

**Untersuchungen zum Leistungspotenzial
des Einsatzes von Arbeitspferden
und moderner pferdegezogener Technik
im Ökologischen Landbau
am Beispiel der Mahd im Grünland**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

an der Universität Kassel
Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften

in Witzenhausen

vorgelegt von:

Dipl.-Biol. Peter Herold

Datum der Disputation: 10.06.2016

„New options are always suspected, and usually opposed, without any other reason but because they are not already common.“

(Neuen Alternativen wird immer misstraut, und in der Regel werden sie abgelehnt, einzig und alleine deswegen, weil sie noch nicht geläufig sind.)

(John Locke, 1622 – 1704)

Für meine Eltern, die mich in die Lage versetzt haben, diese Arbeit zu beginnen, und trotz der langen Bearbeitungszeit immer zu mir standen. Meinem Vater war es leider nicht vergönnt, den Abschluss dieser Arbeit zu erleben.

Für Pera, Pia und Jonathan, die mir die Kraft gegeben haben, diese Arbeit doch noch fertig zu stellen.

Für Senta und Heiko, die sie dabei nach Kräften unterstützt haben.

Und für Alphonse und Piroux, die mir den Zutritt zur (Arbeits-)Pferdewelt gestatteten und meine ersten Lehrmeister waren. Ich werde ihnen nicht vergessen, wie sie mein Leben verändert haben!

Dem Gedenken an Charlie Pinney gewidmet, dem Pionier des modernen Arbeitspferdeeinsatzes in Europa. Von ihm stammten nicht nur die Pferde und die moderne pferdegezogene Technik dieser Untersuchung. Charlie hat mich viel gelehrt und nachhaltig geprägt. Es war ihm nicht vergönnt, die Ergebnisse meiner Arbeit zu studieren; er starb viel zu früh nach langer, schwerer Krankheit am 10. September 2007.

In Memoriam Prof. Dr. hab. Dr. h.c. Ewald Sasimowski, dessen umfangreiche Forschung in ihrer Bedeutung für den Zugtiereinsatz in Europa nicht zu überschätzen ist. Auch ihm war es nicht vergönnt, den Abschluss dieser Arbeit zu erleben; er starb am 16.04.2012.

Inhaltsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1. Einleitung und Problemstellung - Arbeitspferde in der Landwirtschaft heute	1
2. Literaturübersicht.....	3
2.1 Die Entwicklung des Einsatzes von Arbeitspferden in der deutschen Landwirtschaft	3
2.1.1 Vom Wildtier zum Arbeitstier – Abstammung und Domestikation des Pferdes	3
2.1.2 Die Entstehung der deutschen Arbeitspferderassen	4
2.1.3 Die Nutzung des Pferdes als Zugtier in der deutschen Landwirtschaft.....	9
2.1.4 Die Entwicklung pferdegezogener Technik in der Landwirtschaft unter besonderer Berücksichtigung der Mähtechnik.....	13
2.1.4.1 Pferdegezogene Geräte für die Landwirtschaft	13
2.1.4.2 Vorderwagen	14
2.1.4.3 Moderne Einzelgeräte für den Pferdezug	15
2.1.4.4 Pferdegezogene Mähtechnik	16
2.2 Stand der Forschung zum landwirtschaftlichen Arbeitspferdeeinsatz	18
2.2.1 Umfang des Arbeitspferdeeinsatzes	18
2.2.2 Arbeitsleistung der Zugtiere.....	20
2.2.2.1 Zugkraft der Zugtiere	20
2.2.2.2 Zugkraftbedarf landwirtschaftlicher Maschinen und Geräte.....	23
2.2.2.3 Arbeitsleistung der Zugtiere im landwirtschaftlichen Einsatz	24
2.2.3 Ökologische Aspekte des Einsatzes von Arbeitspferden	27
2.2.4 Ökonomische Aspekte des Einsatzes von Arbeitspferden	32
2.2.5 Weitere Aspekte des Einsatzes von Arbeitspferden.....	36
2.2.6 Forschungsbedarf zum zeitgemäßen Einsatz von Arbeitspferden im Ökologischen Landbau.....	38
3. Untersuchungen zum Leistungspotential moderner pferdegezogener Technik auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen - Parzellenversuch.....	40
3.1 Material und Methoden	40
3.1.1 Versuchsstandorte	40
3.1.2 Untersuchte Varianten.....	40
3.1.3 Eingesetzte Pferde und Geschirre	42
3.1.4 Untersuchte Geräte.....	42
3.1.5 Versuchsanlagen.....	44
3.1.6 Erhobene Parameter	47
3.1.6.1 Topographie und Bodenart.....	47
3.1.6.2 Vegetation	50
3.1.6.3 Bodenfeuchtigkeit zum Zeitpunkt des Versuches	55
3.1.6.4 Lufttemperatur und Luftfeuchte zum Zeitpunkt des Versuches.....	55
3.1.6.5 Geräteparameter	56
3.1.6.6 Physiologische Parameter der Pferde	62

3.1.7	Statistische Methoden bei der Auswertung der Ergebnisse	63
3.2.	Ergebnisse	66
3.2.1	Geräteparameter	66
3.2.1.1	Zugkraftbedarf.....	67
3.2.1.2	Arbeitsgeschwindigkeit und Arbeitsleistung der Pferde	70
3.2.1.3	Tatsächliche und relative Arbeitsbreite	73
3.2.1.4	Arbeitszeit pro Parzelle und Teilarbeitszeiten ab Feldrand.....	75
3.2.1.5	Flächenleistung.....	79
3.2.1.6	Treibstoffverbrauch, Energiebedarf und Emissionen.....	80
3.2.1.7	Bodenbelastung	90
3.2.2	Physiologische Parameter der Pferde	92
3.2.2.1	Herzfrequenz	92
3.2.2.2	Atemfrequenz	96
3.2.2.3	Körpertemperatur	97
3.2.2.4	Schwitzen	99
3.3.	Diskussion	101
3.3.1	Zugkraftbedarf.....	101
3.3.1.1	Durchschnittlicher Zugkraftbedarf	102
3.3.1.2	Relativer Zugkraftbedarf	104
3.3.1.3	Maximaler Zugkraftbedarf	105
3.3.1.4	Eignung der Zapfwelle als Antriebssystem bei pferdegezogenen Geräten	107
3.3.2	Arbeitsgeschwindigkeit und Arbeitsleistung.....	108
3.3.2.1	Arbeitsgeschwindigkeit	108
3.3.2.2	Arbeitsleistung	109
3.3.3	Tatsächliche und relative Arbeitsbreite	110
3.3.4	Arbeitszeit pro Parzelle und Teilarbeitszeiten ab Feldrand.....	111
3.3.4.1	Arbeitszeit pro Parzelle	111
3.3.4.2	Teilarbeitszeiten ab Feldrand	111
3.3.5	Flächenleistung.....	112
3.3.6	Treibstoffverbrauch, Energiebedarf und Emissionen.....	114
3.3.6.1	Treibstoffverbrauch	114
3.3.6.2	Energiebedarf	115
3.3.6.3	Emissionen	121
3.3.7	Bodenbelastung	123
3.3.8	Physiologische Parameter Pferde	128
3.3.8.1	Herzfrequenz	129
3.3.8.2	Atemfrequenz	131
3.3.8.3	Körpertemperatur	132
3.3.8.4	Schwitzen	133
4.	Untersuchungen zum Leistungspotential moderner pferdegezogener Technik auf Praxisbetrieben - Flächenversuche	135
4.1	Material und Methoden	135
4.1.1	Standorte und eingesetzte Pferde	135
4.1.2	Erfasste Parameter.....	139
4.1.3	Statistische Methoden bei der Auswertung der Ergebnisse	140
4.2	Ergebnisse	140
4.2.1	Zugkraftbedarf.....	140

4.2.1.1	Durchschnittlicher Zugkraftbedarf	140
4.2.1.2	Maximaler Zugkraftbedarf	141
4.2.2	Arbeitsgeschwindigkeit	143
4.2.3	Flächenleistung	145
4.2.4	Arbeitszeit und Teilarbeitszeiten	147
4.2.5	Herzfrequenz	149
4.3	Diskussion	151
4.3.1	Zugkraftbedarf	151
4.3.2	Arbeitsgeschwindigkeit, Flächenleistung und Teilarbeitszeiten	151
4.3.3	Herzfrequenz	153
5.	Vergleichende Diskussion der Versuche auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen und auf den Praxisbetrieben	155
5.1	Versuchsaufbau und Untersuchungsmethoden	155
5.2	Ergebnisse	155
5.2.1	Zugkraftbedarf	155
5.2.2	Arbeitsgeschwindigkeit, Flächenleistung und Teilarbeitszeiten	156
5.2.3	Herzfrequenz	159
5.2.4	Fazit	160
6.	Ausblick – Der landwirtschaftliche Arbeitspferdeeinsatz im 21. Jahrhundert – eine Alternative für den Ökologischen Landbau?	163
7.	Zusammenfassung	167
8.	Literatur	171
9.	Anhang	190
10.	Danksagung	209

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Varianten des Parzellenversuchs 2000 und 2001	41
Tabelle 3-2: Bei den Versuchen eingesetzte Pferde	42
Tabelle 3-3: Technische Daten der untersuchten Maschinen	43
Tabelle 3-4: Mittlere Steigung (%) der Blöcke auf den beiden Versuchsflächen	48
Tabelle 3-5: Mittlere Steigung (%) der Varianten auf den beiden Versuchsflächen	48
Tabelle 3-6: Verwendete Ansaatmischung (Herkunft: Camena) auf den Versuchsflächen Kiebitzbreite und Brand	51
Tabelle 3-7: Artenzusammensetzung und Deckungsgrad der Vegetation auf den Versuchsflächen „Obere Kiebitzbreite“ und „Auf dem Brand“	52
Tabelle 3-8: Zustand der Vegetation auf den Versuchsflächen zum Bearbeitungszeitpunkt	53
Tabelle 3-9: Bewertung der Lagerung des Bewuchses.....	53
Tabelle 3-10: Bodenfeuchtigkeit zum Versuchszeitpunkt (Gewichts-%)	55
Tabelle 3-11: EU-Schadstoffgrenzwerte für Nicht-Straßenfahrzeuge, Stufe I, 37 bis < 75 kW	60
Tabelle 3-12: Werte für CO ₂ -, CH ₄ - und N ₂ O- Ausstoß von Benzin und Diesel	61
Tabelle 3-13: Untersuchte Kovariablen im Parzellenversuch	64
Tabelle 3-14: Bedeutung der Kürzel für die untersuchten Varianten	66
Tabelle 3-15: Durchschnittlicher Zugkraftbedarf (N)	67
Tabelle 3-16: Durchschnittlicher Zugkraftbedarf pro Meter Arbeitsbreite („relativer Zugkraftbedarf“ (Nm ⁻¹)	68
Tabelle 3-17: Maximaler Zugkraftbedarf (N).....	69
Tabelle 3-18: Arbeitsgeschwindigkeit (km * h ⁻¹)	71
Tabelle 3-19: Arbeitsleistung der Pferde (kW)	72
Tabelle 3-20: Tatsächliche Arbeitsbreite (cm)	73
Tabelle 3-21: Relative Arbeitsbreite (%).....	74
Tabelle 3-22: Arbeitszeit pro Parzelle (sec.)	75
Tabelle 3-23: Anteil Lastfahrt an der gesamten Arbeitszeit (%)	76
Tabelle 3-24: Anteil Wendezeit an der gesamten Arbeitszeit (%)	77
Tabelle 3-25: Anteil Störungen an der gesamten Arbeitszeit (%)	78
Tabelle 3-26: Flächenleistung (ha * h ⁻¹).....	80
Tabelle 3-27: Treibstoffverbrauch pro Parzelle (l * Parzelle ⁻¹).....	81
Tabelle 3-28: Treibstoffverbrauch pro Hektar (l * ha ⁻¹).....	82
Tabelle 3-29: Energieverbrauch der Motoren (MJ * ha ⁻¹).....	83
Tabelle 3-30: Erhaltungsenergiebedarf EEP beider Pferde (MJ DE * ha ⁻¹)	84
Tabelle 3-31: Zusatzenergiebedarf ZEP der Pferde (MJ DE * ha ⁻¹).....	84
Tabelle 3-32: Gesamtenergiebedarf GEP der Pferde (MJ DE * ha ⁻¹).....	85
Tabelle 3-33: Gesamtenergiebedarf EG der untersuchten Varianten (MJ * ha ⁻¹).....	86
Tabelle 3-34: Treibstoff-Energiebedarf der motorisierten Varianten (kWh/ha).....	87
Tabelle 3-35: Maximale Emissionen von CO, HC, NO _x und Partikeln der im Versuch eingesetzten Motoren (gm * ha ⁻¹)	87
Tabelle 3-36: Werte für CO ₂ -, CH ₄ - und N ₂ O- Ausstoß von Benzin und Diesel (g * MJ ⁻¹)	88
Tabelle 3-37: CO ₂ -, CH ₄ - und N ₂ O-Ausstoß der im Versuch eingesetzten Motoren (g * ha ⁻¹)	88
Tabelle 3-38: Gesamt-Methan (CH ₄) und Gesamt-Stickstoff- (N) Ausstoß pro Hektar der Pferde für die untersuchten Varianten (g * ha ⁻¹)	88
Tabelle 3-39: Gesamt-Emissionen der untersuchten Varianten (g * ha ⁻¹).....	89
Tabelle 3-40: Anzahl Schritte der Pferde je Parzelle (n).....	90

Tabelle 3-41: Bereifung und Breite der Fahrspur der eingesetzten Mähgeräte	91
Tabelle 3-42: Bodenbelastung (%-Anteil der betretenen und überrollten Fläche an der bearbeiteten Fläche)	91
Tabelle 3-43: Ruhepuls (min^{-1}).....	93
Tabelle 3-44: Mittlere Herzfrequenz (min^{-1})	93
Tabelle 3-45: Maximale Herzfrequenz (min^{-1}).....	95
Tabelle 3-46: Veränderung der Atemfrequenz (min^{-1}).....	96
Tabelle 3-47: Veränderung der Körpertemperatur ($^{\circ}\text{C}$)	98
Tabelle 3-48: Veränderung Schwitzen	100
Tabelle 3-49: Rechnerische Flächenleistung ($\text{ha} * \text{h}^{-1}$) der Auswertung über beide Versuchsjahre	113
Tabelle 3-50: Energiebedarf der untersuchten Varianten nach Werten von MEYER & COENEN (2002) ($\text{MJ DE} * \text{ha}^{-1}$).....	117
Tabelle 3-51: Energiebedarf der untersuchten Varianten nach eigenen Berechnungen im Vergleich zu Werten nach MEYER & COENEN (2002) ($\text{MJ DE} * \text{ha}^{-1}$)	118
Tabelle 3-52: Bearbeitbare Fläche pro Tag ($\text{ha} * \text{d}^{-1}$) und dafür notwendige Arbeitszeit (h) für die untersuchten Varianten	119
Tabelle 3-53: Gesamtenergiebedarf GEP der Pferdevarianten unter Einschluss des Erhaltungsenergiebedarfs EEP der Nicht-Arbeitszeit bei maximal pro Tag zu bearbeitender Fläche.....	120
Tabelle 3-54: Gesamtenergiebedarf GEP der Pferde- und der Schleppvarianten unter Einschluss des Erhaltungsenergiebedarfs EEP der Pferde für die Nicht-Arbeitszeit ($\text{MJ} * \text{ha}^{-1}$).....	120
Tabelle 3-55: Gesamt-Methan (CH_4)- und Gesamt-Stickstoff (N)-Emissionen der Pferde- und der Schleppvarianten unter Einschluss der CH_4 - und N-Emissionen der Pferde während der Nicht-Arbeitszeit ($\text{g} * \text{ha}^{-1}$).....	122
Tabelle 3-56: Radius der Lastfläche (r) sowie Kontaktflächendruck an der Bodenoberfläche (δ_0) der in den Versuchen eingesetzten Pferde und des Schleppers	125
Tabelle 3-57: Parameter einer Parabraunerde aus Löß.....	125
Tabelle 3-58: Quotient aus Vorbelastung (P_v) des jeweiligen Horizontes und dem Druck an seiner Oberfläche (δ_0).....	127
Tabelle 3-59: Zunahme der Herzfrequenz von Ruhefrequenz zu mittlerer Herzfrequenz (%)	130
Tabelle 3-60: Ruheatemfrequenz (min^{-1}).....	131
Tabelle 3-61: Körpertemperatur vor Parzellenbeginn ($^{\circ}\text{C}$)	132
Tabelle 4-1: Standort und Zeitpunkt der Flächenversuche, eingesetzte Mähtechnik und Pferde.....	136
Tabelle 4-2: Bei den Flächenversuchen erfasste Parameter	139
Tabelle 4-3: Durchschnittlicher Zugkraftbedarf für die Teilarbeiten Lastfahrt und die Gesamtheit aus den Teilarbeiten Lastfahrt und Wenden ohne Berücksichtigung der Teilarbeiten Pause und Störung (N)	142
Tabelle 4-4: Maximaler Zugkraftbedarf für die Teilarbeit Lastfahrt und die Gesamtheit aus den Teilarbeiten Lastfahrt und Wenden (N).....	143
Tabelle 4-5: Durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit für die Teilarbeit Lastfahrt und die Gesamtheit aus den Teilarbeiten Lastfahrt und Wenden ohne Berücksichtigung der Teilarbeiten Pause und Störung ($\text{km} * \text{h}^{-1}$)	144
Tabelle 4-6: Flächenleistungen anhand der Gesamtarbeitszeit sowie unter Ausschluss der Teilarbeitszeiten Pause und Störung ($\text{ha} * \text{h}^{-1}$)	146
Tabelle 4-7: Arbeitszeit und Teilarbeitszeiten.....	148
Tabelle 4-8: Herzfrequenzen (HF) (min^{-1}) vor Versuchsbeginn, durchschnittliche und maximale Herzfrequenzen	150
Tabelle 4-9: Arbeitsgeschwindigkeit, Flächenleistung und Anteile Teilarbeitszeiten	152

Tabelle 5-1: Durchschnittlicher (N_{\emptyset}) und maximaler (N_{\max}) Zugkraftbedarf [N] im Parzellenversuch und in den Flächenversuchen	156
Tabelle 5-2: Arbeitsgeschwindigkeit ($\text{km} * \text{h}^{-1}$), Flächenleistung ($\text{ha} * \text{h}^{-1}$) und Anteile Teilarbeitszeiten (%) im Parzellenversuch und in den Flächenversuchen.....	157
Tabelle 5-3: Flächenleistungen für Variante 6 (Doppelmesser-Mähwerk mit 1,90 m Arbeitsbreite am Vorderwagen, motorgetriebene Zapfwelle) aus den Flächenversuchen.....	158
Tabelle 5-4: Maximale Flächenleistungen in Abhängigkeit von der Parzellengröße für ein Doppelmessermähwerk mit 1,90 m Arbeitsbreite im Heckanbau an einem Allradtraktor.....	159
Tabelle 5-5: Mittlere (\emptyset HF) und maximale Herzfrequenz (max. HF) der Varianten 6 und 7 im Parzellenversuch und in den Flächenversuchen	160
Tabelle A-1: Entwicklung des Pferdebestandes in Deutschland	200
Tabelle A-2: Endgültige statistische Modelle zur Beschreibung der Ergebnisse der untersuchten Parameter, getrennt für die beiden Versuchsjahre	200
Tabelle A-3: Endgültige statistische Modelle zur Beschreibung der Ergebnisse der untersuchten Parameter über beide Versuchsjahre hinweg.....	202
Tabelle A-4: Werte für die mittlere Steigung, Versuchsfläche „Obere Kiebitzbreite 2“	204
Tabelle A-5: Werte für die mittlere Steigung, Versuchsfläche „Auf dem Brand“	205
Tabelle A-6: Ergebnisse der 50 m-Rasterkartierung Boden, Obere Kiebitzbreite 2	206
Tabelle A-7: Ergebnisse der 50 m-Rasterkartierung Boden, Auf dem Brand	207
Tabelle A-8: Witterung zum Versuchszeitpunkt.....	208
Tabelle A-9: Hufflächen der im Versuch eingesetzten Pferde (cm^2)	208

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Versuchsanlage 2000, Anordnung und Abmessung der Blöcke (B1-B4).....	45
Abbildung 3-2: Versuchsanlage 2000, Lage der Varianten innerhalb der Blöcke (B1-B4).....	45
Abbildung 3-3: Versuchsanlage 2001, Anordnung und Abmessung der Blöcke (B1-B4).....	46
Abbildung 3-4: Versuchsanlage 2001, Lage der Varianten innerhalb der Blöcke (B1-B4).....	46
Abbildung 3-5: Ermittlung der mittleren Steigung der Versuchsparzellen am Beispiel der Parzelle 1 auf der Versuchsfläche „Auf dem Brand“.....	47
Abbildung 3-6: Rasterpunkte der Bodenkartierung innerhalb der Versuchsfläche auf der Kiebitzbreite (links) und Auf dem Brand (rechts).....	49
Abbildung 3-7: Ackerzahlen der Reichsbodenschätzung für die Versuchsflächen „Obere Kiebitzbreite 2“ (links) und „Auf dem Brand“ (rechts).....	50
Abbildung 3-8: Durchschnittlicher Zugkraftbedarf (N); Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert) .	68
Abbildung 3-9: Durchschnittlicher Zugkraftbedarf pro Meter Arbeitsbreite (relativer Zugkraftbedarf) (Nm ⁻¹); Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert).....	69
Abbildung 3-10: Maximaler Zugkraftbedarf (N), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert).....	70
Abbildung 3-11: Arbeitsgeschwindigkeit (km * h ⁻¹), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert).....	71
Abbildung 3-12: Arbeitsleistung der Pferde (kW), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert).....	72
Abbildung 3-13: Tatsächliche Arbeitsbreite (cm), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert).....	73
Abbildung 3-14: Relative Arbeitsbreite (%), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert).....	74
Abbildung 3-15: Arbeitszeit pro Parzelle (sec.), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert).....	76
Abbildung 3-16: Anteil Lastfahrt (%), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert).....	77
Abbildung 3-17: Anteil Wendezeit (%), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert).....	78
Abbildung 3-18: Anteil Störungen (%), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert).....	79
Abbildung 3-19: Flächenleistung (ha * h ⁻¹), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert).....	80
Abbildung 3-20: Treibstoffverbrauch pro Parzelle (l * Parzelle ⁻¹), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert).....	81
Abbildung 3-21: Treibstoffverbrauch pro Hektar (l * ha ⁻¹), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)	82
Abbildung 3-22: Gesamtenergiebedarf pro Hektar (MJ * ha ⁻¹), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)	86
Abbildung 3-23: Anzahl Schritte der Pferde ja Parzelle (n), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)	90
Abbildung 3-24: Bodenbelastung (%-Anteil der betretenen und überrollten Fläche an der bearbeiteten Fläche), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert).....	92
Abbildung 3-25: Mittlere Herzfrequenz (min ⁻¹), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert).....	94
Abbildung 3-26: Maximale Herzfrequenz (min ⁻¹), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert).....	95
Abbildung 3-27: Veränderung der Atemfrequenz (min ⁻¹), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)	97
Abbildung 3-28: Veränderung der Körpertemperatur (°C), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)	99
Abbildung 3-29: Veränderung Schwitzen, Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert).....	100
Abbildung 3-30: Messkurve einer Zugkraftmessung.....	106
Abbildung 3-31: Berechnetes Druckfortpflanzungsverhalten für Schlepper und Pferd in einer Parabraunerde aus Löß (kPa).....	126
Abbildung 4-1: Lage des Pferdehofs Weltin in Singen-Überlingen am Ried sowie der Versuchsflächen im Radolfzeller Aachried.....	137

