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Abbildungsverzeichnis .....                                                            | VII  |
| Tabellenverzeichnis .....                                                              | XV   |
| Abkürzungen .....                                                                      | XVII |
| Kurzfassung.....                                                                       | XIX  |
| Abstract .....                                                                         | XXI  |
| 1    Einleitung.....                                                                   | 1    |
| 2    Stand des Wissens .....                                                           | 3    |
| 2.1    Vorbemerkung zur Literaturrecherche.....                                        | 3    |
| 2.2    Die Notwendigkeit der Futterkonservierung.....                                  | 3    |
| 2.3    Ökonomische Notwendigkeit einer optimierten Futtermittelproduktion .....        | 4    |
| 2.4    Konservierungsmethoden .....                                                    | 5    |
| 2.4.1    Heugewinnung.....                                                             | 6    |
| 2.4.2    Silagegewinnung .....                                                         | 6    |
| 2.4.2.1    Hochsilos.....                                                              | 7    |
| 2.4.2.2    Ballensilage .....                                                          | 9    |
| 2.4.2.3    Fahrsilos.....                                                              | 10   |
| 2.4.2.4    Bauformen von Fahrsilos (Flachsilos).....                                   | 11   |
| 2.4.2.5    Luftdichte Abdeckung von Fahrsilos .....                                    | 13   |
| 2.4.2.6    Beschwerung der Folie.....                                                  | 16   |
| 2.5    Konservierungsablauf von Silage unter Luftabschluss .....                       | 20   |
| 2.5.1    Silagetemperatur .....                                                        | 26   |
| 2.5.2    Gase im Silo .....                                                            | 28   |
| 2.5.3    Auswirkungen verdorbener Silagen auf Tierwohl und die Produktsicherheit ..... | 34   |
| 2.5.4    Fütterungsstrategien von kontaminierter Silage .....                          | 36   |
| 2.6    Offene Silagen .....                                                            | 37   |
| 2.7    Lufteintritt.....                                                               | 38   |
| 2.8    Gasfluss in Silagen .....                                                       | 39   |

|         |                                                                                            |    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.9     | Notwendigkeit einer ordentlichen Silierung vor dem Hintergrund des<br>Umweltschutzes ..... | 42 |
| 2.10    | Messungen von Veränderungen im Silo und Silocontrolling .....                              | 44 |
| 2.11    | Funknetzwerke auf dem landwirtschaftlichen Betrieb .....                                   | 53 |
| 3       | Zielstellung .....                                                                         | 55 |
| 4       | Material und Methoden .....                                                                | 57 |
| 4.1     | Hardware .....                                                                             | 57 |
| 4.1.1   | Temperatursensoren .....                                                                   | 58 |
| 4.1.2   | Sauerstoffsensor .....                                                                     | 59 |
| 4.1.3   | Kohlenstoffdioxidsensor .....                                                              | 60 |
| 4.1.4   | Luftdrucksensor .....                                                                      | 61 |
| 4.1.5   | Luftfeuchtigkeitssensor .....                                                              | 61 |
| 4.1.6   | Sensorübersicht .....                                                                      | 62 |
| 4.1.7   | Akkus und Batterien .....                                                                  | 62 |
| 4.1.8   | Datenübertragung / Datenspeicherung .....                                                  | 62 |
| 4.1.8.1 | Datenspeicherung und Abruf on Demand .....                                                 | 63 |
| 4.1.8.2 | Permanente Datenübertragung ohne Zwischenspeicher: LoRa<br>Funkstandard .....              | 63 |
| 4.2     | Sensordatenverarbeitung .....                                                              | 64 |
| 4.2.1   | Datenverarbeitung der RTR-Module .....                                                     | 64 |
| 4.2.2   | Datenverarbeitung der LoRa-Module .....                                                    | 65 |
| 4.3     | Vorversuche .....                                                                          | 66 |
| 4.3.1   | Laborversuche .....                                                                        | 66 |
| 4.3.2   | Prototypenversuch im Silobehälter .....                                                    | 68 |
| 4.4     | Erprobung eines Moduls zur Überwachung von Silageparametern .....                          | 69 |
| 4.4.1   | Energieeinsparung .....                                                                    | 69 |
| 4.4.2   | Gehäuseschutz / Sensorschutz .....                                                         | 69 |
| 4.4.3   | Messung von Parametern und Veränderungen im Silo .....                                     | 70 |
| 4.5     | Versuchsort .....                                                                          | 73 |
| 4.5.1   | Datenauswertung / Bereitstellung .....                                                     | 73 |

