

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>i</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation und Problemstellung	1
1.2. Ziele der Arbeit	2
1.3. Konzept und Aufbau der Arbeit	3
<b>2. Qualität von Mais-Häckselgut</b>	<b>4</b>
2.1. Stärkeverdaulichkeit und dessen Einfluss auf die Milchleistung	4
2.2. Quantifizierung von Häckselqualität	5
2.2.1. Ernteprozess	6
2.2.2. Quantitative Bewertung von Mais-Häckselgut	8
<b>3. Stand der Technik für bildgebende Systeme</b>	<b>16</b>
3.1. Bildgebende RGB-Systeme	16
3.1.1. Grundlagen zur RGB Bildgebung	17
3.1.2. Relevante Kenngrößen bildgebender Systeme	26
3.1.3. Anwendung von RGB Bildgebung zur Qualitätsmessung von Mais-Häckselgut in der Literatur	27
3.2. Multispektrale und hyperspektrale Bildgebung	30
3.2.1. Grundlagen zu elektromagnetischer Strahlung	31
3.2.2. Spektrale Eigenschaften von Mais	36
3.2.3. Grundlagen zur Multi- und hyperspektralen Bildgebung	41
3.2.4. Relevante Verfahren zur Merkmalsauswahl	45
3.2.5. Anwendung von Multi- und hyperspektralen Bildgebung zur Qualitätsmessung von Mais-Häckselgut in der Literatur	47
3.3. Weitere bildgebende Systeme	49
3.3.1. Kapazitive Sensorik	49
3.3.2. CT-Scan	50
<b>4. Stand der Technik für Deep Learning Imaging</b>	<b>52</b>
4.1. Grundlagen Neural Networks	54
4.1.1. Artificial Neural Networks	54
4.1.2. Convolutional Neural Networks	57
4.2. Anwendungsbereiche des Deep Learning Imaging	62
4.2.1. Image Recognition	63
4.2.2. Semantic Segmentation	68
4.2.3. Object Detection	72
4.2.4. Instance Segmentation	74
4.3. Training von Convolutional Neural Networks	76
4.3.1. Genereller Deep Learning Trainingsprozess	76

4.3.2.	Loss Funktionen	78
4.3.3.	Metriken	80
4.3.4.	Optimizer	82
4.3.5.	Einflussgrößen des Deep Learning Trainingsprozesses	83
4.4.	Entwicklungsprozess Deep Learning	85
4.4.1.	Versuchsplanung & Datenvorbereitung	86
4.4.2.	Annotation	87
4.4.3.	Trainingsprozess und Deployment	88
<b>5.</b>	<b>Konzeption und Versuchsdesign zur Qualitätserfassung</b>	<b>89</b>
5.1.	Qualitätsmessung von Mais-Häckselgut	89
5.1.1.	Bewertung von Qualitätsgrößen	90
5.1.2.	Auswahl von Qualitätsgrößen	91
5.2.	Probengewinnung und Referenzwertbestimmung	94
5.2.1.	Versuchsplanung Feldhäcksler	94
5.2.2.	Versuchsdurchführung und Probennahme	95
5.3.	Erzeugung der Datengrundlage	96
5.3.1.	Auswahl geeigneter Sensorik	96
5.3.2.	Annotationskonzept	97
5.4.	Vorgehen zur Datenauswertung	98
<b>6.</b>	<b>Laborversuche</b>	<b>100</b>
6.1.	Versuchsaufbau der Laborversuche	101
6.2.	Datengrundlage der Laborversuche	104
6.3.	Auswertung der Laborversuche	108
6.3.1.	Verifizierung der Laborergebnisse	108
6.3.2.	Methodenauswahl für bildgebendes Deep Learning	109
6.3.3.	Spektrale Merkmalsauswahl	113
6.3.4.	Entwicklung der Deep Learning Modelle	118
6.3.5.	Gegenüberstellung der Modelle	123
6.4.	Bewertung und Erkenntnisse	125
<b>7.</b>	<b>Auslegung des Messsystems</b>	<b>126</b>
7.1.	Statistische Simulation des Messsystems	127
7.1.1.	Entdeckungswahrscheinlichkeit von Maispartikeln	127
7.1.2.	Simulation von Partikelhäufigkeiten	129
7.1.3.	Simulationsmodell eines Kamerasystems	130
7.2.	Anforderungen an die Hardware	132
7.2.1.	Rahmenbedingungen durch die Messumgebung	132
7.2.2.	Anforderungen an die Kamera	134
7.2.3.	Anforderungen an das Gesamtsystem	139
7.3.	Aufbau des Messsystems	143
7.3.1.	Auswahl der optischen Komponenten	143
7.3.2.	Mechanischer Aufbau des Messsystems	147

<b>8. Ernteversuche</b>	<b>148</b>
8.1. Versuchsaufbau der Ernteversuche . . . . .	149
8.2. Datengrundlage der Ernteversuche . . . . .	152
8.3. Auswertung der Ernteversuche . . . . .	155
8.3.1. Wiederholgenauigkeit der CSPS Analyse . . . . .	155
8.3.2. Quantifizierung der Bildqualität . . . . .	158
8.3.3. Entwicklung eines Segmentierungsmodells . . . . .	161
8.3.4. Gegenüberstellung von Simulation und Messung . . . . .	168
8.4. Zusammenfassung und Bewertung der Erkenntnisse . . . . .	170
<b>9. Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>172</b>
9.1. Gegenüberstellung der Anforderungen und der Ergebnisse . . . . .	172
9.2. Vergleich der Ergebnisse und des Stands der Technik . . . . .	174
9.3. Beantwortung der Forschungsfragen . . . . .	176
<b>10. Zusammenfassung und Fazit</b>	<b>178</b>
<b>11. Ausblick</b>	<b>181</b>
11.1. Bewertung und Optimierung von Annotationen . . . . .	181
11.2. Deployment auf Computing Plattform . . . . .	183
11.3. Mobile Qualitätserfassung von Mais-Häckselgut . . . . .	184
<b>A. Anhang</b>	<b>vi</b>
A.1. Mais als Nutzpflanze . . . . .	vi
A.1.1. Mais in der Landwirtschaft . . . . .	vii
A.1.2. Inhaltsstoffe der Maispflanze . . . . .	vii
A.1.3. Aufbau der Maispflanze . . . . .	ix
A.2. Mais als Futtermittel . . . . .	xi
A.2.1. Silierprozess von Mais als Futtermittel . . . . .	xii
A.2.2. Verdauungsphysiologie des Wiederkäuers . . . . .	xiv
A.3. Weitere Qualitätsgrößen . . . . .	xvii
A.3.1. <i>pH</i> -Wert im Pansen . . . . .	xvii
A.3.2. Vergärbarkeitskoeffizient . . . . .	xviii
A.4. Maxwell Gleichungen . . . . .	xix
A.5. Datenblatt Pika L . . . . .	xx
A.6. Datenblatt NVIDIA RTX 5000 . . . . .	xxii
A.7. Trainingsresultate Laborversuche 2020 . . . . .	xxiii
A.8. Datenblatt a2A1920-51gcBAS . . . . .	xxiv
A.9. Datenblatt Basler Lens C125-0818-5M-P . . . . .	xxv
A.10. Datenblatt Basler Light Bar-45x100_Power-W . . . . .	xxvi
<b>B. Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xxvii</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>xxx</b>