Abbildung 4-2: Lage der Versuchsflächen der Flächenversuche („Totenhof“, „Hasenloch c und d“, „Unter der Straße“) sowie des Parzellenversuchs („Obere Kiebitzbreite“, „Auf dem Brand“) auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen.....	138
Abbildung 4-3: Lage der Versuchsflächen auf dem Biolandbetrieb Hasenbreite, Lemgo	139
Abbildung A-1: Grasmäher GM 20 (Hersteller: Bautz); Ardenner-Pferde „Piroux“ (Grauschimmel, Handpferd) und „Alphonse“ (Rotschimmel, Sattelpferd) im Amerikanischen Arbeitsgeschirr	190
Abbildung A-2: Vorderwagen „Pintow Power Cart“ (Hersteller: Carthorse Machinery, GB) mit Doppelmesser-Mähwerk (Hier: 2,40 m Arbeitsbreite).....	190
Abbildung A-3: Systematik der verschiedenen Vorderwagen	191
Abbildung A-4: Basis-Vorderwagen (Hersteller: Pioneer, USA)	191
Abbildung A-5: Vorderwagen „Pintow Big Team“ (Hersteller: Carthorse Machinery, GB).....	192
Abbildung A-6: Vorderwagen „Pintow Triple System“ (Hersteller: Carthorse Machinery, GB).....	192
Abbildung A-7: Vorderwagen „Pintow Power Cart“ (Hersteller: Carthorse Machinery, GB) mit angehängter Hochdruckpresse AP 41 (Hersteller: Welger).....	193
Abbildung A-8: Vorderwagen „HISKO“ mit angehängtem Doppelmesser-Mähwerk; (Hersteller: Kurt Ohrndorf, D).....	193
Abbildung A-9: Vorderwagen mit angehängter Mittelkanal-Hochdruckpresse und Ballensammelwagen.	194
Abbildung A-10: Vorderwagen mit angehängter Rundballenpresse	194
Abbildung A-11: Geräteträger „Univecus“ (Hersteller: Burkhalter, CH)	195
Abbildung A-12: Verschiedene moderne Geräte des Herstellers Equi-Idea, Italien	195
Abbildung A-13: Hydraulischer Rundballenlader „Charlie“ (Hersteller: Equi-Idea, I)	196
Abbildung A-14: Gallischer Mähkarren.....	196
Abbildung A-15: Rheinisch-Deutsches Kaltblut.....	197
Abbildung A-16: Süddeutsches Kaltblut.....	197
Abbildung A-17: Schwarzwälder Kaltblut	198
Abbildung A-18: Schleswiger Kaltblut	198
Abbildung A-19: Oldenburger Hengst "Gouverneur", geb. 1925 (von Goeben-Gido).....	199
Abbildung A-20: Herzfrequenzmesskurven der Wallache „Dolex“ (oben) und „Max“ (unten) in Versuch Nr. 10 (1,90 m-Mähwerk mit Bodenantrieb), 19.10.2000.....	199

Abkürzungsverzeichnis

≤	kleiner/gleich
a	Annum = Jahr
A	Arbeitsaufwand [kWh * ha ⁻¹]
AB	Arbeitsbreite
Abb.	Abbildung
AG	Aktiengesellschaft
Anm.	Anmerkung
Anm. d. Autors	Anmerkung des Autors
B	Bodenantrieb der Zapfwelle
B	Block in Versuchsanlage
bzw.	beziehungsweise
°C	Grad Celsius
ca.	circa
CH ₄	Methan
cm	Zentimeter
cm ²	Quadratcentimeter
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
D	Bundesrepublik Deutschland
d	Tag
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DE	digestable energy (verdauliche Energie)
DIN	Deutsche Industrie-Norm
EEP _[MJ DE * ha⁻¹]	Erhaltungsenergiebedarf der Pferde in Megajoule verdauliche Energie pro Hektar
ebd.	Ebenda
Eges _[MJ * ha⁻¹]	Gesamtenergiebedarf der Variante in Megajoule pro Hektar
EM	Energieverbrauch des Aufbaumotors auf dem Vorderwagen bzw. des Schlepper- motors [MJ]
et al.	et alii = und andere
etc.	et cetera = und so weiter
EU	Europäische Union
e.V.	eingetragener Verein
G	Geschwindigkeit [km * h ⁻¹]
g	Gramm
GB	Großbritannien
geb.	geboren
GEP _[MJ DE * ha⁻¹]	Gesamtenergiebedarf der Pferde in Megajoule verdauliche Energie pro Hektar
GIS	Geographisches Informationssystem
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GPS	Global Positioning System; Navigationsgerät
h	Stunde
h ⁻¹	pro Stunde

ha	Hektar
ha * h ⁻¹	Hektar pro Stunde
HC	Kohlenwasserstoff
HF	Herzfrequenz [min ⁻¹]
HISKO	Heckseifer Ideenschmiede Kurt Ohrndorf
Hz	Hertz [sec. ⁻¹]
i.d.R.	in der Regel
inkl.	inklusive
J	Joule
Jhd.	Jahrhundert
kcal.	Kilokalorie
kg	Kilogramm
km * h ⁻¹	Kilometer pro Stunde
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
L	Arbeitsleistung [kW]
l	Liter
l * ha ⁻¹	Liter pro Hektar
l * Parzelle ⁻¹	Liter pro Parzelle
lbs.	Pounds; 1lb. = 0,45359 kg
LF	landwirtschaftlich genutzte Fläche
lfd.	laufend
LPO	Leistungs-Prüfungs-Ordnung
LS Means	Least Squares Means
Ltd.	Limited
M	Motorantrieb der Zapfwelle
m	Meter
m ²	Quadratmeter
max.	maximal
MB	Mega Byte
ME	metabolisable energy (umsetzbare Energie)
min.	minimal
min ⁻¹	pro Minute
MJ	Megajoule
MJ * ha ⁻¹	Megajoule pro Hektar
n	Anzahl
N (als Element)	Stickstoff
N (als Einheit)	Newton
n. Chr.	nach Christus
NE	net energy (Netto-Energie)
N ₂ O	Distickstoffmonoxid = Lachgas
Nm	Newtonmeter
Nm ⁻¹	Newton pro Meter Arbeitsbreite

NN	Normal Null
NO _x	Stickoxide
Ø	durchschnittlich
o.	oder
o.g.	oben genannte(r)
o.J.	ohne Jahresangabe
o.O.	ohne Ortsangabe
PC	Power Cart
PS	Pferdestärke; 1 PS = 1,36 kW
PSh	PS-Stunde
resp.	respektive
S	Schlepper
S.	Seite
s.a.	siehe auch
sec.	Sekunde
s.o.	siehe oben
s.u.	siehe unten
St.	Saint
t (Gewichtseinheit)	Tonne; 1 t = 1000 kg
t (Parameter)	Zeit
Tab.	Tabelle
u.	und
ü.	über
u.a.	unter anderem, und andere
u.ä.	und ähnliche
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
usw.	und so weiter
u.U.	unter Umständen
V (als Einheit)	Volt
V	Variante
v.	von
v. Chr.	vor Christus
vgl.	vergleiche
Z	Zugkraftbedarf [N]
z.B.	zum Beispiel
ZEE _[MJ DE * ha⁻¹]	Zusatzenergiebedarf der Pferde in Megajoule verdauliche Energie pro Hektar
z.T.	zum Teil
Zw	Zwillingsräder auf der Hinterachse des Vorderwagens

„What system of logic makes it plausible to pull modern machinery with horses? “

(Gemäß welchem logischen System ist es plausibel, moderne Maschinen mit Pferden zu ziehen?)

(KRAYBILL 2001, S. 1)

1. Einleitung und Problemstellung - Arbeitspferde in der Landwirtschaft heute

In der heutigen Zeit eine wissenschaftliche Untersuchung über Arbeitspferde in der hiesigen Landwirtschaft durchzuführen, dürfte den meisten Menschen mehr als anachronistisch erscheinen. Das auf die landwirtschaftliche Praxis der *Amish People* in den USA bezogene obige Zitat des amerikanischen Soziologieprofessors *Donald B. Kraybill* fasst in Worte, was wohl den meisten Menschen beim Anblick moderner pferdegezogener Landmaschinen durch den Kopf geht (vgl. Abbildung A-1 bis Abbildung A-13 im Anhang). Die Zeit der Arbeitspferde in der Landwirtschaft schien doch endgültig vorbei zu sein. Die Erkenntnis, dass der Einsatz von Arbeitspferden hier wie auch in anderen Bereichen eine ernst zu nehmende Option für die Zukunft ist, setzt sich nur sehr langsam durch.

Wie aus Kapitel 2 hervorgeht, stünde die Landwirtschaft ohne die Arbeitspferde und andere Zugtiere heute nicht dort, wo sie steht. Die gesamte Menschheitsgeschichte wäre anders verlaufen, hätte der Mensch nicht gelernt, das Pferd für seine Zwecke zu nutzen. In weltweitem Kontext gesehen, haben Zugtiere in der Landwirtschaft auch heute noch große Bedeutung. Ungeachtet dessen wurden die Arbeitspferde in den so genannten „entwickelten“ Ländern Mitte des 20. Jahrhunderts innerhalb weniger Jahre nahezu vollständig vom Schlepper aus der Landwirtschaft verdrängt.

Seit etwa 1990 ist jedoch teilweise eine gegenläufige Entwicklung zu beobachten: der Einsatz von Arbeitspferden in der Landwirtschaft nimmt wieder zu. Dass diese Zunahme in Westeuropa – im Gegensatz z.B. zum landwirtschaftlichen „Hightech-Land“ USA - bisher nur sehr langsam vonstattengeht, dürfte vor allem am mangelnden Wissen um die bereits existierenden Kombinationsmöglichkeiten von Arbeitspferden mit moderner Gerätetechnik sowie deren ökologischer und ökonomischer „Performance“ liegen.

Klar ist bereits heute, dass der Einsatz von Arbeitspferden zumindest in ökologischer Hinsicht eine realistische Alternative darstellt (vgl. Kapitel 2.2.3). Alle bereits vorhandenen Erkenntnisse belegen eindeutig die ökologische Überlegenheit der Pferde gegenüber dem Schlepper. Gleichzeitig gibt es aber noch viele offene Fragen hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten moderner Pferdetechnik sowie vor allem auch der damit verbundenen Arbeitswirtschaft und Ökonomie.

Gerade die Frage nach der Wirtschaftlichkeit des Arbeitspferdeeinsatzes heute ist bisher erst in Ansätzen untersucht. Die Praxis der Pferde einsetzenden Betriebe beweist, dass Landwirtschaft mit Arbeitspferden auch unter derzeitigen ökonomischen Rahmenbedingungen offensichtlich möglich ist. Warum und wie dieses funktioniert, und wie es vielleicht noch besser funktionieren könnte, dazu fehlt bis heute allerdings jegliches „Lehrbuchwissen“. Die Kenntnis der Existenz moderner pferdegezogener Technik zu mehren sowie das Wissen über die Funktionalität, die ökologischen und die ökonomischen Rahmenbedingungen und Folgen ihres Einsatzes umfassend zu erforschen, sind daher wesentliche Voraussetzungen zur Ausweitung des Arbeitspferdeeinsatzes - und damit zur Nutzung seines Potenzials für eine nachhaltige Entwicklung, nicht nur in der Landwirtschaft.

In dieser Arbeit werden am Beispiel der Mahd im Grünland in einem Parzellenversuch auf dem Versuchsbetrieb für Ökologischen Landbau der Universität Kassel, der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen in Grebenstein, Hessen, verschiedene pferde- und schleppergestützte Varianten hinsichtlich ihrer Anforderungen und Leistungen untersucht (Kapitel 3). Dabei werden auch Fragen zur Arbeitswirtschaft sowie zum Energieverbrauch und zur Bodenbelastung (potentielle Bodenverdichtung) vergleichend betrachtet. Diese Versuche werden ergänzt durch entsprechende Untersuchungen pferdegezogener Mähtechnik auf verschiedenen Praxisbetrieben (Kapitel 4).

Die Ergebnisse dieser Untersuchung ermöglichen erste Rückschlüsse auf das Potenzial dieser Form der Landbewirtschaftung und bilden eine Grundlage für die Erörterung der Frage, in wie weit der moderne Arbeitspferdeeinsatz eine Option für die zukünftige Entwicklung des Ökologischen Landbaus und der gesamten Landwirtschaft darstellt. Allerdings ist diese Untersuchung erst ein bescheidener Anfang. Es bleiben noch viele offene Fragen, derer sich die landwirtschaftliche Forschung dringend annehmen sollte.

2. Literaturübersicht

„Unlike the conditions at the beginning of this century,
those interested in working horses today do it by choice ... and for valid reasons.“

(Im Gegensatz zur Situation zu Beginn dieses Jahrhunderts interessieren sich diejenigen, die heute mit Pferden arbeiten möchten, aus freien Stücken dafür ... und aus guten Gründen.)

(MILLER 1994, S. 7)

2.1 Die Entwicklung des Einsatzes von Arbeitspferden in der deutschen Landwirtschaft

2.1.1 Vom Wildtier zum Arbeitstier – Abstammung und Domestikation des Pferdes

Über die Abstammung der heutigen Pferderassen und damit auch der verschiedenen Kaltblutpferderassen, die heute als Synonym für den Begriff „Arbeitspferd“ gelten können, gab und gibt es seit dem 19. Jahrhundert unterschiedliche wissenschaftliche Theorien. Lange Zeit galt das Przewalski-Pferd als Vorfahre der rezenten Hauspferderassen, und zahlreiche Bücher vertreten diese Theorie bis heute, obwohl sie zumindest umstritten ist (z.B. HERRE & RÖHRS 1990). Während alle heutigen Hauspferderassen 64 Chromosomen besitzen, verfügt das Przewalski-Pferd über 66 Chromosomen (z.B. LAU et al. 2009). Analysen der Genome von Przewalski- und Hauspferden legen nahe, dass das Przewalski-Pferd keine Stammform des modernen Hauspferdes ist (ISHIDA et al. 1995, JANSEN et al. 2002). Es scheint eher eine frühe Abspaltung vom Entwicklungspfad des Pferdes denn eine Ursprungsart der heutigen Pferderassen zu sein (NISSEN 1997).

Die durch archäologische Befunde gestützte und heute als wahrscheinlichste Theorie geltende ist, dass alle rezenten Hauspferderassen von einer Ursprungsart abstammen, dem *Equus ferus* BODDAERT, 1785, von dem aus dem gesamten eurasischen Raum Reste aus jungpaläolithischen Horizonten gefunden wurden, die sich anhand ihrer Verbreitung in drei Unterarten unterscheiden lassen, nämlich *E. f. gmelini* (Tarpan), *E. f. przewalskii* (Przewalski-Pferd) sowie *E. f. solutreensis* (Solutré-Pferd) (BENECKE 1994, NOBIS 2000, SCHARNHÖLZ 2002). Über die genaue Verwandtschaft der unterschiedlichen Equiden-Untergattungen und Unterarten untereinander sowie über die Entwicklung der so genannten „echten Pferde“ und somit die genaue Herkunft der rezenten Hauspferderassen herrscht nach wie vor Unklarheit (NISSEN 1997).

Vor allem die Völkerwanderungszeit (375 bis 568 n. Chr.) und nachfolgende Eroberungsfeldzüge, ebenso wie Handelsbeziehungen zwischen geographisch getrennten Gebieten, führten schließlich über die Jahrhunderte zu einem regen genetischen Austausch zwischen den verschiedenen Pferdetypen. So entstanden die unterschiedlichsten lokalen und regionalen Landpferdeschläge, die vor allem durch die jeweiligen Standortbedingungen Klima, Topographie und natürliches Futterangebot geprägt wurden (PAPAVASSILIOU 1988, SCHARNHÖLZ 2002).

Nicht nur hinsichtlich der Ursprungsform(en) der heutigen Hauspferderassen, sondern auch in Bezug auf die Domestikation, die Haustierwerdung des Pferdes, gibt es noch viele offene Fragen. Sicher ist, dass verschiedene Wildpferdpopulationen in verschiedenen Gebieten der Erde am Domestikationsgeschehen des Pferdes beteiligt waren (JANSEN et al. 2002, MCGAHERN et al. 2006, PFLUGRADT 2007). Zu diesen Gebieten gehören zum einen die Steppen der heutigen südlichen Ukraine und Südrusslands, das so genannte „Westzentrum“, in dem die Unterart *Equus ferus gmelini*, der Tarpan, verbreitet war, sowie andererseits das Gebiet des heutigen nördlichen Kasachstans, das so genannte „Ostzentrum“, mit dem *Equus ferus przewalskii*. In beiden Gebieten finden sich Belege, dass bereits im 4. Jahrtausend v. Chr. Pferde als Haustiere gehalten wurden. Darüber hinaus ist es sehr wahrscheinlich, dass auch die dritte Unterart, *Equus ferus solutreensis*, in West- und Zentraleuropa domestiziert wurde (NOBIS 2000, SCHARNHÖLZ 2002).

Über die Motivation zur Domestikation und die ersten Formen der Nutzung des Pferdes gehen die Meinungen auseinander. Einig sind sich die meisten Autoren, dass die ersten Pferde, wie andere Tierarten auch, zu Nahrungszwecken domestiziert wurden (z.B. HERRE & RÖHRS 1990). BASCHE (o.J.) vermutet zusätzlich kultisch-religiöse Gründe, da durch die Haustierwerdung das Opfertier ständig verfügbar wurde und Ort und Zeitpunkt von Opfertagen nun vom Menschen bestimmt werden konnten.

Neben der Nutzung und der Opferung von Fleisch, Fell und Milch lassen Trensenfunde aus der zweiten Hälfte des 4. und dem Beginn des 3. Jahrtausends v. Chr. aus einer kupferzeitlichen Siedlung am mittleren Dnjepr auf eine sehr frühe Nutzung des Pferdes als Arbeitstier schließen (NOBIS 2000). BUHLE (1929a) erwähnt, dass es in Europa bereits 5300 v. Chr. gezähmte Pferde gegeben habe und dass in der Gegend von Halberstadt im heutigen Sachsen-Anhalt knöcherne Gebisse aus der Zeit um 3000 v. Chr. gefunden worden seien.

Prinzipiell sind drei Formen von Arbeit denkbar, nämlich die Nutzung des Pferdes als Trag-, Zug- und Reittier. Da sich eine Pferdeherde nur vom Rücken eines Pferdes aus lenken ließ, dürfte das Reiten sehr früh entwickelt worden sein. Aber auch die Trag- und Zugarbeit dürfte sich sehr bald entwickelt haben, da Transportweisen und –geräte hierfür bereits für andere Tierarten entwickelt waren und lediglich auf das Pferd übertragen werden mussten (BASCHE o.J., HERRE & RÖHRS 1990). Die zeitlichen Angaben über den Beginn der verschiedenen Nutzungen variieren aber je nach Verbreitungsgebiet und Kultur. Sicher ist, dass das Pferd als Kampfmittel ab dem 2. Jahrtausend v. Chr. im alten Orient eingesetzt wurde. Dort wurden Pferde bereits zwischen 1900 und 1700 v. Chr. vor dem Kampfwagen eingesetzt, während sich das Reiten dort erst ab etwa 1200 v. Chr. einbürgerte (NOBIS 2000).

2.1.2 Die Entstehung der deutschen Arbeitspferderassen

Die in Deutschland vorrangig zur Arbeit eingesetzten Pferde waren und sind immer noch die Kaltblutrassen sowie das Schwere Warmblut. Daneben wurden und werden aber auch Warmblüter, wie z.B. der Trakehner, und verschiedene Ponyrassen wie z.B. Haflinger, Fjordpferd oder Shetlandpony zur Arbeit in der Landwirtschaft genutzt (SOMMERFELD & GRUSCHINSKI 1952, PAPENDIECK 1958, SCHARNHÖLZ 2007). Heute scheinen Warmblüter und Ponyrassen, auf die in der vorliegenden Arbeit nicht weiter eingegangen wird, einen steigenden Anteil an den in der Landwirtschaft genutzten Arbeitspferden einzunehmen (HEROLD 2007).

Die Begriffe „Warmblut“ bzw. „Kaltblut“ stammen nach NATHUSIUS angeblich aus Amerika (BUHLE 1929a) und haben nichts mit der Körper- oder Bluttemperatur zu tun - auch wenn dies in der Literatur hin und wieder fälschlicher Weise behauptet wird (ebd.) - sondern bezeichnen das vorherrschende Temperament dieser Pferde. Über die Entstehung der Kaltblutrassen gab und gibt es unterschiedliche Aussagen. Dass sie auf eine eigene Stammform, ein großes und schweres Eiszeitpferd Westeuropas, den so genannten „Urkaltblüter“, zurückzuführen seien, wie es auch heute noch von verschiedenen Autoren angenommen wird (u.a. WILLRICH 1999), ist

nach paläontologischen Befunden nicht zulässig, da ein solches Pferd zum Ende der letzten Eiszeit, also vor Beginn der Domestikation des Pferdes, bereits ausgestorben war (NOBIS 2000).