|         |                                                                                             |     |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.5.2   | Statistische Auswertung der Ergebnisse.....                                                 | 74  |
| 5       | Ergebnisse.....                                                                             | 75  |
| 5.1     | Vortest und Laborversuche .....                                                             | 75  |
| 5.2     | Energiemanagement der entwickelten Module.....                                              | 79  |
| 5.2.1   | Zeitschaltung .....                                                                         | 79  |
| 5.2.2   | Schaltplan des RTR-Gesamtmoduls .....                                                       | 80  |
| 5.2.3   | Schaltplan des LoRa-Gesamtmoduls.....                                                       | 82  |
| 5.2.4   | Übersicht über die Stromversorgung der Sensoren .....                                       | 83  |
| 5.3     | Ergebnisse des Prototypenversuches .....                                                    | 84  |
| 5.4     | Gehäuseevolution der entwickelten Module .....                                              | 86  |
| 5.4.1   | Erster Sensoraufbau.....                                                                    | 86  |
| 5.4.2   | Erste Modulevolution .....                                                                  | 89  |
| 5.4.3   | Zweite Modulevolution .....                                                                 | 89  |
| 5.5     | Schutz der Hardware .....                                                                   | 90  |
| 5.5.1   | Einsatz von Schrumpfschläuchen .....                                                        | 90  |
| 5.5.2   | Einsatz von Mantelspray .....                                                               | 92  |
| 5.5.3   | Einsatz von Elektrovergussharz.....                                                         | 93  |
| 5.6     | Datenabruf der Sensoren.....                                                                | 94  |
| 5.7     | Futtermittelanalysen der Hauptversuche.....                                                 | 98  |
| 5.8     | Sensorische Erfassung von Qualitätsparametern im Fahrsilo .....                             | 99  |
| 5.8.1   | Temperatur.....                                                                             | 99  |
| 5.8.1.1 | Temperatur unter der Folie .....                                                            | 99  |
| 5.8.1.2 | Temperatur im Silokern .....                                                                | 101 |
| 5.8.2   | Sauerstoff .....                                                                            | 103 |
| 5.8.3   | Kohlenstoffdioxid .....                                                                     | 104 |
| 5.8.4   | Luftfeuchtigkeit .....                                                                      | 105 |
| 5.8.5   | Luftdruck.....                                                                              | 107 |
| 5.9     | Messung von Veränderungen im Silo durch Lufteinfluss – Ergebnisse der<br>Großversuche ..... | 108 |

|          |                                                                                                                              |     |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.9.1    | Versuch 1 .....                                                                                                              | 108 |
| 5.9.1.1  | Temperatur unter der Folie .....                                                                                             | 109 |
| 5.9.1.2  | Temperatur im Silokern .....                                                                                                 | 109 |
| 5.9.1.3  | Sauerstoff .....                                                                                                             | 110 |
| 5.9.1.4  | Kohlenstoffdioxid .....                                                                                                      | 113 |
| 5.9.1.5  | Luftfeuchtigkeit .....                                                                                                       | 114 |
| 5.9.1.6  | Luftdruck .....                                                                                                              | 115 |
| 5.9.2    | Versuch 2 .....                                                                                                              | 116 |
| 5.9.2.1  | Temperatur unter der Folie .....                                                                                             | 117 |
| 5.9.2.2  | Temperatur im Silokern .....                                                                                                 | 117 |
| 5.9.2.3  | Sauerstoff .....                                                                                                             | 117 |
| 5.9.2.4  | Kohlenstoffdioxid .....                                                                                                      | 120 |
| 5.9.2.5  | Luftfeuchtigkeit .....                                                                                                       | 121 |
| 5.9.2.6  | Luftdruck .....                                                                                                              | 121 |
| 5.9.3    | Versuch 3 .....                                                                                                              | 122 |
| 5.9.3.1  | Temperatur unter der Folie .....                                                                                             | 123 |
| 5.9.3.2  | Temperatur im Silokern .....                                                                                                 | 125 |
| 5.9.3.3  | Sauerstoff .....                                                                                                             | 126 |
| 5.9.3.4  | Kohlenstoffdioxid .....                                                                                                      | 129 |
| 5.9.3.5  | Luftfeuchtigkeit .....                                                                                                       | 132 |
| 5.9.3.6  | Luftdruck .....                                                                                                              | 135 |
| 5.10     | Gesamtbetrachtung der eingesetzten Sensoren .....                                                                            | 135 |
| 5.11     | Aufbau einer Middleware mit Visualisierung, Datenspeicherung und online-Alarmierung bei Abweichungen des Sollzustandes ..... | 138 |
| 5.11.1   | Entwicklung einer automatischen Historisierung .....                                                                         | 138 |
| 5.11.2   | Online-Alarmierung bei Abweichungen von Normalzuständen .....                                                                | 138 |
| 5.11.2.1 | Alarmierung bei ansteigenden Temperaturen .....                                                                              | 139 |
| 5.11.2.2 | Alarmierung bei steigenden Temperaturen innerhalb des Silostocks .....                                                       | 141 |
| 5.11.2.3 | Alarmierung bei Anstieg des Sauerstoffs .....                                                                                | 142 |