Als relativ sicher kann heute gelten, dass Pferde aus Friesland und Flandern nahezu alle rezenten europäischen und nordamerikanischen Kaltblutrassen beeinflusst haben (z.B. BELGIAN DRAFT HORSE CORPORATION OF AMERICA o.J., BUHLE 1929a, BROWN 1991, NISSEN 1997). Etwa ab dem 12. Jhd. begann die Zucht immer schwererer Pferdetypen als Schlachtrösser für die Ritter, wobei das bereits im 6. Jhd. zum ersten Mal in der geschichtlichen Überlieferung erscheinende Flämische Pferd zum meist gesuchten Ritterpferd Europas wurde. Diese Pferde hatten allerdings noch wenig gemein mit den heutigen Kaltblütern, waren deutlich kleiner und leichter und entsprachen im Habitus eher dem heutigen Norweger oder Haflinger im Arbeitstyp (SCHARNHÖLZ 2002). Während der Kreuzzüge verbreitete sich dieser Pferdetyt dann über ganz Europa und legte so den Grundstein für zahlreiche schwere Pferderassen bzw. -schläge (NISSEN 1997). Schwerpunkte der noch recht unregelmäßigen Zucht dieser relativ schweren Pferde fanden sich vor allem entlang der Nordseeküste von Jütland bis nach Flandern sowie in eigens dafür eingerichteten Gestüten des Adels (NISSEN 1997). So gab es bereits im ausgehenden Mittelalter in den küstennahen Regionen von Nordfrankreich, Belgien, Holland und Dänemark relativ schwere Pferde, auch deshalb, weil dort - ebenso wie in England - die Landwirtschaft aufgrund der schweren, fruchtbaren Böden bereits sehr früh weiter entwickelt war als im übrigen Europa. Neben diesen Schlägen oder Rassen aus den küstennahen Regionen haben sich ebensolche im Alpenraum gebildet, beispielsweise die bereits den Römern bekannten Vorfahren des heutigen Norikers.

Die oft zitierte Meinung, die heutigen Kaltblüter seien direkte Nachfahren der Ritterpferde des Mittelalters, widerlegt u.a. SCHARNHÖLZ (2002): Der Bedarf an Kaltblutpferden im heutigen Sinne entstand erst um die Wende vom 18. zum 19. Jhd.; die Zeit der schweren gepanzerten Ritter ging aber mit der Erfindung des Schießpulvers im 13. Jhd. bzw. spätestens mit der Verbreitung von Feuerwaffen im 15. Jhd. zu Ende, gegen die die Ritterrüstung keinen Schutz mehr darstellte. Anhand von Knochenfunden und auch von Abbildungen aus dem Mittelalter ist erkennbar, dass die Pferde im frühen Mittelalter in Größe und Aussehen eher den heutigen Kleinpferden wie Isländer und Norweger entsprachen. Später dann, im ausgehenden Hochmittelalter, ähneln die Schlachtrösser der Ritter allerdings bereits dem Typ des heutigen leichten Kaltblüters (WAIDMANN 1995, SCHARNHÖLZ 2002). Bereits aus dem 16. Jhd. gibt es jedoch Belege dafür, dass die einstigen schweren Ritterpferde kaum noch zu finden waren und weitgehend durch die seit Kaiser Friedrich II. (1194-1250) praktizierte Hereinnahme von orientalischen und iberischen Pferden in die Zucht durch leichte, wendige Pferde ersetzt worden waren (NISSEN 1997). Auch BUHLE (1929a, S. 172) hält es für erwiesen, dass mit dem Ende der Ritterzeit die Pferde wieder leichter wurden, und erwähnt, dass „... bis in die Zeiten Friedrich des Großen [1712-1786; Anm. d. Autors] ... kein geeignetes Kaltblutpferd vorhanden gewesen ist.“

SCHARNHÖLZ (2002) weist auf den Zusammenhang zwischen der Verwendung der Egge und der Entstehung des heutigen Kaltblutpferdes hin. Die Egge funktioniert aufgrund der benötigten Arbeitsgeschwindigkeit nur hinter dem Pferd, nicht aber hinter dem Rind. Die um die Wende vom Mittelalter zur Neuzeit verbreitete parallele Haltung von Zugrindern bzw. -ochsen für die schweren Arbeiten wie das Pflügen und von Pferden für die leichteren Arbeiten und die Transporte im selben landwirtschaftlichen Betrieb war auf Dauer ökonomisch nicht durchzuhalten. Da die Zugkraft des Pferdes mit der Einführung des Kumtes zunehmend besser ausgenutzt werden konnte und zudem der verbesserte Zustand von Straßen und Wegen schnellere Transporte möglich machte, wurde in vielen Regionen Europas schließlich nur noch das Pferd als Zugtier in der Landwirtschaft genutzt. In anderen Regionen blieb jedoch das Rind die tragende Arbeitskraft, und zwar dort, wo die Egge *nicht* bekannt war. Dort wo die Egge und das Pferd benutzt wurden, gab es für die schwere Pflugarbeit zwei Möglichkeiten: entweder die Verwendung mehrerer Pferde in Vielfachanspannung oder aber die Zucht massigerer und schwererer Pferde. Letzteres erwies sich auf Dauer als der ökonomischere Weg und führte

schließlich zur Entstehung des Kaltblutpferdes. SCHARNHÖLZ (2002, S. 32) kommt zu dem Schluss: „Die Theorie, wonach die Egge die Entstehung des schweren Arbeitspferdes, des Kaltblüters wesentlich gefördert hat, ist bestechend und besitzt einen hohen Wahrscheinlichkeitsgrad.“

So wurden die rezenten Kaltblutrassen schließlich im Laufe des 18. und 19. Jahrhunderts von Bauern aus England, Frankreich, Belgien, Holland, Dänemark und Österreich aus den jeweiligen regionalen Pferdeschlägen erzüchtet, wobei die geregelte Kaltblutzucht im heutigen Sinne erst am Ende des 19. Jahrhunderts einsetzte (SCHARNHÖLZ 2002). Vom Beginn der landwirtschaftlichen Revolution im 19. Jhd. bis zur Zeit des 2. Weltkrieges war das Belgische Kaltblut in Europa die bedeutendste und zahlenmäßig umfangreichste Arbeitspferderasse (NISSEN 1997).

Deutschland spielte aufgrund der politischen Verhältnisse (starke Aufsplitterung in Kleinstaaten bis weit in das 19. Jhd. hinein) keine entscheidende Rolle bei der Schaffung der europäischen Kaltblutrassen (SCHARNHÖLZ 2002). Je nach Region unterschiedlich wurden hier zunächst sowohl englische (Shire, Clydesdale, Suffolk Punch) als auch französische Rassen (Percheron) eingeführt, ehe sich schließlich das Belgische Kaltblut nahezu überall durchsetzte. Gründe für diesen Triumph waren vor allem die größere Futterdankbarkeit der belgischen Pferde sowie der weitaus geringere Behang an den Beinen gegenüber dem Shire Horse und dem Clydesdale, was vor allem auf schweren Böden ein großer Vorteil war (NISSEN 1997). Aus dem Belgischen Kaltblut wurde in Deutschland das Rheinisch-Deutsche Kaltblut gezüchtet, die dort schließlich am weitesten verbreitete und häufigste Rasse (LAVALARD 1894, MEYER 1940, HANGEN 1989, SCHARNHÖLZ 2002).

Das Rheinisch-Deutsche Kaltblut

Vom Ende des 1. bis in die Zeit nach dem 2. Weltkrieg machte das Rheinisch-Deutsche Kaltblut (s. Abbildung A-15 im Anhang) etwa 50% des gesamten Pferdebestandes des Deutschen Reiches aus. Es war das *'Zugpferd par Excellence'*, sowohl in der Landwirtschaft, als auch in der Industrie (NISSEN 1997, SCHARNHÖLZ 2002). Entstanden ist diese Rasse aus dem Belgischen Kaltblutpferd, das sich bereits im 19. Jhd. großer Beliebtheit erfreute. So erwähnt z.B. bereits LAVALARD (1894), dass Ende des 19. Jhds. in der damaligen deutschen Provinz Rheinpreussen 70 % bis 80 % aller Kaltblutstuten der belgischen Rasse angehören.

Ab 1875 hatte man begonnen, im Rheinland belgische Hengste zur Zucht eines schweren Zugpferdes für Landwirtschaft und Gewerbe einzusetzen. Neben der räumlichen Nähe und der klimatischen Vergleichbarkeit der beiden Gebiete war einer der Gründe für die Wahl des belgischen Kaltblutes, dass diese Pferde bereits Mitte des 19. Jhds. die für die schweren Arbeiten in der Landwirtschaft und in der Industrie benötigte Qualität besaßen, was man von den übrigen Rassen, mit denen auch im Rheinland experimentiert wurde (Clydesdale, Suffolk Punch, Percheron, Ardenner, Noriker), nicht behaupten konnte. 1892 wurde das Rheinische Pferdestammbuch gegründet und nach dem 1. Weltkrieg erfolgte die Umbenennung der Rasse in „Rheinisch-Deutsches Kaltblut“ (SCHARNHÖLZ 2002).

Nach und nach breitete sich das Rheinisch-Deutsche Kaltblut im gesamten Deutschen Reich (und nicht nur dort) aus und verdrängte die übrigen Rassen weitgehend. Ausnahme hiervon waren lediglich Bayern und das heutige Baden-Württemberg, wo das Süddeutsche Kaltblut überwog. MEYER (1940) vermittelt für das Jahr 1938 einen Eindruck von der Vorherrschaft des Rheinisch Deutschen Kaltblutes: von den 2.075.000 Kaltblutpferden waren 1.705.000, also 82 %, Rheinisch-Deutsche Kaltblüter. Da die Kaltblutpferde 60 % des Gesamtpferdebestandes (3.442.741 Pferde insgesamt; ebd.) ausmachten, heißt das, dass jedes zweite Pferd (49,5 %) im Deutschen Reich ein Rheinisch-Deutsches Kaltblut war.

Durch die Motorisierung von zunächst Handel und Gewerbe sowie schließlich auch der Land- und Forstwirtschaft begann auch beim Rheinisch-Deutschen Kaltblut ein rasanter Rückgang (NISSEN 1997). SCHARNHÖLZ (2002, S. 54) spricht von einem „... erdrutschartige(n) Niedergang der rheinischen Zucht ab etwa 1955 ...“. Zunächst stieg der Bestand jedoch durch die nach einem Krieg typische Flucht in Sachwerte an, und die Rhei-

nisch-Deutsche Zucht erreichte 1946 mit 25.022 Pferden (Stuten und Hengste) alleine im Rheinischen Pferdestammbuch (Gebiet Nordrhein, ohne Westfalen) den absoluten Höchststand an eingetragenen Pferden. Auch in den anderen Zuchtgebieten dieser Rasse wurden die höchsten Bestandszahlen in den ersten Nachkriegsjahren erreicht (SCHARNHÖLZ 2002). Zunächst bemühte man sich, die Rasse leichter zu züchten, um dem veränderten Bedarf (Pferd als Ergänzung zum Schlepper) nachzukommen. Aber der Siegeszug der Motorisierung war nicht mehr aufzuhalten und das Kaltblutpferd, einst der Stolz der Bauern und Züchter, wurde über Nacht zum Symbol der Rückständigkeit. SCHARNHÖLZ (2002, S. 56) schreibt dazu: „Aus einem ehemals hochgeschätzten Arbeitstier und tierzüchterischen Glanzstück war binnen weniger Jahre ein Abfallprodukt geworden, dessen man sich möglichst schnell entledigen musste.“ Nur wenige Züchter hielten entgegen aller Widerstände an der Zucht dieser Rasse fest und bewahrten sie vor dem Verschwinden. Der Tiefststand wurde 1974 erreicht: im Rheinland, dem einstigen Kernzuchtgebiet mit den erwähnten über 25.000 eingetragenen Zuchttieren im Jahr 1946, gab es 1974 nur noch 10 eingetragene Stuten und 2 Hengste (ebd.). In der folgenden Zeit ging es, wie bei allen einheimischen Kaltblutrassen, langsam wieder aufwärts.

Im Jahr 2012 umfasste der Bestand des Rheinisch-Deutschen Kaltblutes 133 eingetragene Hengste und 1.336 eingetragene Stuten (FN & DOKR 2013). Damit hat diese Rasse ihre zahlenmäßige Vormachtstellung unter den einheimischen Kaltblutrassen an das Süddeutsche Kaltblut abgegeben.

Das Süddeutsche Kaltblut

Im Süden Deutschlands hatte von je her der aus Österreich stammende Noriker, dessen Vorfahren bereits von den Römern züchterisch bearbeitet worden sein sollen, einen großen Einfluss auf die Pferdezucht. Er wurde ursprünglich in einem leichteren („Oberländer“) und einem schwereren Schlag („Pinzgauer“) gezüchtet. Seit 1934 war durch die so genannte „Rassebereinigung“ die Zucht des Norikers, jetzt als „Oberländer“ bezeichnet, in Bayern und Württemberg Pflicht und ersetzte das bis dahin auch hier vorherrschende Rheinisch-Deutsche Kaltblut (NISSEN 1997, SCHARNHÖLZ 2002). In Österreich wurde weiterhin der schwere Schlag, der Pinzgauer, bevorzugt. Nach der Annektierung Österreichs durch das Deutsche Reich 1938 lautete die einheitliche Bezeichnung ab 1939 in allen Gebieten „Noriker“, und die Unterteilung in die zwei Schläge wurde aufgegeben. Seit 1948 schließlich lautet die Rassebezeichnung in Deutschland „Süddeutsches Kaltblut“ (NISSEN 1997, SCHARNHÖLZ 2002).

Vor allem in Bayern wurde das Süddeutsche Kaltblut (s. Abbildung A-16 im Anhang) zur beherrschenden Rasse. So gab es 1930 dort 700 eingetragene Hengste, von denen 64 % Noriker, nur 12 % Rheinisch-Deutsche Kaltblüter und 24 % Warmblüter waren. Den zahlenmäßigen Höhepunkt erreichte die Rasse 1949 mit 36.785 eingetragenen Stuten. Von da an ging es auch mit dem Süddeutschen Kaltblut bergab und der Tiefststand wurde 1976 erreicht: die Zahl der Stuten war auf 568 zurückgegangen, betrug also nur noch 1,5% des Standes von 1949. Danach begann, wie bei den übrigen Kaltblutrassen auch, die allmähliche Erholung, und bereits 1985 wurden wieder über 1.000 Stuten gedeckt (SCHARNHÖLZ 2002). Heute stellt das Süddeutsche Kaltblut mit 2.144 eingetragenen Stuten und 116 eingetragenen Hengsten die zahlenmäßig stärkste einheimische Kaltblutrassen dar (FN & DOKR 2013).

Das Schwarzwälder Kaltblut

Schriftliche Zeugnisse über die Haltung und Zucht von Pferden im Schwarzwald finden sich bereits im 14. Jhd. Vor allem durch die Klöster St. Märgen, St. Peter und St. Blasien kam es immer wieder zur Einfuhr von Pferden aus dem Elsaß, aus Salzburg und aus der Schweiz, die die Pferdezucht im Schwarzwald beeinflussten. Eine geordnete Zucht im heutigen Sinne fand aber auch hier erst ab dem Ende des 19. Jhds. statt (BRODAUF 1996, SCHARNHÖLZ 2002).

Das Zuchtgebiet des Schwarzwälder Kaltblüters (s. Abbildung A-17 im Anhang), auch Schwarzwälder Fuchs oder St. Märgener Fuchs genannt, wird vor allem charakterisiert durch eine steile Topographie, arme Böden und ein raues Klima. Unter diesen Auslesebedingungen konnte nur ein zähes und anspruchsloses Pferd überleben. In der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts wurden durch die Schwarzwaldklöster wiederholt Pinzgauer Hengste importiert, um die einheimischen Pferde zu verbessern. Nach der Gründung der Schwarzwälder Pferdezuchtgenossenschaft und der Einrichtung des Stutbuches 1896 waren es dann vor allem Ardennerhengste, deren Heimat ähnliche natürliche Verhältnisse aufweist wie der Schwarzwald, und die auch in Größe und Rahmen dem eher kleinen, leichten Schwarzwälder entsprachen. Diese Ardennerhengste wurden von den Bauern jedoch oft als zu schwer und zu schwerfuttrig angesehen. Das so genannte „Wildern“ - also die Zucht mit einheimischen, nicht gekörten Hengsten - spielte daher eine große Rolle und führte zu einer deutlichen Typverbesserung, die in einer sehr erfolgreichen ersten öffentlichen Vorstellung der Pferde unter der Bezeichnung „Schwarzwälder Pferde“ bei der DLG-Schau 1906 in München resultierte (BRODAUF 1996, SCHARNHÖLZ 2002).

Die Schwarzwälder Rasse erlitt, wie die übrigen Rassen auch, durch die beiden Weltkriege erhebliche Verluste. Durch die bereits erwähnte Flucht in Sachwerte stieg der Bestand nach dem 2. Weltkrieg jedoch noch einmal kräftig an. So gab es 1937 insgesamt 537 eingetragene Stuten, während diese Zahl kurz nach dem Krieg auf 1.234 eingetragene Stuten anstieg. Bald darauf begann auch beim Schwarzwälder der Niedergang: 1980 gab es gerade noch 163 eingetragene Stuten (SCHARNHÖLZ 2002).

Auch das Schwarzwälder Kaltblut profitierte deutlich von der Trendwende auf dem Pferdemarkt Ende der 1980er Jahre, und die Bestandszahlen legten deutlich zu. Heute sind wieder 1.038 Stuten und 76 Hengste im Zuchtbuch eingetragen (FN & DOKR 2013).

Das Schleswiger Kaltblut

Die Schleswiger Zucht bestand bis zur Mitte des 19. Jhds. aus einem großen Gemisch von Hengsten unterschiedlichster Rassen. Ab 1860 wurden dann schwere Kaltblüter - Belgier, Shire und Clydesdale - importiert, mit denen eine rege Kreuzungszucht betrieben wurde. Aber erst der Import des Fuchshengstes „Oppenheim“, der entweder ein Suffolk Punch, wie von den meisten Autoren angenommen (z.B. SCHARNHÖLZ 2002), oder aber ein Shire oder Clydesdale war (NISSEN 1997), sowie der Einsatz der drei auf ihn ingezüchteten jütischen Munkedal-Hengste führten zu einer gewissen Konsolidierung des Schleswigers (s. Abbildung A-18 im Anhang) als ein mittleres Kaltblutpferd mit gutem Trabvermögen, das neben der Landwirtschaft vor allem für den Pferdeomnibus- und Pferdestraßenbahnbetrieb gefragt war (SCHARNHÖLZ 2002). Auch in späteren Jahren wurden in größerem Umfang Zuchttiere aus Jütland eingeführt. In Mittel- und Ostdeutschland waren die Schleswiger oftmals die Wegbereiter des Kaltblutpferdes, wurden hier aber schließlich ebenfalls vom Rheinisch-Deutschen Kaltblut ersetzt (MEYER 1940, NISSEN 1997).

Seine zahlenmäßig größte Ausdehnung erreichte der Schleswiger erst 1948 mit über 32.000 gedeckten Stuten und 460 registrierten Hengsten (NISSEN 1997). Auch die Schleswiger Züchter versuchten nach dem 2. Weltkrieg ihre Rasse kleiner und leichter zu züchten, um sie gegenüber dem Warmblut und vor allem den Kleinpferden als Reservezugkraft in der Landwirtschaft konkurrenzfähig zu halten. 1976 erreichte die Rasse mit nur noch 60 eingetragenen Stuten ihren Tiefpunkt, danach ging es langsam wieder bergauf (NISSEN 1997). Im Jahre 2012 umfasste die Population des Schleswiger Kaltblutes 31 Hengste und 204 Stuten und stellt damit die zahlenmäßig kleinste einheimische Kaltblutrassen dar (FN & DOKR 2013).

Das Schwere Warmblut

Neben den erwähnten Kaltblutrassen darf im Kontext „Arbeitspferderassen“ das Schwere Warmblut auf Ostfriesisch-Oldenburger Grundlage nicht vergessen werden (Abbildung A-19 im Anhang). Diese Pferde spielten

vor allem in ihren Ursprungszuchtgebieten Ostfriesland und Oldenburg, aber auch in den Nachzuchtgebieten Sachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt und Schlesien, eine große Rolle und beeinflussten zudem die Zuchten im bayerischen Rottal und auch in Württemberg in entscheidendem Maße. Bereits im 17. Jhd. waren die stets in Bauernhand gezüchteten Oldenburger und Ostfriesen als Kutschpferde berühmt und beliebt. Im 19. Jhd. wurden zunächst Hengste englischer Wagenpferderassen (Cleveland-Bay und Yorkshire Coach) sowie später auch Anglo-Normänner-Hengste eingesetzt, deren Einfluss bis zum Ausbruch des 1. Weltkrieges zu einer Konsolidierung der Rasse als schweres, elegantes Kutschpferd, des so genannten 'Karossiers', führte (NISSEN 1997). Nach dem 1. Weltkrieg gab es aus ökonomischen Gründen sowie durch die Ausbreitung des Automobils keinen Bedarf mehr für diese Karossiers, während gleichzeitig die intensiviertere Landwirtschaft nach schweren, zugkräftigen Pferden verlangte. Es entbrannte in allen Zuchtgebieten ein Konkurrenzkampf zwischen den Warm- und Kaltblutrassen, überall wurde versucht, die Warmblutrassen schwerer zu züchten. Für die bereits im schweren Wirtschaftswarmbluttyp stehenden Rassen war dies problemlos möglich, und in dieser oft „Elefantperiode“ genannten Zeit reichten die schweren Warmblüter in Kaliber und Knochenstärke oft an die Kaltblüter heran oder übertrafen sie sogar noch (BUHLE 1923, DENCKER 1989, HANGEN 1989, NISSEN 1997).

In den 1930er Jahren stellte der Oldenburger die vielseitigste Wirtschaftspferderasse der Welt und gleichzeitig die denkbar ausgeglichene Warmblutzucht dar (NISSEN 1997). Vor allem in kleinen und mittleren landwirtschaftlichen Betrieben war diese Rasse beliebt, da sie zum einen schwer genug für den landwirtschaftlichen Zug war, zudem aber über deutlich mehr Gangvermögen als die Kaltblutrassen verfügte und sich somit besser für Transporte eignete. Hinzu kamen Frühreife, Futterdankbarkeit, Langlebigkeit und ein ruhiges Temperament. Eigenschaften, die der Rasse auch zu großer Beliebtheit im gewerblichen Fuhrbetrieb sowie beim Militär, ja sogar als Reit- und Springpferd bescherten (DENCKER 1989).

Nach dem 2. Weltkrieg wurde in Oldenburg und Ostfriesland noch bis weit in die 1950er Jahre am Typ des schweren Wirtschaftspferdes festgehalten, bevor auch das Schwere Warmblut zum Reitpferd umgezüchtet wurde. Allerdings konnte sich die Rasse in der damaligen DDR im ursprünglichen Typ bis heute halten (SCHARNHÖLZ 2002). Vor allem im sächsischen Landgestüt Moritzburg bei Dresden finden sich bis heute durchgängig Hengste der Rasse Schweres Warmblut. In den alten Bundesländern findet seit 1975 ein Rückzüchtungsversuch statt (MEINEN 1994).

Im Jahr 2012 gab es laut FN & DOKR (2013) insgesamt 101 eingetragene Hengste und 1.383 eingetragene Stuten der Schläge Altwürttemberger, Ostfriesen, Ostfriesen/Alt-Oldenburger, Rottaler, Sächsisch-Thüringisches Schweres Warmblut, Schlesier und Schweres Warmblut Dänemark. Allein das Sächsisch-Thüringische Schwere Warmblut verzeichnete 2012 57 Hengste und 1.097 Stuten (ebd.).

2.1.3 Die Nutzung des Pferdes als Zugtier in der deutschen Landwirtschaft

Die Nutzung des Pferdes als Zugtier in der Landwirtschaft beginnt in Europa in nennenswertem Umfang erst gegen Ende des 1. nachchristlichen Jahrtausends. Ausschlaggebend dafür war die Erfindung und Einführung des Kumts, welches das Joch ablöste und zum ersten Mal die Nutzung der vollen Zugkraft des Pferdes ermöglichte (BENECKE 1994, FN 2001, SCHARNHÖLZ 2002, SCHROLL 2008a). Das Kunt wurde scheinbar unabhängig voneinander sowohl in China, als auch in Westeuropa erfunden. Die älteste Abbildung eines Kuntgeschirres findet sich in der so genannten „Trierer Apokalypse“, einer Miniatur aus der Zeit um 800 n. Chr. (SCHARNHÖLZ 2002).

Die verglichen mit dem Rind oder Ochsen höhere Schrittgeschwindigkeit des Pferdes bedeutete einen erheblichen Zeitgewinn bei der Arbeit. Zum Einsatz kamen die vorhandenen lokalen Pferdeschläge, die im Typ den heutigen Ponys und Kleinpferden entsprachen (z.B. WAIDMANN 1995, FN 2001). Da das Pferd mit dem neu-

artigen Kumtgeschirr erheblich mehr Zugkraft liefern konnte als mit dem zuvor benützten und für die Anatomie des Pferdes gänzlich ungeeigneten Joch, wurde das Pferd zunehmend auch für schwere landwirtschaftliche Ackerarbeiten wie z.B. das Pflügen eingesetzt. Es ist nahe liegend, dass hierdurch bereits eine zumindest unbewusste Selektion in Richtung auf einen schwereren Pferdetypp stattfand (SCHARNHÖLZ 2002). Dennoch blieben Rinder und Ochsen bis zum Aufkommen der Kaltblutrassen im 18. und 19. Jhd. die mit Abstand häufigsten Zugtiere in der Landwirtschaft, da sie den relativ kleinen, leichten und in der Ernährung anspruchsvolleren und teureren Pferden an Zugkraft deutlich überlegen waren (BROWN 1991, WELSCHOF 1997, NISSEN 1997).

Die Entwicklungen in der Landwirtschaft sowie die Industrielle Revolution sorgten ab Mitte des 19. Jhds. zu nachhaltigen Veränderungen in der Pferdezucht. Die Intensivierung des Ackerbaus (Fruchtwechselwirtschaft, Erfindung des Mineraldüngers, Einführung des Hackfruchtanbaus, größere und schwerere Maschinen und Geräte) sowie die industrielle Entwicklung, die damit verbundene zunehmende Urbanisierung und der damit einhergehende enorm steigende Transportbedarf erforderten größere Zugkräfte als die lokalen Pferdeschläge leisten konnten. So entstand um die Wende vom 18. zum 19. Jhd. sowohl im Bereich der Landwirtschaft als auch im Bereich der übrigen Wirtschaft der Bedarf nach schwereren Pferden (HANGEN 1989, NISSEN 1997). Die Nachfrage aus der kapitalkräftigen Wirtschaft hat dabei die landwirtschaftliche Zucht des Kaltblutpferdes befördert (MEYER 1940). Während der Staat weiterhin die Remontezuchten für militärische Zwecke favorisierte, gewannen die landwirtschaftlichen Notwendigkeiten ab Mitte des 19. Jhds. doch die Oberhand, und die Kaltblutzucht begann sich in weiten Gebieten durchzusetzen. Die Zahl der Kaltblutpferde stieg vom Ende des 19. Jhds. kontinuierlich an und erreichte ihren Höhepunkt erst in den ersten Jahren nach dem 2. Weltkrieg (MEYER 1940, NISSEN 1997, SCHARNHÖLZ 2002; vgl. auch Kap. 2.1.2).

Neben dem gestiegenen Zugkraftbedarf wurde die Ausbreitung des ruhigen, einfach zu handhabenden Kaltblüters manchen Autoren zu Folge auch durch die zunehmende Abwanderung landwirtschaftlicher Arbeitskräfte in die Industrie und den daraus resultierenden Mangel an für die anspruchsvolleren Warmblüter geeigneten Gespannführern befördert (z.B. MEYER 1940). Dieses so genannte „Leuteproblem“ als Grund für die starke Ausbreitung des Kaltblutpferdes wird von SCHARNHÖLZ (2002) negiert, da die Zahl der Beschäftigten in der Landwirtschaft von 1850 bis 1913 von 8,5 Mio. auf 10,3 Mio. zugenommen habe. Zudem seien nicht die qualifizierten Arbeitskräfte wie z.B. Gespannführer aus der Landwirtschaft in die Industrie abgewandert, sondern die unqualifizierten Landarbeiter. Darüber hinaus seien die damaligen Warmblüter wesentlich ruhiger und ausgeglichener gewesen als die heutigen, wodurch sie auch von weniger qualifizierten Landarbeitern gearbeitet werden konnten.

Die Pferdezucht im Deutschland des 20. Jhds. ist gekennzeichnet durch die weit reichenden Folgen der beiden Weltkriege. Nach dem Ende des Ersten Weltkrieges verlor das Pferd seine Bedeutung als Reitpferd für das Militär nahezu gänzlich, wodurch die Remontezucht für die Landwirtschaft uninteressant wurde. Im Zusammenhang mit der sich immer schneller entwickelnden Motorisierung vor allem des Personen- und Güterverkehrs verlagerte sich die Verwendung des Pferdes, Warm- wie Kaltblut, immer mehr in Richtung Landwirtschaft. Während die Kaltblut- und die schweren Warmblutzuchten diesem veränderten Bedarf bereits weitgehend entsprachen, wurde nun versucht, auch die übrigen Warmblutzuchten diesem Bedarf anzupassen und schwerer zu züchten. In Deutschland begann der Siegeszug des Rheinisch-Deutschen Kaltblutes (HANGEN 1989, NISSEN 1997, SCHARNHÖLZ 2002; vgl. auch Kapitel 2.1.2).

Das allmähliche Aufkommen zunächst der Dampfmaschinen und dann der Motoren führte zu einer erbitterten Diskussion „Pferd oder Motor?“. In dieser Diskussion war ein wesentliches Argument die Nahrungskonkurrenz zwischen Pferd und Mensch. Ein Antwortversuch auf die zahlreichen Anfeindungen seitens der „Motorlobby“ war die Propagierung der Vielanspannung nach Amerikanischem Vorbild (z.B. BRUTSCHKE 1904, WILSON 1926). Durch die Verwendung von größeren Gespannen und Geräten bzw. Gerätekombinationen sollte die tägliche Arbeitsleistung jedes einzelnen Gespannführers vervielfacht, die Arbeit rationalisiert werden.

Hierdurch sollte auch dem durch die Kriegsverluste bedingten Mangel an menschlichen Arbeitskräften begegnet werden (z.B. BUHLE 1929b, HERRMANN 1988).

Die zahlenmäßige Bedeutung der Arbeitspferde nahm zunächst jedoch trotz der auch von den Nationalsozialisten geförderten Motorisierung (WENDLER 1994) weiter zu. MEYER (1940) gibt für das Gebiet des damaligen Deutschen Reiches für Ende 1938 eine Gesamtzahl von 2,1 Mio. Kaltblutpferden an, was einem Anteil am Gesamtpferdebestand von 60,3 % entsprach. Von diesen 2,1 Mio. Kaltblütern entfielen 1,7 Mio. (= 81 %) auf die Rasse Rheinisch-Deutsches Kaltblut, 280.000 Tiere (= 13 %) gehörten zur Rasse Oberländer/Noriker und 90.000 (= 4 %) waren Schleswiger Kaltblüter (vgl. auch HANGEN 1989).

Durch den 2. Weltkrieg und seine Folgen wurde die deutsche Pferdezucht durch die Gebietsverluste in Osteuropa und die Teilung in einen West- und einen Ostteil schwer geschädigt (NISSEN 1997, SCHARNHÖLZ 2002). Zudem begann mit dem Wirtschaftswunder im Westen der nahezu vollständige Ersatz des Arbeitspferdes durch die Maschine, sowohl in der Industrie, als auch in der Landwirtschaft. In den ersten Jahren nach dem Krieg allerdings erlebten die Arbeitspferde, wie auch Ochsen und Kühe, bedingt durch den großen Mangel an Treibstoffen und Maschinen sowie durch eine allgemeine Flucht in Sachwerte noch einmal einen Zuwachs. Die Nachfrage nach Pferden für Land- und Forstwirtschaft, für gewerbliche Fuhrbetriebe, ja sogar für die Personenbeförderung war groß (HANGEN 1989, SCHARNHÖLZ 2002). So gehörten noch 1948 60 % aller gehörten Hengste einer Kaltblutrassen an; sie deckten 65 % aller Großpferdestuten (FN 2001).

In diesen ersten Nachkriegsjahren wurde dem Kaltblutpferd von vielen namhaften Persönlichkeiten aus der Pferdezucht eine glänzende Zukunft vorausgesagt, und die Frage „Pferd oder bzw. und Motor?“ wurde erneut heftig diskutiert, ja sogar die Kleinpferde- und Kuhanspannung wurden in diesem Zusammenhang wieder propagiert (z.B. KRÜGER 1947, TEIPEL 1949, HOWALD 1950, RAU 1950, MEYER 1951, PETZOLD 1952, SCHEPP 1952, SOMMERFELD & GRUSCHINSKI 1952, BREIDBACH 1953, PRIEBE 1953, RAU 1953, BROUDRE 1954, KRÜGER 1957, PAPENDIECK 1958).

Gleichzeitig wurde die sich überall rasend schnell durchsetzende Motorisierung unterstützt durch die landwirtschaftlichen Ausbildungs- und Beratungsinstitutionen sowie zahlreiche Schriften und Artikel, die zum Teil in böartig-polemischer Weise das Arbeitspferd als Quell vieler Übel darstellten (vgl. DENCKER & MEYER 1947, ANONYMUS 1951, SCHEPP 1952, BREIDBACH 1953, UPPENBORN 1956). Das Arbeitspferd wurde quasi über Nacht zum Symbol der Rückständigkeit und die Bestandszahlen sanken dramatisch (vgl. Tabelle A-1 im Anhang). SCHARNHÖLZ (2002, S. 55) schreibt dazu: „So wurde vorgerechnet, wie viel landwirtschaftliche Nutzfläche allein für den Futterbedarf der Arbeitspferde verschwendet würde. Wenn diese Fläche für den Anbau von Marktfrüchten genutzt würde, dann ... sollten goldene Zeiten für die Bauern anbrechen. Auf die Erfüllung dieser Prophezeiung warten die Landwirte seit nunmehr 50 Jahren.“

Im Gegensatz zu den Kaltblütern profitierten die Kleinpferderassen wie z.B. Haflinger und Norweger in den ersten Jahren von der Motorisierung der Landwirtschaft, da sie aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften, vor allem ihrer Futterdankbarkeit und ihrer vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten, die ideale Ergänzungskraft zum Schlepper darstellten (PAPENDIECK 1958, NISSEN 1999). Einige Zuchtgebiete, so z.B. Schleswig-Holstein, nahmen dies zum Anlass, ihre Kaltblutrassen wieder kleiner und leichter zu züchten, um sie den Kleinpferden gegenüber konkurrenzfähiger zu gestalten (NISSEN 1997).

Schließlich jedoch, vor allem bedingt durch die Abwanderung von nahezu dreiviertel der landwirtschaftlichen Arbeitskräfte in die Industrie sowie durch eine Landwirtschaftspolitik, die mit günstigen Krediten, Gasölbeihilfe und entsprechenden Subventionen die Motorisierung der Landwirtschaft massiv förderte, setzte sich der Schlepper in der Landwirtschaft des westlichen Teils Deutschlands nach der Währungsreform 1948 sehr schnell durch (HANGEN 1989, RHENIUS 1994). Eine nicht unwesentliche Rolle spielte hierbei auch das *European Recovery Program*, der so genannte *Marshall-Plan*, mit dessen Hilfe u.a. überzählige Schlepper und Maschinen aus US-amerikanischer Produktion zu Dumpingpreisen auf den europäischen Markt gelangten (SCHARNHÖLZ 2011).

Für viele Betriebe war der Umstieg vom Pferd auf den Schlepper als Zugkraftquelle durch den hohen Kapitaleinsatz und die dafür notwendige Aufnahme von Schulden der Beginn einer Entwicklung, die letztlich zur Betriebsaufgabe führte („Wachsen oder Weichen“). Diesbezüglich warnende Stimmen (z.B. RAU 1950, MEYER 1951, WAGGERSHAUSER 1954, PRIEBE 1954, PREUSCHEN 1956) konnten diese Entwicklung nicht verhindern. HANGEN (1989, S. 39) schreibt, dass bis Ende der 1960er Jahre jedes aus der Landwirtschaft ausscheidende Pferd durch 50 Schlepper-PS ersetzt worden sei, „...“, eine wirtschaftlich sicher nicht sinnvolle Maßnahme.“. Die Abnahme der Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe in Deutschland von über 1,5 Mio. im Jahr 1960 auf 299.134 im Jahr 2010 (AID 2012) bestätigt diese Aussage nachdrücklich. Ein zeitgenössischer Witz illustriert die damaligen Verhältnisse auf vielen Betrieben sehr schön: einen erfolgreichen Landmaschinen-Vertreter erkennt man daran, dass er einem Bauern eine Melkmaschine verkauft und als Bezahlung die letzte Milchkuh aus dem Stall führt (WELTIN 1999).

Gab es 1950 noch über 1,5 Mio. Pferde in der Bundesrepublik Deutschland, von denen immerhin noch mehr als 100.000 in den Stutbüchern der deutschen Pferdezuchtverbände eingetragene Kaltblüter waren, so fiel die Zahl der Pferde insgesamt bis 1970 auf ihren absoluten Tiefststand von nur noch 250.000 Stück (NISSEN 1997, HARING 2000). Nur noch sehr wenige Züchter hielten an den Kaltblutrassen fest und sicherten so deren Überleben.

In der späteren DDR stieg die Zucht von Arbeitspferden nach dem 2. Weltkrieg zahlenmäßig stark an, da nach dem Krieg ein großer Mangel an tierischer Zugkraft herrschte und die Motorisierung viel langsamer zunahm, als in der Bundesrepublik. Dieser Trend hielt an bis zur Kollektivierung der landwirtschaftlichen Betriebe in den 1950er Jahren. Die nun entstehenden enormen Flächengrößen waren nur noch mit Großtechnik zu bewirtschaften. Allerdings gingen die Pferdezahlen deutlich langsamer zurück als in der Bundesrepublik, und während dieser Zeit wurde weiterhin eine scharf selektierende Zucht betrieben, die die hohe Qualität der ostdeutschen Kaltblutzucht bis heute erklärt (SCHARNHÖLZ 2002).

In den 1980er Jahren erlebten die Kaltblutrassen im Zuge eines allgemein gestiegenen Umweltbewusstseins in der Bevölkerung eine kurze Renaissance. Vor allem die Zahl der Holzurückpferde in bundesdeutschen Wäldern nahm zu, eine Entwicklung, die auch von Seiten der Politik, z.T. bereits seit 1970, mit Förderprogrammen unterstützt wurde (BONIN 1999). Gründe hierfür dürften sowohl die Zunahme des so genannten Waldsterbens, als auch die Berücksichtigung der Schäden, die die Forstmaschinen am Boden sowie am stehenden Holz verursachten, gewesen sein. Auch in der Forstwirtschaft der DDR konnte sich das Pferd trotz fortschreitender Mechanisierung behaupten und ab 1980 zahlenmäßig wieder zulegen (BECK 1989).

Die Zunahme des Pferdeeinsatzes im Wald war in der Bundesrepublik allerdings nur von kurzer Dauer. Die Frühjahrsstürme Anfang der 1990er Jahre stoppten den Vormarsch der Kaltblutpferde im Wald und führten zur allgemeinen Bevorzugung großer Maschinen wie Harvester und Forwarder. Durch diese Stürme war in kürzester Zeit sehr viel Holz angefallen. Um dieses Holz vor Qualitätsverlust zu bewahren, musste es so schnell wie möglich aus dem Wald entfernt werden. Dies war mit Pferden nicht möglich und so hielten die ursprünglich aus Skandinavien stammenden Erntemaschinen Einzug in den deutschen Wald (SCHROLL 2000).

Nachdem das Sturmholz aufgearbeitet war, führte der ökonomische Zwang zur Auslastung der nun vorhandenen Maschinen, gepaart mit einer gehörigen Portion Technikgläubigkeit und dem immer mehr schwindenden Wissen um die Möglichkeiten des Pferdeeinsatzes im Wald zu einem weiteren Rückgang der Pferdearbeit. Und dies, obwohl durch wissenschaftliche Studien sowohl die größere Umweltverträglichkeit des Pferdes (z.B. WALKER 1994, FLEISCHER & SÜß 2002, VOßBRINK 2005), als auch seine für viele Bereiche geltende ökonomische Ebenbürtigkeit, ja sogar Überlegenheit, belegt sind (z.B. BECK 1989, FOA HILCHENBACH & LAFO NRW 1997, CAVALLI & SABAINI 2000, SCHROLL 2008b, HARTKOPF 2012, LOBODA 2012).

Dennoch markiert das Ende der 1980er Jahre für die Kaltblutrassen einen Wendepunkt und es beginnt ein langsamer, aber stetiger Aufwärtstrend. Die Zahl der eingetragenen Kaltblut-Zuchtstuten erhöhte sich von

1.268 im Jahr 1980 auf zunächst 4.966 im Jahre 2007; seitdem stagniert der Wert in etwa auf diesem Niveau und liegt im Jahr 2012 bei 4.955 (FN & DOKR 2013). Neben dem gestiegenen Umweltbewusstsein und den daraus resultierenden staatlichen Fördermaßnahmen änderte sich auch die Interessenlage der potentiellen Pferdekäufer. Diese wandten sich nun vermehrt vom Warmblut ab und den „Exoten“ zu, zu denen neben z.B. Western- und Gangpferden eben auch die Kaltblüter gehörten. Die Kaltblutpferde wurden dabei vor allem für den Freizeitbereich „entdeckt“, eine Entwicklung, die bis heute anhält (WILLRICH 1999, SCHARNHÖLZ 2002, SCHMELZER 2010).

Nach der deutschen Wiedervereinigung wurden viele Kaltblutpferde aus den östlichen in die westlichen Bundesländer verkauft, darunter viele qualitätvolle Zuchttiere. Die Kaltblutzucht in Deutschland hat insgesamt von der Wiedervereinigung profitiert, da der durch die neue Verbindung von Ost und West ermöglichte Austausch von Zuchtpferden geeignet ist, der genetischen Verengung - ein grundsätzliches Problem bei der Erhaltung von selten gewordenen Rassen - entgegenzuwirken (SCHARNHÖLZ 2002).

Seit den 1990er Jahren nimmt auch in der Landwirtschaft der Einsatz von Arbeitspferden langsam aber kontinuierlich wieder zu. Eigenen Schätzungen aufgrund offizieller Zahlen und eigener Kenntnisse zur Folge, dürften in Deutschland derzeit auf etwa 150 Pferde einsetzenden landwirtschaftlichen Betrieben insgesamt ca. 300 - 600 Arbeitspferde im Einsatz sein, Tendenz steigend (HEROLD 2005).

Trotz aller positiven Anzeichen gehören die deutschen Kaltblutrassen - mit Ausnahme des Süddeutschen Kaltblutes - sowie das Schwere Warmblut aufgrund ihrer geringen Bestandszahlen nach wie vor zur Kategorie der „gefährdeten Nutzierrassen“. In der „Roten Liste der gefährdeten Nutzierrassen“, die von der „Gesellschaft zur Erhaltung alter und gefährdeter Haustierrassen e.V. (GEH)“ herausgegeben wird, werden die betreffenden Pferderassen wie folgt kategorisiert (GEH 2014):

- Schleswiger Kaltblut: Kategorie II, „stark gefährdet“
- Rheinisch-Deutsches Kaltblut, Schwarzwälder Kaltblut und Schweres Warmblut: Kategorie III, „gefährdet“

Auch international wird die Gefährdung dieser Rassen bestätigt. Mit Ausnahme des Süddeutschen Kaltblutes werden die hier betrachteten Rassen in der „World Watch List for Domestic Animal Diversity“ der FAO in der Kategorie „endangered“, also gefährdet, geführt (SCHERF 2000).

2.1.4 Die Entwicklung pferdegezogener Technik in der Landwirtschaft unter besonderer Berücksichtigung der Mähtechnik

2.1.4.1 Pferdegezogene Geräte für die Landwirtschaft

Die ersten landwirtschaftlichen Geräte für den Pferdezug dürften im Mittelalter Pflüge, Eggen u.ä. gewesen sein, von denen es Abbildungen bereits aus dem 15. Jhd. gibt (vgl. z.B. BROWN 1991, SÖHNE 1992, KAHLERT 1999). Bis etwa 1700 veränderten sich die in der Landwirtschaft eingesetzten Geräte kaum. Im 18. Jhd. folgten einige wenige Erfindungen und Verbesserungen bereits bekannter Geräte, aber erst am Ende des 18. sowie im 19. Jhd. führte die Industrialisierung dazu, dass sich auch die in der Landwirtschaft verwendeten Gerätschaften deutlich veränderten (SÖHNE 1992).

Bereits im ausgehenden 18. Jhd. wurden die Pflüge zunehmend aus Eisen gefertigt und immer weiter verbessert. Die unterschiedlichsten Geräte für Bodenbearbeitung und mechanische Beikrautregulierung wurden entwickelt. Mit der Erfindung des Schneidwerks (s. Kapitel 2.1.4.4) entwickelten sich gegen Mitte des 19. Jhds. zunehmend funktionstüchtigere Getreideerntemaschinen. In den USA wurden die ersten Mähdrescher entwickelt, die von bis zu 40 Pferden oder Mulis in einem Gespann gezogen wurden (SÖHNE 1992, EGGERT 1999).