|          |                                                                                                                   |     |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.11.2.4 | Alarmierung bei übermäßigem Abfall des Kohlenstoffdioxids.....                                                    | 142 |
| 5.11.2.5 | Alarmierung bei Veränderung der Luftfeuchtigkeit .....                                                            | 142 |
| 5.11.2.6 | Alarmierung bei Sensorausfall .....                                                                               | 143 |
| 5.11.3   | Datenauswertung und Visualisierung.....                                                                           | 143 |
| 6        | Diskussion .....                                                                                                  | 147 |
| 6.1      | Silierung allgemein.....                                                                                          | 147 |
| 6.2      | Siloabdeckung .....                                                                                               | 150 |
| 6.3      | Vor- und Prototypenversuch: Erfassung von Kontrollparametern in bereits<br>siliertem Material.....                | 150 |
| 6.4      | Erfassung von Kontrollparametern in Silage – Evaluation der Großversuche..                                        | 152 |
| 6.4.1    | Temperatur unter der Folie .....                                                                                  | 152 |
| 6.4.2    | Temperatur im Silokern .....                                                                                      | 155 |
| 6.4.3    | Sauerstoff im Silo .....                                                                                          | 157 |
| 6.4.4    | Kohlenstoffdioxid im Silo.....                                                                                    | 164 |
| 6.4.5    | Luftfeuchtigkeit im Silo.....                                                                                     | 167 |
| 6.4.6    | Luftdruck im Silo .....                                                                                           | 169 |
| 6.5      | Bewertung der eingesetzten Sensoren .....                                                                         | 170 |
| 6.6      | Messung von Veränderungen im Silo im Vergleich zu vorhandenen<br>Untersuchungen .....                             | 171 |
| 6.7      | Bewertung der Datenübertragung der eingesetzten Module .....                                                      | 176 |
| 6.8      | Middleware mit Visualisierung, Datenspeicherung und online-Alarmierung bei<br>Abweichungen des Sollzustandes..... | 178 |
| 6.8.1    | Online-Alarmierung bei Abweichungen von Normalzuständen.....                                                      | 178 |
| 6.8.2    | Erkenntnisse aus der Diskussion der Alarmzustände .....                                                           | 181 |
| 6.9      | Notwendigkeit des Sensorschutzes .....                                                                            | 182 |
| 6.10     | Einordnung der Sensormodule mit RTR und LoRa-WAN Übertragung .....                                                | 185 |
| 6.10.1   | Potenzielle weitere Sensoren .....                                                                                | 187 |
| 6.11     | Bewertung des Sensorgehäuses .....                                                                                | 188 |
| 6.12     | Kosteneinschätzung eines Silageüberwachungsmoduls .....                                                           | 190 |

---

|     |                                                                     |     |
|-----|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 7   | Schlussfolgerung.....                                               | 195 |
| 7.1 | Sensormodul.....                                                    | 196 |
| 7.2 | Kriterien eines Drahtlossensornetzwerks innerhalb einer Silage..... | 199 |
| 8   | Ausblick.....                                                       | 203 |
| 9   | Literaturverzeichnis .....                                          | 205 |