Auch für die übrigen landwirtschaftlichen Arbeitsfelder wurden zunehmend funktionellere pferdegezogene Gerätschaften entwickelt, die man u.a. in den landwirtschaftlichen Fach- und Lehrbüchern bis in die 1950er/1960er Jahre abgebildet und erläutert findet. Einen guten Überblick über die „alte“ pferdegezogene Technik gibt in neuerer Zeit KOCH (1998).

Die Entwicklung pferdegezogener Geräte endete in Westeuropa bald nach dem Zweiten Weltkrieg, als der Schlepper die Vorherrschaft in der Landwirtschaft übernahm. Vereinzelt wurden noch bis in die 1960er Jahre, in Osteuropa zum Teil sogar darüber hinaus (KOSZEL et al. 1986, SASIMOWSKI & SASIMOWSKI 1998), Pferdegeräte hergestellt. Im Allgemeinen mussten Pferde einsetzende Betriebe ab den 1970er Jahren aber mit den Gerätschaften der vergangenen Jahrzehnte arbeiten. Viele dieser Geräte waren technisch sehr ausgereift und funktionell, allerdings war die Schlagkraft durch relativ geringe Arbeitsbreiten in der Regel begrenzt. Hinzu kam das Problem der Ersatzteilbeschaffung, da mit dem Einstellen der Geräteentwicklung und -produktion auch keine Ersatzteile für diese Geräte mehr produziert wurden (SCHROLL 2011a).

Die Entwicklung neuer Spezialgeräte für den Pferdezug etwa ab den 1980er Jahren war in den USA innerhalb der Religionsgemeinschaft der Amish aufgrund ihrer rasch zunehmenden Mitgliederzahl und ihrer sehr eigenen Wirtschaftsweise bedingt möglich (vgl. KRAYBILL 1997 u. 2001). Außerhalb der Amish-Gemeinschaft war - ebenso wie in Europa - dieser Weg kaum gangbar. Der Markt für solche Geräte war zu klein (und ist es zum Teil immer noch), wodurch die Herstellungskosten für diese Geräte viel zu hoch wären, um sie überhaupt absetzen zu können. Lediglich einige wenige Idealisten machten sich daran, Geräte für den Pferdezug neu zu entwickeln. Auf der Suche nach einem Ausweg entstand - zunächst in den USA - die Idee des Vorderwagens, mit dessen Hilfe ursprünglich für den Traktorzug gedachte Arbeitsgeräte im Pferdezug eingesetzt werden können.

2.1.4.2 Vorderwagen

Der große Vorteil von Vorderwagen ist, dass es durch die Anschaffung eines Spezialgerätes für den Pferdezug - eben den Vorderwagen - möglich wird, für den Traktorzug gebaute Geräte im Pferdezug einzusetzen. Diese Geräte haben meist eine höhere Schlagkraft als die alten Pferdegeräte und sind überdies oftmals preiswert als Gebrauchtgeräte zu erhalten. Diese Faktoren haben einen positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Pferdeinsatzes und erleichtern den Einsatz von Arbeitspferden.

Vorderwagen wurden zunächst in den USA entwickelt, wo die Produktion pferdegezogener Geräte bereits deutlich früher endete als in Europa. Die Notwendigkeit hierzu begründete sich vor allem in der wachsenden Zahl der von den Amish bewirtschafteten Farmen in den USA, für die der Zugriff auf alte, seit langem nicht mehr gebaute Pferdetechnik und Ersatzteile hierfür immer schwerer wurde. Des Weiteren nahm in den USA etwa ab den 1990er Jahren auch außerhalb der Gemeinschaft der Amish das Interesse am Einsatz von Arbeitspferden in der Landwirtschaft deutlich zu. Auch diese Gruppe hatte zunehmend Schwierigkeiten, alte, noch gut erhaltene Geräte und passende Ersatzteile hierfür zu bekommen (vgl. MILLER 2006).

Eines der ersten „Serien“-Vorderwagenmodelle wurde Ende der 1980er Jahre von Elmo REED in Kentucky, USA, entwickelt und gebaut. Ein dreirädriges Gerät mit einer Dreipunkthydraulik mit Handpumpe sowie einer Zapfwelle, die über die Hinterräder des Vorderwagens angetrieben wird („Bodenantrieb“). Der erste Vorderwagen dieser Art wurde 1991 von Godehart HANNIG nach Deutschland importiert (vgl. ANONYMUS 1991, STEINERT 1992). Zeitgleich mit dem Elmo Reed-Vorderwagen wurde der „Teamster 2000“ von der Firma TEAMSTER FORECARTS ebenfalls in den USA entwickelt (ANONYMUS 1992, DEGREIF 1992). Dieser Vorderwagen hatte bereits hydraulische Bremsen, eine elektrische 2-Wege-Hydraulik und Unterlenker, die in Kategorie 1 und 2 geliefert werden konnten. Gravierender Nachteil dieses Gerätes, wie der jedes Vorderwagens, war das hohe Eigengewicht, das zusätzliche Zugkraft erfordert, im Fall des Teamster 2000 etwa 700 kg

(ANONYMUS 1992). Auch dieser Vorderwagen fand Anfang der 1990er Jahre seinen Weg nach Deutschland (DEGREIF 1992).

Angeregt durch diese amerikanischen Vorderwagen, begannen auch in Europa nach und nach einzelne Personen damit, sich Gedanken über „moderne“ Geräte für den Pferdezug zu machen, und es entstanden diverse Eigenkonstruktionen. Die Entwicklung moderner Geräte für den Pferdezug in Europa ist dabei untrennbar mit dem Namen Charlie PINNEY verbunden. Er begann bereits in den 1970er Jahren gemeinsam mit Don TOWNSEND in Großbritannien verschiedene Vorderwagen und vereinzelt auch andere Gerätschaften zu entwickeln (Abbildung A-2 und Abbildung A-5 bis Abbildung A-7 im Anhang). Leider verstarb Charlie Pinney im September 2007, die Weiterentwicklung dieser Geräte wurde dadurch gestoppt. Durch sein Beispiel ermutigt, und angeregt nicht zuletzt durch die seit 1996 in zweijährigem Rhythmus stattfindende Veranstaltung „PferdeStark“ im Westfälischen Freilichtmuseum in Detmold, Nordrhein-Westfalen, begannen weitere Tüftler in Europa Vorderwagen und auch andere Gerät zu entwickeln und in kleinen Stückzahlen zu bauen (vgl. z.B. SCHROLL 2009).

Mittlerweile gibt es Vorderwagen in den USA wie in Europa in sehr unterschiedlichen Größen und Ausführungen (Übersicht z.B. bei MOORE 2006, HEROLD et al. 2009; s.a. Abbildung A-3 bis Abbildung A-10 im Anhang). Die Palette reicht von einem einfachen, einachsigen so genannten Basis-Vorderwagen mit Sitz, Fußbremse und Ackerschiene oder Anhängerkupplung (vgl. Abbildung A-4 im Anhang) bis hin zum derzeit weltweit wohl ausgereiftesten Modell, dem von Kurt OHRNDORF entwickelten und gebauten HSKO, einem zweiteiligen Vorderwagen, der in unterschiedlichen Ausführungen gebaut wird (Abbildung A-8 im Anhang).

Ein grundsätzliches Problem bei allen Vorderwagen gegenüber reinen Pferdezuggeräten ist das zusätzliche Gewicht des Vorderwagens, das die Pferde bewegen müssen. Hinzu kommt bei Arbeitsgeräten, deren Mechanismus durch eine Zapfwelle angetrieben werden muss, dass dieser Antrieb durch die zahlreichen Übersetzungen im Antriebsstrang sehr kraftaufwendig ist. Dadurch sind dem Einsatz dieser Gerätekombinationen ausschließlich mit Pferdekraft enge Grenzen gesetzt. Folglich gibt es seit Aufkommen der Vorderwagen eine lebhaft Diskussion über den „richtigen Weg“ des zukünftigen Arbeitspferdeeinsatzes: Vorderwagen mit ursprünglich für den Traktorzug gebautem Gerät, zum Antrieb von zapfwellengetriebenen Geräten z.T. mit Aufbaumotor versehen, oder für den Pferdezug gebaute Einzelgeräte, die es in moderner Ausführung zum Teil aber noch gar nicht gibt und deren Entwicklung zwar langsam Fortschritte macht, durch den noch recht begrenzten Markt ökonomisch aber nach wie vor schwierig ist (vgl. u.a. DEGREIF 1993 u. 1995, SPYCHIGER 1994, HAMEN 2001, PINNEY 2003 a u. b, PINNEY 2004). Diese Diskussion hält nach wie vor an und wird gerade in letzter Zeit wieder sehr intensiv geführt, ohne dass der „Königsweg“ bereits gefunden wäre (vgl. SCHMIT 2008a und b, SCHMIT 2011 a-d, OHRNDORF 2011, SCHROLL 2011b, SPYCHIGER 2011, ZAUNER 2011).

2.1.4.3 Moderne Einzelgeräte für den Pferdezug

Parallel zu der Entwicklung verschiedenster Vorderwagen entstanden trotz der angesprochenen ökonomischen Schwierigkeiten bei der Entwicklung dieser Geräte nach und nach verschiedene moderne Einzelgeräte für den Pferdezug (s. Abbildung A-11 bis Abbildung A-13 im Anhang). Neben den USA, wo anfänglich vor allem die in Amish-Hand befindlichen Firmen wie *I&J*, *Millcreek*, *Pequea*, *Pioneer*, *White Horse* u.a. zahlreiche Geräte modernisierten und teilweise auch neue Geräte entwickelten (vgl. z.B. SASIMOWSKI & SASIMOWSKI 1998, MOORE 2006), gab es in Europa vor allem in der Schweiz bereits anfangs der 1990er Jahre eine kleine Zahl moderner Einzelgeräte für den Pferdezug (vgl. z.B. SPYCHIGER 1992). Hierzu zählen das Vielfachgerät von BURKHALTER oder der Pferde-Getreide-Hackstriegel von NIEDERHAUSER ebenso wie der Pferde-Mäher und der Zwei-Achs-Anhänger mit Wechselaufbauten der Firma HÄSSIG AG sowie die in den *Anstalten Witzwil*, einer Schweizer Justizvollzugsanstalt hergestellten Kreiselschwader, Sämaschinen und Düngerstreuer (vgl. IGA 2000).

Zu dem seit Ende der 1950er Jahre kontinuierlich weiterentwickelten Vielfachgerät von BURKHALTER (vgl. STEINERT 1992) kam mit dem *Univecus* von Hansjörg FISCHER Ende der 1990er Jahre ein weiteres Gerät für die Beikrautregulierung hinzu. Der *Univecus* setzt das Prinzip des Zwischenachsenbaus, wie es vor allem im Gemüsebau in Form des Geräteträgers der Firma *Fendt* weit verbreitet ist, für den Pferdezug um (s. Abbildung A-11 im Anhang). Aufgrund eines recht hohen Verkaufspreises hat dieses etwa ab dem Jahr 2000 ebenfalls von der Firma BURKHALTER in der Schweiz in Kleinserie gebaute Gerät bis heute allerdings nur sehr geringe Verbreitung gefunden.

In Frankreich wurden in den vergangenen Jahren von der Organisation PROMMATA einige Pferdegeräte entwickelt, die sich an dem Vorbild der zahlreichen Geräte von Jean NOLLE orientieren, dessen Erbe Prommata angetreten hat (NOLLE 1986, CORBACH-HAPPEL 2009). Diese Geräte sind sehr einfach und effizient gebaut und zielen neben dem Einsatz in den Entwicklungsländern auf die für Frankreich nicht unüblichen Subsistenz-Betriebe mit Zugtiereinsatz ab (EBERT & SCHROLL 2009). Ebenfalls in Frankreich ist die Organisation HIPPOTESE damit befasst, moderne Gerätschaften für den Pferdezug zu entwickeln und zu erforschen.

Seit Beginn der 2000er Jahre hat die Firma EQUI-IDEA in Verona, Italien, verschiedene moderne Einzelgeräte für den Pferdezug entwickelt. Dazu zählen neben einem Basis-Vorderwagen und einem hydraulischen Rundballen-Ladewagen auch verschiedene Geräte für die Bodenbearbeitung und die Beikrautregulierung sowie eine Walze zum Herunterfahren von Gründüngung und eine Farnwalze für den Forst (vgl. SCHROLL 2006, DUGAST 2010, SCHMIT 2010; s. Abbildung A-12 und Abbildung A-13 im Anhang).

Neben der bereits erwähnten sehr erfolgreichen Produktion von Vorderwagen durch Kurt OHRNDORF, gibt es in Deutschland inzwischen einige weitere Gerätehersteller. Norbert MÖLLER entwickelt seit Anfang der 2000er Jahre unter der Bezeichnung *Pferdezugtechnik Möller (PZT M)* einen in verschiedenen Versionen erhältlichen Vorderwagen sowie einen Holzrückewagen und weiteres Zubehör für den modernen Pferdeeinsatz (ANONYMUS 2006). Frank WAIBLER befasst sich ebenfalls seit Anfang der 2000er Jahre mit dem Bau diverser Vorderwagen und hat ein Baukastensystem entwickelt, in dem unterschiedliche Versionen eines Vorderwagens mit verschiedensten Anhängern kombiniert werden können. Zudem baut er das derzeit weltweit wohl einzige Gerät mit einem in vier Stufen schaltbaren Bodenantrieb für die Zapfwelle, der die Regelung der Zapfwelldrehzahl unabhängig von der Ganggeschwindigkeit der Pferde ermöglicht (HEROLD et al. 2009).

Die angeführten Beispiele moderner Zugpferdetechnik erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Zusammenfassend stellt sich die Situation pferdegezogener Technik in der Landwirtschaft heute so dar, dass neben der Verwendung alter Geräte aus der Zeit vor etwa 1960, zahlreicher Eigenkonstruktionen findiger Tüftler sowie verschiedenster Vorderwagen in Kombination mit für den Schlepperzug gebauten Gerätschaften, zunehmend mehr moderne Einzelgeräte für den Pferdezug eingesetzt werden. Da das Bewusstsein für den Einsatz von Arbeitspferden in Land- und Forstwirtschaft sowie in anderen Bereichen in den letzten Jahren deutlich gestiegen ist, dürfte der Anteil moderner Einzelgeräte für den Pferdezug weiter zunehmen. Dies wäre eine mit Blick auf die Effizienzsteigerung des Pferdeeinsatzes sinnvolle Entwicklung.

2.1.4.4 Pferdegezogene Mähtechnik

Als die wohl erste Tiergezogene bzw. -geschobene Mähmaschine kann der Gallische Mähwagen angesehen werden, der von PLINIUS 23 n. Chr. beschrieben wurde (vgl. Abbildung A-14 im Anhang). Dieses einachsige, aus Holz gefertigte Gerät diente zur Getreideernte und wurde von einem Ochsen oder Maultier geschoben. Am Vorderrand einer Auffangmulde war ein Kamm aus scharfen Holzzähnen angebracht, der durch die Vorwärtsbewegung die Halme unterhalb der Ähre abschnitt bzw. abriss, sodass die Ähren in die Mulde hineinfielen (EGGERT 1999).

Das Grünland wurde über Jahrhunderte hinweg vor allem mit der bereits im Frühmittelalter verwendeten Sense gemäht (LUDWIG & SCHMIDTCHEN 1997). Erste Bestrebungen der Mechanisierung des Mähens wurden im 19. Jhd. unternommen, vorwiegend mit rotierenden Sensen oder Sichel an einer vertikalen, von den Rädern der jeweiligen Maschine angetriebenen Welle. Der Erfolg dieser Maschinen war sehr bescheiden; erst die in den 1950er Jahren aufkommenden Kreisel- und Scheibenmäherwerke am Schlepper griffen das Prinzip des rotierenden Schneidwerks wieder auf (HEGE 1998).

1826 schließlich erfand der schottische Pfarrer Patrick BELL ein Mähwerk mit hin und her gehendem Messer und baute damit 1828 eine Getreidemähmaschine (SÖHNE 1992, EGGERT 1999). Diese Mähwerkstechnik wurde bis in die frühen 1830er Jahre hinein zum Fingerbalkenmäherwerk mit dreieckigen Klingen weiter entwickelt, mit dem dann auch der Grasschnitt möglich wurde. Ab den 1850er Jahren wurden pferdegezogene Mähgeräte für das Grünland entwickelt und 1859 baute der Amerikaner Walther A. WOOD den ersten so genannten (Gespann-)Grasmäher (WENDEL 1997, HEGE 1998). Der Grasmäher wurde weiter entwickelt und verbessert, man begann ab etwa 1910 damit, die Teile zu normieren, da man eine weitere Verbesserung für nicht möglich hielt. 1926 wurde als erste Norm im Bereich Landtechnik die DIN 1483 für die Messerklinge aufgestellt (HEGE 1998).

Die so entstandene Form des Grasmähers (s. Abbildung A-1 im Anhang), bei dem über die zunächst gusseisernen, später auch luftbereiften Laufräder und eine Kurbelstange ein Fingermähbalken angetrieben wurde, wurden z.T. bis weit in die zweite Hälfte des 20. Jhds. gebaut (KARLE 2007). Für die unterschiedlichen Anforderungen beim Mähen gab es drei verschiedene Mähbalken, den Hochschnitt- (auch Normalschnitt-), den Mittelschnitt- und den Tiefschnittbalken, die sich in der Anordnung der Finger und der Messer unterscheiden (SCHWEIGMANN 1993). Es gab diese Geräte mit verschiedenen Arbeitsbreiten von 1,05 m bis 1,50 m, wobei die kleineren Mähbalken oft mit einem Pferd oder mit zwei Zugrindern eingesetzt wurden, die größeren ab etwa 1,30 m Arbeitsbreite den Einsatz von zwei Pferden erforderten. Oft wurde ein Vorderkarren oder ein Stützrad unter dem Deichselansatz montiert, um die Deichsellast aufzufangen und den Tieren die Arbeit so zu erleichtern (DENCKER 1961). Die Antriebssysteme wurden mehrfach modifiziert, bis schließlich der Grasmäher mit Ölbadgetriebe als die am weitesten entwickelte Form entstand. Bei diesem ist das auf der Achse montierte Getriebe von einer Gehäusekapsel umgeben, in der die Zahnräder durch ein Ölbad laufen, sodass sie permanent geschmiert werden. Der Zugkraftbedarf wie auch der Verschleiß der Zahnräder werden dadurch deutlich verringert, was die Maschine leichtzügiger und langlebiger macht.

Die Einführung des pferdegezogenen Grasmähers bedeutete eine enorme Leistungssteigerung gegenüber dem Mähen mit der Sense. Mit dem von zwei Pferden gezogenen Grasmäher konnte eine Arbeitskraft nun $0,35 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ und mehr mähen, verglichen mit $0,04 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ mit der Sense (KTBL 1963). Beginnend in den 1920er Jahren wurde vereinzelt auf solche Geräte ein Hilfsmotor mit 2 - 2,5 PS zum Antrieb des Messerbalkens aufgebaut, der es ermöglichte, auch die größeren Mähbalken im Kuhzug oder mit einem anstelle von zwei Pferden einzusetzen ((SCHWEIGMANN 1993), SEGLER 1956). Die Messerbalken selber wurden dagegen nicht weiter entwickelt. Auch die Mähbalken an den sich später immer mehr durchsetzenden Schleppern wurden zunächst in Form des Fingermähbalkens mit einem Messer und starren Fingern gebaut, mit Arbeitsbreiten bis 1,80 m (SEGLER 1956, DENCKER 1961).

Ein entscheidender Nachteil aller Fingerbalken war stets das recht hohe Verstopfungsrisiko beim Mähen durch Maulwurfshügel oder durch einen Schwad sowie bei einer großen Aufwuchsmenge auf der Fläche. Das Gras setzt sich zwischen das Messer und die Finger und der Mähbalken blockiert. Um dies wieder zu beheben, muss angehalten und ein Stück zurückgesetzt werden, um dann mit Rechen, Gabel oder von Hand das Gras zu entfernen und den Balken wieder frei zu machen. Dieses häufige Anhalten und Zurücksetzen zermüht auf die Dauer die „Arbeitsmoral“ der Pferde. Hinzu kommt ein nicht unerhebliches Unfallrisiko für den Fuhrmann, wenn die Pferde während des Reinigens des Messerbalkens nicht still stehen.

Eine deutliche Verbesserung stellte diesbezüglich die Entwicklung des Doppelmesser-Mähwerks in den 1950er Jahren dar, bei dem sich anstelle der starren Finger ein zweites, gegenläufiges Messer befindet. Dadurch wird das Verstopfen nahezu unmöglich, das Messer arbeitet auch dann sauber, wenn es durch Erde oder durch einen Schwad läuft. Die zahlreichen Stopps zum Reinigen des Messers entfallen bei dieser Technik. Dies erleichtert nicht nur den Pferden die Arbeit, sondern erhöht auch die Flächenleistung und die Arbeitssicherheit. Allerdings wurden Doppelmesser nur für den Einsatz am Schlepper entwickelt, zunächst als Dreipunktgerät für den Heckanbau, später dann auch als Seiten- und als Frontmähwerk.

Nachdem verschiedentlich einige Tüftler alte Grasmäher mit einem für den Seitenanbau am Schlepper gedachten Doppelmessermähwerk aufgerüstet und hiermit recht positive Erfahrungen gemacht haben (z.B. SCHROLL 2001, STRÜBER 2003, WIEDENMANN 2003), wurde der verbreitete Einsatz von Doppelmessermähwerken im Pferdezug erst durch die Einführung von Vorderwagen ermöglicht. Neben dem Doppelmessermähwerk hat sich z.B. bei den von Frank WAIBLER gebauten Mähwerken der Superior-Messerbalken durchgesetzt, bei dem das Schneidgut durch ein Messer und sich gegenläufig dazu bewegende, geschärfte Finger geschnitten wird (WAIBLER 2013). Dieses Mähwerk arbeitet ebenfalls verstopfungsfrei, benötigt weniger Antriebsenergie und verfügt über längere Standzeiten als das Doppelmesser. Ein weiterer Vorteil ist, dass beim regelmäßig notwendigen Schärfen nur ein Messer geschliffen werden muss.

Sowohl das Doppelmesser-, als auch das Superior-Mähwerk werden über eine Zapfwelle angetrieben, benötigen für den Einsatz im Pferdezug also einen Vorderwagen mit boden- oder motorgetriebener Zapfwelle oder aber einen eigenen Motor. Erfahrungen zahlreicher Fuhrleute wie auch des Autors aus der praktischen Arbeit zeigen, dass die notwendige Antriebsenergie für dieses System sehr hoch ist. Dies wird durch die Untersuchungsergebnisse der vorliegenden Arbeit bestätigt. Eine Gruppe von Geräteentwicklern in Deutschland, Luxemburg und Italien ist zurzeit damit beschäftigt, ein modernes pferdegezogenes Mähwerk mit direktem Bodenantrieb analog zu den historischen Grasmähern zu entwickeln (SCHMIT 2011e).

Im Jahr 2012 hat die Firma *I&J* aus den USA bei den Horse Progress Days in Michigan ein neu entwickeltes Pferdemaßwerk mit Bodenantrieb und einem Doppelmesserbalken der deutschen Firma *ESM* vorgestellt (SCHROLL 2012). Dieses Mähwerk gibt es mit Arbeitsbreiten von 1,90 m und 2,30 m, ausgestattet für den ein- oder zweiseitigen Zug. Erste Tests in Deutschland haben gezeigt, dass das Gerät sehr leichtzünftig und auch bei 2,30 m Arbeitsbreite mit 2 Pferden gut zu arbeiten ist. Allerdings wurden diese Tests beim Nachmähen von Weideflächen und bei der Bearbeitung von Naturschutzflächen durchgeführt. Es bleibt abzuwarten, wie gut das Mähwerk bei der Heu- und Silageernte arbeitet und ob auch dann zwei Pferde für den Antrieb ausreichen, wenn die Erntemasse deutlich höher ausfällt als bei den Testdurchgängen (SCHROLL 2012).

2.2 Stand der Forschung zum landwirtschaftlichen Arbeitspferdeeinsatz

2.2.1 Umfang des Arbeitspferdeeinsatzes

Weltweit betrachtet spielen Zugtiere in der Landwirtschaft auch heute noch eine nicht zu unterschätzende Rolle. SMITH (1981) gibt an, dass fast 85 % der benötigten Zugkraft in der Landwirtschaft weltweit von Zugtieren geleistet wird. Bis zu 2 Milliarden Menschen sind weltweit von Zugtieren als hauptsächlicher Zugkraftquelle in der Landwirtschaft abhängig (DIJKMAN et al. 2000). In den so genannten Entwicklungsländern werden ca. 52 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche mit Zugtieren bewirtschaftet (SANSOUCY 1995), etwa 80 % der in der dortigen Landwirtschaft eingesetzten Energie stammen von Menschen und ihren Zugtieren (PEARSON 2005). In den entwickelten Ländern wurden in den 1990er Jahren immerhin noch 11 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche mit Zugtieren bewirtschaftet (SANSOUCY 1995). Je nach Schätzung sind 250 bis 500 Millionen Zugtiere weltweit im Einsatz, die jährlich bis zu 2 Milliarden t fossile Treibstoffe ersetzen (CHIRGWIN 1996, RAMASWAMY 1998, AGUIRRE & ORIHUELA 2000, STARKEY 2010).

In der jüngsten Veröffentlichung mit Angaben zum weltweiten Stand des Zugtiereinsatzes von STARKEY (2010) wird der Zugtierbestand weltweit auf 200 - 250 Mio. Tiere geschätzt und herausgearbeitet, dass es Regionen mit zunehmendem (vor allem Afrika südlich der Sahara, aber auch Teile Europas und der USA), stagnierendem (vor allem in Lateinamerika, Indien, Nord- und Südafrika, Teile Europas) und abnehmendem (in vielen Regionen Asiens, in Osteuropa etc.) Zugtiereinsatz gibt. Während die Bestandsveränderungen in den so genannten Entwicklungsländern jeweils mehrere 100.000 bis einige Millionen Tiere umfassen und somit als fundamental zu bezeichnen sind - in manchen Gegenden Afrikas hat sich der Zugtiereinsatz in den letzten Jahrzehnten verfünffacht, so dass heute bis zu 90 % aller Bauern dort Zugtiere einsetzen - liegen die Zahlen in den entwickelten Ländern eher im 1.000er (Europa) bis 100.000er Bereich (USA) und die Entwicklung betrifft nur einen sehr kleinen Teil der gesamten Landwirtschaft. Vor dieser Veröffentlichung kursierten in vielen Publikationen die von RAMASWAMY (1983) in einem für die FAO erstellten Bericht aufgelisteten Schätzungen für verschiedene Länder in Asien, Afrika, Lateinamerika sowie die Türkei, die die Anzahl der Zugtiere mit insgesamt 323,1 Mio. angibt. STARKEY (2010) weist darauf hin, dass diese Zahlen z.T. fehlerhaft und die Quellenlage recht dünn waren, und dass einige Regionen der Erde in der Auflistung fehlen. Dennoch betont auch er die große Bedeutung, die der Zugtiereinsatz nach wie vor und wohl auch in Zukunft in den Entwicklungs- und Schwellenländern hat.

In den USA sind es vor allem die Amish, die ausschließlich Pferde zur Feldarbeit einsetzen (STARKEY 2000, 2005 u. 2010, LHOSTE 2005), aber zunehmend auch so genannte „Small Farmers“, die eine Alternative zur „Mainstream-Landwirtschaft“ mit dem Zwang zum „Wachsen oder Weichen“ suchen. Experten schätzen, dass in den USA inzwischen wieder etwa 200.000 Menschen Arbeitspferde einsetzen, Tendenz auch hier steigend (KENDELL 2003).

Zur aktuellen Situation des Zugpferdeeinsatzes in Europa gibt es keine umfassenden Zahlen. In einigen europäischen Ländern hat das Arbeitspferd in der Landwirtschaft z.T. bis heute eine wesentliche Bedeutung behalten. So gibt NISSEN (1999) an, dass in Polen bis 1998 ca. 80 % aller Pferde Kaltblutpferde waren. Auch in Teilen Russlands ist gemäß demselben Autor das Kaltblutpferd bis heute in der Landwirtschaft unentbehrlich. Nach dem Beitritt einiger osteuropäischer Staaten zur Europäischen Union ist jedoch zu erwarten, dass die Pferdezahlen dort rapide abnehmen werden, da die vielen kleinen und Kleinst-Betriebe wenigen großen Betrieben weichen werden. Dieser Prozess hat in einigen Ländern bereits begonnen und führt aufgrund fehlender beruflicher Alternativen für die ehemaligen Klein- und Kleinstbauern zu massiven sozialen Problemen (TILLAK 2000, SCHROLL 2004, STARKEY 2004, DANNENBERG 2007, BAUM 2012; vgl. auch HEROLD 2004). MEYER (1997) untersuchte im Rahmen einer Semesterarbeit die Arbeitspferdehaltung der Mitglieder der „Interessengemeinschaft Arbeitspferde“ in der Schweiz und konnte insgesamt 235 Pferde auf 66 Betrieben feststellen, von denen 65 % Vollerwerbsbetriebe waren. Auf 76 % der Betriebe wurden durchschnittlich 3,7 Pferde pro Betrieb ganzjährig zur Arbeit eingesetzt, auf 39 % aller Betriebe sogar täglich und auf der Hälfte dieser Betriebe wiederum bis zu 8 h pro Tag und mehr.

GEILE & SCHULZE (1992) haben im Rahmen einer Diplomarbeit eine Fragebogenaktion durchgeführt und dabei 162 Fragebögen verschickt, von denen 28 auf landwirtschaftliche und 27 auf gärtnerische Betriebe entfielen. Die übrigen Fragebögen wurden an Rücke- und Planwagenbetriebe, Brauereien und Kommunen verschickt. Der Rücklauf betrug in allen Bereichen etwa 50 %. In den 14 landwirtschaftlichen Betrieben, die geantwortet haben, werden im Durchschnitt 1 bis 3 Pferde mit einem Einsatzumfang von 920 h pro Pferd und Jahr in den Vollerwerbs- und 1050 h pro Pferd und Jahr in den Nebenerwerbsbetrieben eingesetzt.

Bei einer Umfrage der „Interessengemeinschaft Zugpferde e.V.“ in Deutschland im Jahre 2006 konnten 73 Betriebe mit landwirtschaftlichem Arbeitspferdeeinsatz festgestellt werden (HEROLD 2007). Von diesen Betrieben waren 51 ökologisch wirtschaftende Betriebe, davon 37 Haupterwerbsbetriebe. Insgesamt lag die Zahl der Haupterwerbsbetriebe bei 42. Der Umfang des Pferdeeinsatzes lag bei 32 Betrieben zwischen 100 h und 500 h pro Jahr, 16 Betriebe gaben an, die Pferde mehr als 500 h pro Jahr einzusetzen.

GLOVER et al. (2011) ermittelten in einer Umfrage in Deutschland im Jahr 2010 43 Betriebe mit landwirtschaftlichem Arbeitspferdeeinsatz, die insgesamt 144 Arbeitspferde bei einem durchschnittlichen Besatz von 3,43 Arbeitspferden pro Betrieb einsetzten. 58 % der Pferde einsetzenden Betriebe waren Biobetriebe, der Anteil der Haupterwerbsbetriebe an allen Pferde einsetzenden Betrieben betrug 55,8 %. Mit steigender Betriebsgröße nahmen der Anteil Haupterwerbsbetriebe sowie die Schlaggrößen und die Anzahl der eingesetzten Pferde zu, der Pferdebesatz je ha jedoch ab. Der Umfang des Pferdeeinsatzes betrug im Durchschnitt 425 h pro Jahr.

2.2.2 Arbeitsleistung der Zugtiere

Angesichts der großen Bedeutung des Zugtiereinsatzes in den so genannten Entwicklungs- und Schwellenländern wird vor allem in diesen Ländern nach wie vor entsprechende Forschung betrieben. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind aufgrund der oftmals gänzlich verschiedenen Voraussetzungen jedoch nur sehr bedingt auf die hiesige Landwirtschaft übertragbar. Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich daher in erster Linie auf Europa und die USA sowie im Besonderen auf Deutschland und die angrenzenden Länder.

Von Ende des 19. Jahrhunderts an bis in die 1960er Jahre hinein wurden in Europa zahlreiche Untersuchungen an und mit Arbeitspferden durchgeführt (vgl. RIJN 1929, MUNCKEL 1930, BLECHSCHMIDT 1935). Schwerpunkte der bis zum Ende der „Hochzeit“ des Arbeitspferdeeinsatzes durchgeführten Untersuchungen waren neben dem Zugkraftvermögen der Pferde und den Faktoren, die hierauf einen Einfluss haben, vor allem auch Fragen der Fütterung sowie später der Rationalisierung des Pferdeeinsatzes. Die zunächst letzten wissenschaftlichen Arbeiten dieser Art wurden um 1960 verfasst. Erste, vereinzelte Beiträge finden sich dann wieder ab den 1980er Jahren. Aber erst ab etwa der zweiten Hälfte der 1990er Jahre und verstärkt in den letzten 10 Jahren ist ein wachsendes Interesse der hiesigen Wissenschaft am Arbeitspferdeeinsatz zu spüren.

2.2.2.1 Zugkraft der Zugtiere

Zugleistungsprüfungen sind je nach Art und Durchführung auf die Ermittlung der Höchst- oder der Dauerzugleistung ausgelegt. Höchstzugleistungsprüfungen dienen dazu, das kurzzeitige maximal Zugkraftvermögen eines Pferdes oder Gespannes festzustellen. Dieses Vermögen entscheidet z.B. darüber, ob ein Wagen oder eine Maschine aus dem Stand angezogen werden kann. Dauerzugleistungsprüfungen untersuchen dagegen die für die tägliche Arbeit interessantere Frage nach der Höhe der möglichen Dauerbelastung über viele Stunden. Die Ergebnisse der Höchstzugleistungsprüfungen sind somit ein Kriterium, die Tiere einer Population nach Leistungsfähigkeit zu gruppieren und auf die besten Tiere zu selektionieren. Die Dauerzugleistungsprüfung hingegen lässt lediglich Aussagen über die Gebrauchsfähigkeit, sprich die Erfüllung von gesetzten Mindestanforderungen des geprüften Tieres zu (KRÜGER 1938). Bei beiden Prüfungsformen kann grundsätzlich unterschieden werden zwischen so genannten *Gebrauchsprüfungen*, die in Anlehnung an den täglichen Einsatz der Pferde in Form von unterschiedlichen Wettbewerben durchgeführt wurden, und *wissenschaftlichen Versuchsanstellungen*.

Hinsichtlich der Gebrauchsprüfungen entwickelte sich im damaligen Deutschen Reich ein umfangreiches Prüfungswesen, das ab 1927 staatlich anerkannt wurde (BUHLE 1929c, MEYER 1939, BRUNNER 1942, KRÜGER 1957). Zuständig für Planung und Durchführung war der „Reichsverband der Kaltblutzüchter Deutsch-

lands e.V.“ mit Sitz in Berlin, der ab 1938 den Namen „Reichsverband für Zucht und Prüfung deutschen Kaltbluts e.V.“ erhielt. Am 01.01.1931 trat die Leistungsprüfungsordnung (LPO) in Kraft (ANONYMUS 1936a; MEYER 1940, S. 42, gibt den 01.01.1930 als erstmaligen Herausgabetermin der LPO an).

Höchstzugleistungsprüfungen wurden ab Herbst 1927 in großer Zahl am eigens dafür vom Reichsverband angeschafften amerikanischen Zugkraftmesswagen nach Collins und Caine (vgl. COLLINS & CAINE 1926) durchgeführt (vgl. STEDING 1927/28). Anlass dieser Prüfungen waren meist Zuchtveranstaltungen, DLG-Schauen u.ä. Bei diesen Prüfungen wurden die Pferde im Zweigespann geprüft und dazu in drei Gespanngewichtsklassen eingeteilt: Klasse I = Gespanngewicht bis 24 Zentner (= 1.200 kg), Klasse II = Gespanngewicht von 24 bis 28 Zentner (= 1.200 kg bis 1.400 kg) und Klasse III = Gespanngewicht über 28 Zentner (= 1.400 kg) (MEYER 1940). Nach MOORE (1998) kann die am Zugkraftmesswagen von Collins & Caine ermittelte Leistung in PS berechnet werden, indem man die Hälfte der geleisteten Zugkraft (in lbs. = Pounds, 1 lb. = 0,45359 kg) durch die zehnfache Zeit (in sec.), die für die 8,4 m lange Teststrecke benötigt wird, teilt:

$$\text{Leistung [PS]} = 0,5 * \text{Zugkraft [lbs.]} * 0,1 * \text{Zeit für 8,4 m [sec.]}$$

Wird die Zugkraft in N gemessen und das Ergebnis in kW angegeben ergibt sich durch entsprechende Umrechnung die Formel:

$$\text{Leistung [kW]} = 0,5 * \text{Zugkraft [N]} * 0,602 * \text{Zeit für 8,4 m [sec.]; mit 1 lb. = 4,45 N, 1 PS = 0,74 kW}$$

Nach BUHLE (1927/28) haben die in den USA seit 1923 stattfindenden Messungen mit diesem Wagen ergeben, dass von einem Zweispänner regelmäßig 20 PS - 25 PS (= 14,7 kW - 18,4 kW) über 10 sec. geleistet werden. COLLINS & CAINE (1926) geben als Höchstleistungen ihrer Untersuchungen für einen Zweispänner 29,76 PS (= 21,9 kW) an. Ein gut trainiertes Pferd könne eine kurzzeitige Überlastung von mehr als 1.000 % generieren, was kein anderer Motortyp könne (ebd.).

KRÜGER (1957) nennt Zugkraft-Höchstwerte aus Prüfungen in Deutschland, Frankreich und den USA von bis zu 900 kg (= 8.829 N) je Pferd. MEYER (1940, S. 36) gibt die erzielte deutsche Bestleistung bei der Prüfung von bis dato ca. 3.000 geprüften Kaltblutpferden mit „365 Zentner über die Strecke von 8,4 m“ in Klasse III (Gespanngewicht über 1.400 kg) an. D.h., das betreffende Gespann hat eine Zugkraft von 1.825 kg (= 17.903 N) über die gesamte Prüfungsdistanz von 8,4 m geleistet. Da keine Angaben zur benötigten Zeit gemacht werden, lässt sich die entsprechende Leistung in kW in diesem Fall nicht berechnen.

Hinsichtlich der Bewertung der Höchstzugleistungen für die praktische landwirtschaftliche Arbeit mit Zugpferden ist zu bemerken, dass nach PETZOLD (1952) solche Höchstbelastungen im Jahresverlauf lediglich 1 % der Gesamtjahresarbeit ausmachen.

Die Dauerzugleistungsprüfungen waren nach Dauer und Wegstrecke unterteilt in:

- Kurzstreckenprüfungen für 3-jährige Kaltblutpferde
- Mittelstreckenprüfungen für 4-jährige und ältere Kaltblutpferde; Streckenlängen 24 km und 36 km
- Langstreckenprüfungen für 4-jährige und ältere Kaltblutpferde als Tagesprüfungen über 60 km, Zweitageprüfungen über 100 km und Dreitageprüfungen über 150 km

Die zu bewegende Last bei diesen Prüfungen war je nach Prüfungsart unterschiedlich und reichte bis zum Vierfachen des Pferde- bzw. Gespanngewichts. Die Prüfungen waren entweder reine Schrittprüfungen, oder in Schritt- und Trabstrecken unterteilt, wobei für beide Gangarten eine erlaubte Höchstzeit - somit eine gewisse Mindestgeschwindigkeit - vorgeschrieben war (ANONYMUS 1936b).

Ab 1936 kamen zu den Dauerzugleistungsprüfungen, die alle auf befestigten Wegen durchgeführt wurden, Geländezugleistungsprüfungen hinzu (ANONYMUS 1937, MEYER 1940). Hintergrund dafür war die militärische Nutzung der Pferde, vor allem zum Ziehen schwerer Geschütze (MEYER 1939, BRUNNER 1942; vgl. auch BUHLE 1925).

Exemplarische Bestleistungen aus den Dauerzugleistungsprüfungen aus dem Jahre 1937 führt MEYER (1940) an. So erreichte ein Gespann auf einer 24 km langen Schrittprüfung eine Durchschnittsgeschwindigkeit von $8,2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bei einer Last, die dem vierfachen Gespanngewicht entsprach. Bei einer Eintagesprüfung über 60 km und einer gezogenen Last von 3 t wurde eine Durchschnittsgeschwindigkeit von $7,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ im Schritt erzielt, bei einer Dreitagesprüfung über 150 km immer noch eine Durchschnittsgeschwindigkeit von $6,8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Bei den Geländezugleistungsprüfungen wurden bei einer gezogenen Last von 3,25 t auf fester Straße Geschwindigkeiten von $8,1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ im Schritt und $22,4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ im Trab sowie auf der Geländestrecke von ebenfalls $8,1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ im Schritt und $19,4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ im Trab erzielt.

Neben diesen Gebrauchsprüfungen wurden auch wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt, die sich hauptsächlich oder ausschließlich dem Zugvermögen der Pferde widmeten. TÄNZER (1928) hat zu den frühen Versuchsanstellungen dieser Art eine umfangreiche Übersichtsarbeit angefertigt.

Eine der bekanntesten dieser Arbeiten stellt RIJN (1929) dar, der mittels eines Göpels das Dauer- und Hochleistungs-Zugkraftvermögen unterschiedlich schwerer Pferde untersuchte. Tendenziell zeigte sich bei diesen Versuchen, dass schwerere Pferde eine höhere Zugleistung erbringen können als leichtere. Allerdings belegen die Ergebnisse auch, dass neben dem Körpergewicht auch andere Faktoren wie Trainingszustand, Temperament, Psyche, Zugwille u.a. eine Rolle spielen. Eine Feststellung, die auch von anderen Autoren getroffen wird (z.B. TÄNZER 1928, MUNCKEL 1930, KRÜGER 1947).

TEICHMANN (1928) untersuchte sowohl das Zugleistungsvermögen verschiedener Tierarten und -rassen, als auch den Zugkraftbedarf verschiedener landwirtschaftlicher Arbeitsgeräte. Bei den untersuchten Pferden ergaben sich mit zunehmendem Körpergewicht Dauerzugleistungen von 1,1 PS bis 1,5 PS (= 0,81 kW bis 1,11 kW). Die Höchstleistungen, gemessen über 200 m, reichen von 5,03 PS (= 3,70 kW) bei den mittelschweren Pferden (600 kg Körpergewicht) über 6,96 PS (= 5,13 kW) bei den schweren (750 kg) zu 8,20 PS (= 6,04 kW) bei den leichten Pferden (500 kg). Hier spielte die Arbeitsgeschwindigkeit eine große Rolle, denn der Autor stellt fest, dass die leichteren Warmblutpferde sich „... mit möglichst hoher Geschwindigkeit (...) der Last zu entledigen“ versuchen und dadurch eine hohe Leistung erzielen, während die schwereren Kaltblüter „... a conto ihres Phlegmas“ geringere Leistungen generieren (TEICHMANN 1928, S. 27). Der Autor stellt den ermittelten Höchstzugleistungen Ergebnisse aus anderen, nicht näher bezeichneten Versuchen gegenüber, die von 8,6 PS bis 14,88 PS reichen (= 6,34 kW bis 10,97 kW), allerdings jeweils über kurze Strecken bis 15 m. Aus anderen Versuchen zitiert TEICHMANN (1928) belegte Dauerzugleistungen von Kaltblutpferden über 12 km lange Prüfungsstrecken von bis zu 3 PS (= 2,2 kW) und Tagesdauerleistungen von bis zu 1,9 PS (= 1,4 kW) je Pferd. Er folgert, „... dass man von einem Pferd von 600 kg Gewicht, ..., eine mittlere Höchsttagedauerleistung von 1,4 PS [= 1,03 kW, Anm.] wird annehmen können, ohne dass dabei die für die Eigenfortbewegung nötige Kraft mit einberechnet wird“ (TEICHMANN 1928, S. 37-38). Eindeutiges Fazit für den Autor ist, dass für den tatsächlichen Arbeitseinsatz der Pferde die Dauerzugleistung eine größere Bedeutung hat als die Höchstzugleistung, und dass, je nach zu verrichtender Arbeit, den der Leistung zugrunde liegenden Parametern Zugkraft und Geschwindigkeit eine unterschiedlich hohe Bedeutung zukommt. Somit hätten sowohl schwere als auch leichte Pferde ihre volle Daseinsberechtigung, da es für beide Formen Arbeiten im landwirtschaftlichen Betrieb gibt, für die die eine Form besser geeignet ist als die andere.

2.2.2.2 Zugkraftbedarf landwirtschaftlicher Maschinen und Geräte

Wesentliche Parameter hinsichtlich des Einsatzes von Zugtieren nicht nur in der Landwirtschaft sind der Zugkraftbedarf der eingesetzten Maschinen und Geräte und die Frage, mit welchen Zugtieren dieser am effektivsten gedeckt werden kann. TEICHMANN (1928) wie auch KRÜGER (1947) weisen auf die grundsätzliche Problematik der Bestimmung des Zugkraftbedarfes von Maschinen und Geräten hin. Denn dieser hängt nicht nur vom Gerät, sondern von den verschiedenen Umgebungsparametern wie Bodenart und -feuchte, Topographie, Beschaffenheit des Erntegutes, Einsatzzeitpunkt etc. ab. Dies erschwert die Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Untersuchungen, zumal in den älteren Arbeiten hierzu oftmals nur sehr ungenügende oder auch gar keine Angaben gemacht werden. Hinzu kommen die Schwankungen des Zugkraftbedarfes, die eine hohe Frequenz aufweisen und erhebliche Anforderungen an die einzusetzende Messtechnik stellen. Bereits MARTINY (1911) weist in seiner theoretischen Abhandlung über die „Zugkraftmessung an Bodenbearbeitungsgeräten“ auf diese Problematik hin.

Bei den in den zahlreichen Arbeiten untersuchten landwirtschaftlichen Geräten reicht der mittlere Zugkraftbedarf meist von ca. 50 kg bis 800 kg (entsprechend etwa 490 N bis 7.848 N), wobei sich die meisten Geräte zwischen etwa 100 kg und 300 kg (981 N bis 2.943 N) bewegen (vgl. z.B. TEICHMANN 1928, S. 71, KRÜGER 1947, S. 72-76, PAPENDIECK 1958, S. 13). Die Ergebnisse zeigen, dass der Zugkraftbedarf eines Gerätes mit zunehmender Arbeitsbreite steigt und dass die Geräte zur Bodenbearbeitung und für die Ernte allgemein einen höheren Zugkraftbedarf haben als die übrigen Geräte. Bei Fuhrwerken hängt der Zugkraftbedarf neben dem Gelände (Beschaffenheit des Untergrundes und Topographie) vom Gesamtreibungsfaktor ab, der durch das Gewicht, die Konstruktion und die Beladung des Fuhrwerks bedingt ist. Je geringer dieser Faktor ist, desto geringer ist der Zugkraftbedarf (BUHLE 1923).

KRÜGER (1947) weist eine interessante Methode auf, verschiedene Gerätschaften in ihrem Zugkraftbedarf miteinander zu vergleichen. Dazu wird der gemessene Zugkraftbedarf k [kg] durch Division mit der tatsächlichen Arbeitsbreite [m] zum Zugkraftbedarf pro Meter Arbeitsbreite ($=Z$ [kg]) umgerechnet. Da man bei einer tatsächlichen Arbeitsbreite von 1 m pro Hektar insgesamt 10.000 m Wegstrecke zurücklegen muss (1 ha = 10.000 m²), ergibt sich für die geleistete Arbeit A pro m Arbeitsbreite und Hektar:

$$A_{[\text{kgm} * \text{ha}^{-1}]} = Z * 10.000$$

Da

$$1 \text{ PS} = 75 \text{ kg} * 1 \text{ m} * \text{sec.}^{-1} = 75 \text{ kgm} * \text{sec.}^{-1}$$

und

$$1 \text{ PSh} = 75 \text{ kg} * 1 \text{ m} * \text{sec.}^{-1} * 3.600 \text{ sec.} = 270.000 \text{ kgm}$$

beträgt der Arbeitsaufwand pro Meter Arbeitsbreite und Hektar in PSh/ha:

$$\begin{aligned} A_{[\text{PSh} * \text{ha}^{-1}]} &= Z_{[\text{kg}]} * 10.000 \text{ m} * \text{ha}^{-1} * (270.000 \text{ kgm} * \text{PSh}^{-1})^{-1} = Z * (1 : 27) \text{ PSh} * \text{ha}^{-1} \\ &= Z * 0,037 \text{ PSh} * \text{ha}^{-1} \end{aligned}$$

In heute gültige Einheiten übertragen ergeben sich folgende Formeln:

$$1 \text{ kW} = 1,36 * (75 \text{ kg} * 9,81 \text{ N} * \text{kg}^{-1} * 1 \text{ m} * \text{sec.}^{-1}) = 1.000,62 \text{ Nm} * \text{sec.}^{-1},$$

mit $1 \text{ kW} = 1,36 \text{ PS}$ und $1 \text{ kg} = 9,81 \text{ N}$

und

$1 \text{ kWh} = 1.000,62 \text{ Nm} \cdot \text{sec.}^{-1} \cdot 3.600 \text{ sec.} = 3.602.232 \text{ Nm}$

Pro Meter Arbeitsbreite und Hektar ergibt sich somit ein Arbeitsaufwand von:

$$A_{[\text{kWh} \cdot \text{ha}^{-1}]} = Z_{[\text{N}]} \cdot 10.000 \text{ m} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot (3.602.232 \text{ Nm} \cdot \text{kWh}^{-1})^{-1} = Z \cdot 0,0028 \text{ kWh} \cdot \text{ha}^{-1}$$

In dem man diese Angaben mit der möglichen Arbeitsleistung der Zugtiere (s.u.) verrechnet, lässt sich für jedes Gerät überschlagen, wie viel Fläche pro Tag maximal bearbeitet werden kann. Dadurch kann die Zugarbeit und die zur Bewältigung notwendige Anzahl Pferde für verschiedene Arbeitsgänge - und durch die Kombination der notwendigen Arbeitsgänge wiederum für ganze Kulturen - berechnet werden. Da auch für Schlepper bekannt ist, welche Arbeit sie leisten können - 1944 waren es laut KRÜGER (1947) 2 PSh/PS - lässt sich die Zugarbeit von Schlepper und Pferd so direkt vergleichen.

2.2.2.3 Arbeitsleistung der Zugtiere im landwirtschaftlichen Einsatz

Zunächst bis in die 1960er Jahre hinein hat es zahlreiche Untersuchungen über den tatsächlichen Einsatz von Arbeitspferden in der Landwirtschaft und die dabei zu verzeichnenden Aufwendungen und Leistungen gegeben. Neben dem Zugvermögen der Pferde und den diesbezüglichen Anforderungen der eingesetzten Geräte spielen bei diesen Arbeiten vor allem der Zeitbedarf bzw. die erzielbare Flächenleistung der verschiedenen Arbeitsgänge sowie die Frage nach einer möglichst effizienten und arbeitswirtschaftlich sinnvollen Haltung, Pflege und Fütterung der Pferde eine große Rolle.

Solche Arbeiten wurden auch zahlreich mit Zugrindern durchgeführt, die vor allem in der Landwirtschaft der Mittelgebirgslagen sowie in den weniger wohlhabenden Gebieten meist eine größere Rolle als Zugtiere besaßen als Pferde, da sie kostengünstiger zu halten und zu füttern waren und zudem noch Milch und Fleisch als zusätzliche Einkommensquellen lieferten. Vielfach finden sich auch Arbeiten, in denen Pferde- und Rinderanspannung miteinander verglichen werden. Beispiele für Arbeiten über Zugrinder, auf die im Folgenden nicht näher eingegangen wird, sind z.B. SPANN (1925), DÖHRMANN (1929), TEIPEL (1949) und GRABISCH (1953). Da in vielen Ländern der so genannten 3. Welt die Anspannung von Rindern und anderen Tierarten (Esel, Kamele, Büffel etc.) bis heute eine wesentliche Rolle spielt, finden sich hierzu bis heute zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten. Beispiele hierfür sind CLAR (1991), JABBAR (1993), LAWRENCE & PEARSON (1999), PONCE CEBALLOS et al. (2000), um nur einige zu nennen.

Da die angewandten Erhebungs- und Berechnungsmethoden der Arbeiten über den Einsatz von Arbeitspferden in der Landwirtschaft sehr vielfältig waren, sind die Ergebnisse verschiedener Arbeiten schwer vergleichbar. PETZOLD (1952, S. 2) weist darauf hin, dass sich die tatsächliche Nutzungsleistung landwirtschaftlicher Arbeitspferde grundsätzlich nur sehr schwer wissenschaftlich erfassen lässt, da „... Ablauf und Größe der vollbrachten Zugarbeit in der Landwirtschaft großen Schwankungen unterworfen sind“. Zudem setzt sich die Zugarbeit aus drei Parametern zusammen: der geleisteten Zugkraft, dem dabei zurückgelegten Weg und der dafür benötigten Zeit resp. der dabei entwickelten Arbeitsgeschwindigkeit. Eine bestimmte erzielte Leistung kann sowohl aus annähernd gleichen oder aber auch aus sehr unterschiedlichen Anteilen dieser drei Faktoren bestehen (FISCHER 1952). Wird daher bei verschiedenen Untersuchungen nur die jeweilige Gesamtleistung angegeben, so lassen sich diese Arbeiten nur eingeschränkt miteinander vergleichen.

Auf ein weiteres Problem vieler Arbeiten weist BLECHSCHMIDT (1935) hin. Die meist in Form der Gespannleistung ermittelte Leistung kann nicht einfach durch die Anzahl Pferde im Gespann geteilt werden, um die Leistung des Einzelpferdes zu ermitteln. Entsprechende Versuche zeigten deutlich, dass die Leistungen der Pferde in einem Gespann sehr unterschiedlich sein können. Zudem kommt es im Gespann immer zu Leistungsverlusten, da die Pferde nicht synchron arbeiten. Diese Verluste beziffert KRÜGER (1957) mit 10 - 20 % beim Zweispänner und 10 - 30 % beim Dreispänner.

Trotz dieser methodischen Schwierigkeiten gibt es zahlreiche Arbeiten, die sich aus unterschiedlichen Blickwinkeln der Arbeitsleistung von Arbeitspferden widmen. „Das Zugpferd und seine Leistungen“ von BUHLE (1923) ist ein, wenn nicht *das* Standardwerk der damaligen Zeit. Es beleuchtet die Leistungsfähigkeit des Arbeitspferdes unter sehr verschiedenen Aspekten und erklärt dabei auch die vielfältigen Abhängigkeiten der Leistungsfähigkeit eines Pferdes von verschiedenen Körperparametern wie auch von der gezogenen Last, der Umgebung, der Beschirrung und Anspannung etc. bis hin zur Persönlichkeit des Fuhrmanns. So kann ein schwereres Pferd zwar tendenziell größere Lasten bewegen als ein leichteres, allerdings spielen neben dem Körpergewicht auch andere Faktoren wie Futter- und Trainingszustand, Körperform und Knochenbau (vgl. auch DÖHRMANN 1929, BUHLE 1930, WEHNER 1944) sowie Psyche und Temperament (z.B. KRÜGER 1957 u. 1958) eine große Rolle, die den Gewichtsfaktor durchaus kompensieren können. Folge ist, dass durch die vielfältigen Wechselbeziehungen der genannten Parameter eine eindeutige Aussage zur Leistungsfähigkeit eines bestimmten Pferdes, „... womöglich in Zahlen, ... schwer zu geben (ist)“ (BUHLE 1923, S. 27, vgl. auch KRÜGER 1957).

COLLINS & CAINE (1926) ermittelten in ihren umfangreichen Untersuchungen u.a., dass ein Zugpferd etwa 10 - 12 % seines Körpergewichtes als durchschnittliche Zugkraft über den ganzen Tag aufbringen und dabei eine Strecke von bis zu 20 Meilen (= 32,2 km) zurücklegen kann, ohne dadurch überfordert zu werden. Sind Arbeitszeit und/oder Wegstrecke kürzer, kann die aufgebrauchte Zugkraft entsprechend größer sein. Auch wenn sich vereinzelt höhere Angaben finden, so hat sich in der Literatur allgemein die Angabe von 10 - 15 % des Körpergewichtes als durchschnittliche Zugkraftleistung über einen Arbeitstag durchgesetzt (z.B. RIJN 1929, KRÜGER 1958, GOE 1983, SASIMOWSKI 1987, HOFFMANN 1992, INNS 1996).

Zwischen aufgewandter Zugkraft und erzielter Arbeitsgeschwindigkeit gibt es Wechselwirkungen. Nach Ergebnissen von ZÜRN (o.J.; zit. in BUHLE 1923) sinkt mit zunehmender Arbeitsgeschwindigkeit die Zugkraft, die ein etwa 600 kg schweres Pferd aufbringen kann, von 80 kg (= 785 N) bei $0,6 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ (= $2,16 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) auf 13 kg (= 128 N) bei $2,1 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ (= $7,56 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). Allerdings gibt es nach KRÜGER (1957) auch Pferde, die auf einen zunehmenden Zugkraftbedarf mit einer Steigerung der Arbeitsgeschwindigkeit reagieren. Allgemein hängt die realisierbare Arbeitsgeschwindigkeit sehr stark vom Temperament des jeweiligen Pferdes ab. Bzgl. der Kombination aus Zugkraft und Geschwindigkeit bestehen zudem rasse- bzw. typbedingte Unterschiede. So weist BIRLENBACH (1994) in ihrer Arbeit nach, dass die maximale Zugkraftleistung bei Kaltblütern in einem geringeren Geschwindigkeitsbereich erbracht wird als bei Vollblütern. Ihre Schlussfolgerung: Zugpferderassen sind darauf gezüchtet, hohe Zugkräfte mit geringerer Geschwindigkeit zu erbringen, wohingegen Vollblüter höhere Geschwindigkeiten bei geringeren Zugkräften umsetzen (s.a. BIRLENBACH POTARD et al. 1998). KRÜGER (1957, S. 308) folgert dementsprechend für die tägliche Arbeit: „Das schwere Zugpferd kommt bei großer Zugkraft und längeren Strecken mehr zur Geltung. Bei kleinen Zugkräften ist das Laufpferd infolge größerer Geschwindigkeit im Vorteil.“

Für die Betrachtung landwirtschaftlicher Arbeiten ist die mögliche Tagesarbeitsleistung der Zugtiere von Interesse (vgl. Kap. 2.2.2.2). KRÜGER (1957, S. 301) fasst die Ergebnisse eigener Erhebungen sowie der verschiedener anderer Autoren zusammen und gibt an, dass Großpferde in der Lage sind, „... dauernd 2 Mill. mkg [= 2 Mio. kgm, Anm.] je Tag bei durchschnittlichen Zugkräften von 80 bis 150 kg [= 785 N bis 1.472 N; gemeint ist je Pferd, Anm.] und bei Geschwindigkeiten von $0,9$ bis $1,2 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ [= $3,24 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bis

4,32 km * h⁻¹, Anm.] zu leisten“. Auch PETZOLD (1952) gibt Tagesleistungen im Bereich von 2 Mio. kgm an, bei durchschnittlichen Zugkraftwerten von 123 kg bis 140 kg (= 1.206 N bis 1.373 N).

Andere Arbeiten wie z.B. KRÜGER (1947) geben die Ergebnisse ihrer Untersuchungen in PSh an. Bei einer Dauerzugleistung von 1 PS bis 1,25 PS (= 0,736 kW bis 0,92 kW) inklusive der für die Eigenfortbewegung benötigten Energie sowie bei einer Tagesarbeitszeit von zehn Stunden folgert er eine mögliche Tagesleistung von 10 PSh bis 12,5 PSh. Allerdings müssen hier die Leerlaufzeiten innerhalb der zehn Arbeitsstunden abgezogen werden, die nach DENCKER (1936, zit. in KRÜGER 1947) bis zu 40 % betragen können. Daher dürften die tatsächlichen Tagesleistungen eher in dem Bereich von 6,5 PSh bis 7,2 PSh liegen, mit denen KRÜGER (1947) andere Autoren zitiert.

Die Maßeinheiten kgm und PSh lassen sich wie folgt miteinander vergleichen (KRÜGER 1947, s.o.):

$$1 \text{ PS} = 75 \text{ kg} * 1 \text{ m} * \text{sec.}^{-1} = 75 \text{ kgm} * \text{sec.}^{-1}$$

und

$$1 \text{ PSh} = 75 \text{ kg} * 1 \text{ m} * \text{sec.}^{-1} * 3.600 \text{ sec.} = 270.000 \text{ kgm}$$

Somit entsprechen die von KRÜGER (1947) angegebenen Tagesleistungen 1,76 Mio. kgm (bei 6,5 PSh) bzw. 1,94 Mio. kgm (bei 7,2 PSh) und sind damit etwas geringer, als die Angaben der übrigen Autoren.

Vor allem in der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg, als die Motorisierung der Landwirtschaft schon im Gange war, war der Einsatz von Klein- anstelle von Großpferden in Ergänzung zum Schlepper recht populär. PAPENDIECK (1958, S. 16) zeigt auf, dass vor allem die größeren Rassen - namentlich Haflinger und Norweger - „... auf allen normalen Ackerböden den an sie für den landwirtschaftlichen Bedarf zu stellenden Anforderungen gewachsen (sind)“. Für die leichteren Böden und für den Gartenbau seien auch Isländer und Shetlandponys geeignet. Diese Aussagen müssen vor dem Hintergrund gesehen werden, dass zu dieser Zeit die Bodenbearbeitung, die den höchsten Zugkraftbedarf hat, in der Regel bereits mit dem Schlepper durchgeführt wurde. Dadurch wurde bei den Arbeiten, die den Pferden zugeteilt wurden, die Zugkraft von Kaltblutpferden nur zu 50 % ausgenutzt (ebd., S. 17). Auch Untersuchungen von KRÜGER & SEEFELDT (1955) zeigen auf, dass das Leistungspotential von Kleinpferden hinsichtlich der in der Landwirtschaft geforderten Zugkräfte völlig ausreicht, und folgern, dass ihr Einsatz als Ergänzung zum Schlepper überall dort sinnvoll sei, wo die im Vergleich zu Großpferden geringere Arbeitsgeschwindigkeit nicht entscheidend ist.

Wesentlicher Vorteil der Kleinpferde gegenüber den Kaltblütern ist die Kraftfuttersparnis in der Größenordnung von 50 %, während der Rauhfutterbedarf dem der Kaltblutpferde nahe kommt (PAPENDIECK 1958). Die Verwendung von Futter aus dem eigenen Betrieb ist grundsätzlich ein wesentlicher ökonomischer Vorteil des Pferde- gegenüber dem Schleppereinsatz, darauf weist schon SCHEIBER (1940) hin.

Allerdings gibt es eine grundsätzliche Flächenkonkurrenz zwischen der Erzeugung von Futtermitteln und der Erzeugung von Nahrungsmitteln. Unter der Überschrift „Pferd oder Motor?“ entbrannte bereits nach dem Ende des ersten Weltkriegs eine erbitterte Diskussion über die Vor- und Nachteile beider Systeme, die bis in die 1950er Jahre anhielt (BRUTSCHKE 1928, BUHLE 1929c, SPINDLER 1929, BUHLE 1935, EHRENBERG 1937a, RAU 1950, UPPENBORN 1956). Auslöser dieser Diskussion war die zunehmende Motorisierung in Landwirtschaft und Gewerbe, die bei vielen Arbeitspferdebefürwortern die schlimmsten Befürchtungen aufkommen ließ.

Ein wesentliches Argument der Schlepperbefürworter war o.g. Flächenkonkurrenz zwischen Futtermittel- und Lebensmittelerzeugung. KRÜGER (1947, S. 9) schreibt diesbezüglich: „Denn zur Energieversorgung der deutschen Landwirtschaft musste stets ein großer Teil der Nutzfläche ausschließlich für Zugtiere zur Verfügung gestellt werden. Von dem Futter dieser Flächen verbrauchten allein die Pferde 85 %“. Wie groß dieser Anteil

an der gesamten Landwirtschaftlichen Nutzfläche war, schwankt je nach Autor. So wurden nach KLOUBERT (1923, zit. in BAUHAUS 1929, S. 9) „... in Deutschland etwa 18 % der gesamten landwirtschaftlichen Erzeugung durch die Gespanntiere verbraucht.“ ... BORN (1935) gibt je Pferd eine Gesamtfutterfläche von 1 ha an, während RIES (1949) 2,65 ha für einen Zweispanner, also 1,33 ha pro Pferd nennt und anführt, dass oft schon in Betrieben von 4 - 5 ha ein Pferd, ab 7 - 8 ha bereits zwei Pferde gehalten würden. Somit läge hier der Anteil der Futterfläche an der Gesamtbetriebsfläche bei bis zu 38 %, eine Fläche, auf der man „... 11 - 12 Menschen ausgiebig und einwandfrei satt bekommen (kann)“ (ebd., S. 16). ACHILLES (1993, S. 275) führt aus, dass sich der Anteil Ackerfläche, der zur Fütterung der Pferde notwendig war, nicht angeben lässt, da entsprechende Studien „... praktisch überhaupt nicht vorliegen.“ EHRENBERG (1937a) hält den Argumenten für eine Motorisierung der Landwirtschaft entgegen, dass das Futter der Pferde komplett im eigenen Land erzeugt werden könne, während die zur Schlepperproduktion und zu seinem Betrieb notwendigen Materialien größtenteils aus dem Ausland bezogen werden müssten. Zudem würde eine ausgedehnte Schlepperproduktion eine Zunahme der Industrialisierung und damit den Abzug weiterer Arbeitskräfte aus der Landwirtschaft bedeuten.

RAU (1950) verweist auf die Möglichkeiten der Fütterung der Zugpferde mit Neben- und Abfallprodukten der landwirtschaftlichen Erzeugung, so dass kaum Fläche für die Nahrungsmittelproduktion verloren gehe. Denn nicht zuletzt als Folge der Pferd-oder-Motor-Diskussion finden sich in der Literatur zahlreiche Arbeiten, die sich mit der Frage einer möglichst rationellen Fütterung der Arbeitspferde befassen. Hierzu wurden vielfältige Untersuchungen durchgeführt, bei denen über einen bestimmten Zeitraum die von den Pferden geleistete Arbeit erfasst und in Beziehung gesetzt wurde zu Art und Menge des verabreichten Futters. Eine wesentliche Frage bei diesen Arbeiten war, wie sich der als Kraftfutter hauptsächlich eingesetzte Hafer ersetzen ließ, der auch als Nahrungsmittel für den Menschen genutzt wird. Man suchte nach Alternativen unter den Futtermitteln, die entweder auch in Notzeiten in ausreichender Menge vorhanden wären oder aber bei der Produktion von Nahrungsmitteln als Abfall anfallen (z.B. Kartoffeln, Zuckerrüben, Futterrüben, Melasse etc.), und zeigte auf, wie durch die Verwendung dieser Futtermittel die Flächenkonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion vermieden werden kann (z.B. BARTSCH 1926, TEMPER 1927, EHRENBERG 1932 u. 1937b, MAIER-BODE 1953).

Nahezu alle Diskussionsbeiträge der Pferdebefürworter kamen letztlich zu dem Fazit, dass eine maßvolle Motorisierung durchaus sinnvoll sein könne, der Schlepper das Pferd in der Landwirtschaft letztlich aber nie gänzlich ersetzen können. Diese Überzeugung findet sich sogar noch in den 1950er Jahren und stützte sich zu dieser Zeit vor allem auf die Ansicht, dass der hohe Kapitalbedarf für die Motorisierung von sehr vielen Betrieben nicht aufzubringen sei (z.B. RAU 1950, MEYER 1951, BREIDBACH 1953, UPPENBORN 1956). Letzteres hat sich für die allermeisten Betriebe bewahrheitet: von den über 3 Mio. landwirtschaftlichen Betrieben in der Weimarer Republik 1930 (BORN 2011) sind in Deutschland 2010 noch 299.134 übrig geblieben (AID 2012). Die übrigen haben im Zuge des „Strukturwandels“ aufgeben müssen. Dass das Arbeitspferd so lange als notwendige Ergänzung angesehen wurde, ist aber möglicher Weise auch ein Indiz dafür, dass der Wandel vom Pferd zum Motor offensichtlich schneller vonstattenging, als die Menschen folgen konnten (und teilweise sicher auch wollten).

2.2.3 Ökologische Aspekte des Einsatzes von Arbeitspferden

Der Einsatz von Arbeitspferden unterscheidet sich in Bezug auf zahlreiche ökologische Aspekte vom Schleppereinsatz. Ein zentrales Thema in diesem Kontext ist der Energieverbrauch, sowohl in quantitativer als auch in qualitativer Hinsicht.

RYDBERG & JANSÉN (2002) zeigen am Beispiel Schweden, dass neben einem höheren Energieverbrauch der Landwirtschaft insgesamt - bedingt vor allem durch den zunehmenden Einsatz des Verbrennungsmotors - der Einsatz externer Energie heute um das 13-fache höher ist als 1927, als die Landwirtschaft mit Arbeitspferden

betrieben wurde. Zur damaligen Zeit stammten 60 % der insgesamt benötigten Energie aus erneuerbaren Quellen, während es in der schleppergestützten Landwirtschaft 1996 nur noch 9 % sind. Allein der Zugkraftenergieverbrauch pro ha ist im betrachteten Zeitraum um 67 % gestiegen und ist heute fossiler Natur. Nach PIMENTEL (2009) entfällt heute ca. ein Drittel der Gesamtenergie, die für die landwirtschaftliche Produktion je Flächeneinheit notwendig ist, auf den Maschineneinsatz.

Arbeitspferde sind eine erneuerbare Energiequelle, da sie Sonnenenergie - in gewandelter Form als Futter (Gras, Heu, Getreide, Rüben etc.) vorliegend - direkt in Arbeit umsetzen. Somit wird durch den Einsatz von Arbeitspferden anstelle von Schleppern fossile durch erneuerbare Energie ersetzt. Dieses Einsparpotential fossiler Energie ist selbst dann noch sehr hoch, wenn ein Vorderwagen mit Hilfsmotor zum Antrieb der Arbeitsgeräte eingesetzt wird. DEGREIF (2000) hat durch entsprechende Erhebungen in der eigenen Praxis ermittelt, dass er bei der Bewirtschaftung von 150 ha Naturschutz-Grünland in der Nuthe-Nieplitz-Niederung in Brandenburg durch die Kombination von pferdegezogenen Geräten mit und ohne Aufbaumotor bei der Heuwerbung über 90 % der Dieselmenge einspart, die er verbrauchen würde, wenn alle Arbeiten mit dem Traktor gemacht würden. HEY (2007) nennt einen Treibstoffverbrauch von 2 l/ha des Aufbaumotors auf einem pferdegezogenen Mähwerk bei der Durchführung von Naturschutzmäharbeiten. Wird diese Arbeit mit einem Schlepper mit angebautem Doppelmessermähwerk durchgeführt, liegt der Verbrauch nach KTBL (2006) bei mindestens 10 l/ha. Die Einsparung durch den Pferdeinsatz liegt demnach bei etwa 80 %, was die Aussage von DEGREIF (2000) untermauert. Nach ZIMMERMANN (1994) lässt sich durch den Einsatz von Arbeitspferden in der Landwirtschaft gegenüber dem Schleppereinsatz pro Pferd und Jahr eine Energiemenge einsparen, die dem Äquivalent von ca. 2400 l Rohöl entspricht.

Da Pferde die mit dem Futter aufgenommene Energie wesentlich effizienter umsetzen können als Traktoren die im Treibstoff enthaltene Energie, führt der Einsatz von Arbeitspferden anstelle von Schleppern zu einer Netto-Energieeinsparung (DALIBARD 1995). Die Energieeffizienz beim Pferd beträgt ca. 30% (PEARSON & LAWRENCE 1997), während der Schlepper lediglich etwa 12% (BOXBERGER et al. 1997) bis 20% (MEYER 1961, KUTZBACH 1989) der im Treibstoff vorhandenen Energie in Arbeit umzusetzen vermag. Berücksichtigt man zudem noch den Energiebedarf für Herstellung, Unterhalt und Reparaturen sowie schließlich die Entsorgung von Schlepper und Pferd, so wird die Bilanz für das Pferd noch positiver: Der Schlepper muss unter Verwendung fossiler Energie und zahlreicher Rohstoffe (Eisen, Gummi, Erdöl etc.) produziert, gewartet und repariert sowie schließlich wiederum unter Energieverbrauch entsorgt werden. Pferde regenerieren sich selber (Zucht), bedürfen dazu lediglich erneuerbarer Energie (Futter), und nach ihrem Ableben lassen sich die Überreste in vielfältiger Weise nutzen (Fleisch zum menschlichen oder tierischen Verzehr, Langhaar für Bürsten und Besen oder als Kuntfüllung, Haut zu Lederwaren, Knochen zur Leimherstellung etc.). Der Rest verrottet zu organischem Dünger.

Untersuchungen von JACKSON & BENDER (1982) sowie BENDER (2001) haben gezeigt, dass die größere Energieeffizienz der Arbeitspferde gegenüber dem Schlepper auch dann gilt, wenn die Traktoren nicht mit fossilem Diesel, sondern mit so genannten Biotreibstoffen betrieben werden. Zum Betrieb der US-Landwirtschaft wäre die 2,5-fache Fläche zum Anbau der Pflanzen für Biotreibstoffe notwendig, verglichen mit der benötigten Futteranbaufläche, wenn ausschließlich Arbeitspferde zum Einsatz kommen würden BENDER (2001).

Diese Erkenntnisse sind nicht neu. Bereits KING (1907, S. 487) bemerkte hierzu: „When animals are viewed from the standpoint of machines they are wonderful mechanisms. Not only are they self-feeding, self-controlling, self-maintaining and self-reproducing, but they are far more economical in the energy they are able to develop from a given weight of fuel material, than any other existing form of motor.“ Der Grund für diese Energieeffizienz ist, dass Pferde Nährstoffe, Wasser und Sauerstoff bei wesentlich niedrigeren Temperaturen in Arbeit umsetzen können als Maschinen. Daraus folgt: „... a much smaller proportion of the fuel value is lost in the form of heat, when work is being done.“ (ebd.).

Zur Nutzung selbst erzeugter erneuerbarer anstelle zugekaufter fossiler Energie kommt hinzu, dass Pferde etwa 33 % der mit dem Futter aufgenommenen Energie in Form hochwertigen Mistes wieder ausscheiden

(DEGREIF 1993). Pro Tier und Jahr werden so etwa 9 bis 15 Tonnen hochwertiger Pferdemist produziert (TELLEEN 1977), der als wertvoller Dünger eingesetzt werden kann. Wird dieser Pferdemist anstelle von Mineraldünger verwendet, so führt dies zu einer zusätzlichen Energieeinsparung, bei gleichzeitiger Bodenverbesserung durch Humusanreicherung. Arbeitspferde integrieren sich somit nahezu vollständig in den Betriebskreislauf.

Abgase und Ruß als Umwandlungsprodukte fossiler Treibstoffe, die die Umwelt belasten und das Klima verschlechtern, fallen beim Pferdeinsatz nicht oder nur in sehr geringem Maße an. Hinzu kommt die CO₂-Bilanz, die beim Einsatz von Arbeitspferden ausgeglichen ist: Der Einsatz von Arbeitspferden ist klimaneutral. Die Bedeutung dieses Aspekts wird spätestens bei einer globalen Betrachtungsweise deutlich: Je nach Schätzung sind 250 bis 500 Millionen Zugtiere weltweit im Einsatz, die jährlich bis zu 2 Milliarden t Treibstoff einsparen (RAMASWAMY 1998, CHIRGWIN 1996, AGUIRRE & ORIHUELA 2000, SCHROLL 2007, STARKEY 2010). Würden die weltweit eingesetzten Arbeitstiere durch Schlepper ersetzt, so würde dies die Bemühungen des Klimaschutzes ad absurdum führen.

Die Erdölvorräte auf dieser Welt sind endlich und dürften nach derzeitigen Schätzungen etwa bis zum Jahre 2050 aufgebraucht sein (EEGFTF 2011). Energieeinsparung sowie Ersatz fossiler Energie durch den Einsatz von Arbeitspferden erscheinen vor diesem Hintergrund als eine wertvolle Strategie nicht nur für den Ökologischen Landbau (JANSÉN 2000). Obwohl bereits auf der UN-Konferenz über neue und erneuerbare Energiequellen im August 1981 in Nairobi in die Liste der 14 erneuerbaren Energiequellen aufgenommen (RAMASWAMY 1998), hat der Zugtiereinsatz bisher jedoch keinen Eingang in die Diskussion über die notwendige Umstellung auf die Nutzung regenerativer Energieträger gefunden. Spätestens jetzt, da die negative Energiebilanz der so genannten „Bio-Treibstoffe“ belegt ist und diese zunehmend kritischer betrachtet werden (PIMENTEL & PATZEK 2005, SRU 2007), sollte der Einsatz von Arbeitspferden im Ökologischen Landbau auch unter energetischen Gesichtspunkten ernsthaft diskutiert werden (PIMENTEL 2009).

Neben energetischen Überlegungen spielt auch der Schutz des Bodens vor Verdichtungen eine wichtige Rolle bei der Bewertung des Einsatzes von Arbeitspferden. Schon EHRENBERG (1950) erwähnt, dass die unterschiedlichen Auswirkungen von Pferden und Schleppern bereits seit Jahren beobachtet würden, man aber noch zu wenig darüber wisse. Nur zögerlich wird zunehmend anerkannt, welche nachhaltigen Schäden die immer größer und schwerer werdenden Traktoren und Maschinen am Boden anrichten, und dass alle bisherigen technischen Lösungsversuche die Probleme nicht beheben können, sondern sie zum Teil sogar verschärfen (SCHACK-KIRCHNER et al. 1993, DOMSCH 1995, BOXBERGER et al. 1997, EHLERS 1998a u. 2000, EHLERS et al. 2000, NIEMANN 2000, WIERMANN et al. 2000, VOßBRINK 2005, MATTHIES 2009, MORDHORST 2009, PETH et al. 2010, ZINK et al. 2010 u. 2011, HORN 2011).

Bei der Verdichtung des Bodens spielen drei wesentliche Faktoren eine Rolle: der Kontaktflächendruck, die Radlast und der Schlupf (BOLLING & SÖHNE 1982). Der Kontaktflächendruck ist für die Verdichtung in den oberen etwa 30 cm Bodentiefe verantwortlich, während die Radlast entscheidend für die Beeinflussung der tieferen Bodenschichten ist (SOMMER & HARTGE 1991, EHLERS 1998a). Pferde verursachen zwar u.U. einen höheren Kontaktflächendruck als große Maschinen, aber die punktuellen Verdichtungen durch die Pferdehufe, die überdies bereits in den oberen 20 cm des Bodens ohne negative Folgen bleiben (WYSS 1999), haben keine ökologisch relevante Wirkung. Denn für die ökologische Folgewirkung ist weniger die Intensität der Verformung, als vielmehr die Größe der zusammenhängenden verdichteten Bodenzone sowie die Verdichtungstiefe entscheidend (SCHACK-KIRCHNER et al. 1993). Der den Hufabdrücken benachbarte unverdichtete Boden übernimmt quasi By-pass-Funktionen für die verdichteten Bereiche. Durch die im Vergleich zu den flächenhaften Verdichtungen relativ größere Oberfläche der punktuellen Verdichtungen können diese zudem sehr viel besser und schneller von den Bodenlebewesen regeneriert werden (WEBER 1987, SCHACK-KIRCHNER et al. 1993,

DUFFNER 1998). FLEISCHER & SÜB (2002) haben gezeigt, dass ein Pferd mindestens acht Mal dieselbe Fläche begehen muss, bevor überhaupt eine flächenhafte Vernetzung der einzelnen Hufabdrücke beginnt.

Die Verdichtungen durch Traktoren und Maschinen sind im Gegensatz zum Pferdeeinsatz stets flächenhaft. Die Fahrspuren bilden an der Bodenoberfläche eine geschlossene Fläche und setzen sich in den Boden wie zwei parallel verlaufende Blöcke fort. Diese Form der Verdichtung beeinflusst durch die Zerstörung der Bodenporen vor allem den Bodengas- und den Bodenwasserhaushalt negativ, sodass im Extremfall im Oberboden anaerobe Verhältnisse entstehen, die zu einem deutlich verringerten Wurzelwachstum führen (SCHACK-KIRCHNER et al. 1993, DUFFNER 1998, NEMESTOTHY 2009). Das Wurzelwachstum wird zusätzlich direkt durch die Verdichtungen behindert, da die Wurzeln oftmals nicht mehr in der Lage sind, die verdichteten Bereiche zu durchdringen. Durch das verringerte Wurzelwachstum wird wiederum die Versorgung der Pflanzen mit Wasser und Nährstoffen deutlich beeinträchtigt und die Standfestigkeit nimmt ab. Letztlich führen die Bodenverdichtungen zu verringertem Ertrag (HAKANSSON et al. 1987, HAMZA & ANDERSON 2005), aber auch die Erosionsgefährdung der betroffenen Böden nimmt zu (z.B. VOORHEES et al. 1979, YOUNG & VOORHEES 1982).

Zur flächenhaften Ausdehnung kommt bei Schleppern und Maschinen erschwerend hinzu, dass die Verdichtungen wesentlich tiefer in den Boden reichen. Denn die Radlast und somit letztlich das Gesamtgewicht - und nicht wie oft behauptet der Kontaktflächendruck - bestimmt im Wesentlichen die Tiefe einer Verdichtung (BOLLING & SÖHNE 1982, SOMMER & HARTGE 1991, EHLERS 1998a, EHLERS et al. 2000). Für Waldboden gilt als Faustregel, dass jede Verdichtung, die tiefer als 30 cm in den Boden hineingeht, irreparable Schäden im Boden verursacht (SCHACK-KIRCHNER 2008). Auch NEMESTOTHY (2009, S. 9) äußert unmissverständlich, dass „Die durch wirtschaftliche Zwänge etablierte Voll- und Teilmechanisierung in der Holzernte ... zu großen Druckbelastungen auf den Waldboden und damit zu irreversiblen Verdichtungen (führt), die noch Jahrzehnte nachwirken.“ Bei Ackerböden stellt sich die Situation durch die Bodenbearbeitung möglicher Weise etwas anders da, aber auch dort werden zunehmend Schäden verursacht, die bis in große Tiefen reichen und irreparabel sind. Nach BODENSCHUTZFACHSTELLE DES KANTONS BERN (1997, zit. in WYSS 1999) haben Untersuchungen in der Schweiz gezeigt, dass sich in den 40 Jahren zuvor das pflanzennutzbare Porenvolumen der Ackerböden um etwa ein Viertel verringert hat. Schon BOLLING & SÖHNE (1982) haben nachgewiesen, dass die steigenden Gewichte der Maschinen nicht durch Breitreifen etc. abzufangen sind, dass die „Breitreifen-Philosophie“ nicht funktioniert. Diese Feststellung wird auch von EHLERS (2000) bestätigt. Wissenschaftler kommen daher zu der klaren Forderung, Maschinengewichte auf Achslasten von maximal 5 t - 8 t zu begrenzen, um irreparable Schäden vom Boden abzuwenden (VOORHEES & LINDSTROM 1983, HAKANSSON et al. 1987, EHLERS 1998b, NIEMANN 2000, WEBER 2003). Die tatsächlichen Achslasten in der modernen, industrialisierten Landwirtschaft liegen oft deutlich darüber.

Ein großer Vorteil des Arbeitspferdeeinsatzes hinsichtlich Bodenverdichtungen ist die Tatsache, dass ein deutlich geringerer Anteil der Fläche betreten bzw. überfahren wird als beim Schleppereinsatz. So konnte WYSS (1999) zeigen, dass ein 35 KW-Schlepper mit einem 2-Scharpflug und einer Arbeitsbreite von 66 cm 114 % der Ackerfläche befährt und verdichtet, während der Wert für ein Pferdegespann mit einem einscharigen Pflug und halber Arbeitsbreite bei nur 33 % liegt. MORDHORST (2009) hat zudem gezeigt, dass der Einsatz von Arbeitspferden Böden selbst dann schon und regenerieren lässt, wenn die Pferde schwerer sind als die zuvor eingesetzte Schleppertechnik: Nach jahrzehntelanger biologisch-dynamischer Bewirtschaftung mit Schleppertechnik in der Größenordnung von 30 PS führte die Umstellung auf Arbeitspferde, die als Zweispanner ein höheres Gewicht haben als die zuvor eingesetzten Schlepper, bereits nach 3 Jahren zu einer Verringerung der Bodenverdichtungen und zu zahlreichen Verbesserungen vor allem im Unterboden, während sich die Verhältnisse auf den Kontrollflächen, die weiter wie bisher bewirtschaftet wurden, zunehmend verschlechterten. Welche Wirkmechanismen hinter diesem Befund stecken, ist noch nicht endgültig bekannt.

Neben der flächenhaften Ausdehnung und der Tiefe der Verdichtungen ist ein weiterer negativer Faktor der durch die Antriebsräder des Schleppers verursachte Schlupf. Hierdurch werden Bodenschichten horizontal gegeneinander verschoben, wobei vor allem die senkrechten Bodenporen zerstört werden. Bei fehlenden durchgängigen Poren können der Gas- und der Wassertransport im Boden sowie der Austausch zwischen Boden und Atmosphäre gestört bzw. gänzlich unterbunden sein (SEMMELE & HORN 1995, KÜHNER 1997, EHLERS et al. 2000, PLOEG et al. 2006).

Alle vorliegenden Untersuchungen zeigen sehr deutlich, dass der Einsatz von Arbeitspferden keine negativen Auswirkungen auf die ökologische Funktion der Böden hat, sondern diese im Gegenteil sogar verbessern kann (MORDHORST 2009). Folglich bezeichnet HAMPL (1998, S. 128) den Einsatz von Arbeitspferden in Bezug auf den Bodenschutz als „echte Alternative“ zum Schleppereinsatz.

Schäden am Boden, die durch die Befahrung mit schweren Maschinen entstanden sind, lassen sich oftmals noch viele Jahre nach der Befahrung messtechnisch nachweisen, denn sie sind sehr viel schwerer durch die Bodenlebewesen wieder aufzuarbeiten als die Huftritte der Pferde, z.T. sind sie auch irreversibel (WALKER 1994, NEMESTOTHY 2009). VOBBRINK (2005) kommt zu dem Schluss, dass der Einsatz von Rückepferden im Wald die einzige Arbeitsweise ist, die keinen Schaden am Waldboden anrichtet. Eine bodenverträgliche Befahrung mit den in der forstlichen Praxis üblichen Fahrzeugen sei dagegen gar nicht möglich. SCHARNHÖLZ (2006) folgert daraus richtig, dass der Pferdeeinsatz im Gegensatz zum Maschineneinsatz gesetzeskonform ist, denn das Bundesbodenschutzgesetz untersagt eine Bewirtschaftung des Bodens, die zu irreparablen Schäden führt. Damit müsste der Einsatz selbst fahrender Erntemaschinen im Wald eigentlich untersagt werden. Dies geschieht jedoch nicht, da im Bundeswaldgesetz auf eine im Rahmen der Zweckbestimmung „ordnungsgemäße“ Bewirtschaftung des Waldes gedrungen wird, wobei der Begriff „ordnungsgemäß“ ein unbestimmter Rechtsbegriff und seine Auslegung somit sehr variabel ist. Gleiches gilt für die „gute fachliche Praxis“ in der Landwirtschaft, die ebenfalls nicht näher konkretisiert ist, die aber jegliche Bodenschäden in der Landwirtschaft „entschuldigt“ (WAGNER 2008).

Die Vorteile des Einsatzes von Arbeitspferden in ökologischer Hinsicht schließen auch den Artenschutz mit ein. Das im Vergleich zum Schlepper geringere Arbeitstempo der Pferde eröffnet den Tierarten z.B. im Grünland deutlich bessere Fluchtchancen. Dies gilt umso mehr, wenn man die Arbeitsgeschwindigkeit in Kombination mit der eingesetzten Technik - im Grünland z.B. Doppelmesser-Mähwerke anstelle von Kreiselmähern sowie Verzicht auf Mähauflbereiter - betrachtet (CLABEN et al. 1996, LICZNER 1999, FLURI et al. 2000, HEY 2007, DEUTSCHE WILDTIER STIFTUNG 2009). Der im November 2008 veröffentlichte Statusbericht „Vögel in Deutschland 2008“ (SUDFELDT et al. 2008) zeigt klar die Zusammenhänge zwischen der Art der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung und dem Rückgang von Bodenbrütern, wie Kiebitz, Feldlerche, Rebhuhn u.a. Ein vermehrter Einsatz von Arbeitspferden wäre ein aktiver Beitrag zum Schutz dieser wie vieler anderer Arten. Folgerichtig stellt der Naturschutzbund Deutschland den Einsatz von Arbeitspferden als eine Optimierungsstrategie für eine naturverträgliche Grünlandbewirtschaftung dar, die eine arten- und individuenreiche Fauna bewirkt (OPPERMANN & CLABEN 1998).

Die Struktur unserer Kulturlandschaft ist wesentlich bedingt durch die Art der landwirtschaftlichen Nutzung (GANZERT 1994). Aus der naturschutzfachlichen Forschung ist bekannt, dass eine vielfältige Struktur unterschiedlicher Landschaftselemente auf kleinem Raum (Mosaikstruktur, Strukturvielfalt) für die mitteleuropäische Kulturlandschaft eine Schlüsselfunktion für Biodiversität und ökologische Funktionsfähigkeit darstellt (z.B. BEGON et al. 1991, MÜHLENBERG & SLOWIK 1997, PLACHTER 2001). Pferdearbeit bedingt durch die oftmals im Vergleich zum Schlepper geringere Schlagkraft relativ kleine Flächeneinheiten, die dem Leistungspotential der Pferde angepasst sind. Daher würden die mit Pferden bearbeiteten Acker- und Wiesenschläge deutlich kleiner ausfallen, als dies derzeit in einer Landwirtschaft der Fall ist, die auf große Traktoren und

entsprechende Maschinen ausgerichtet und in der eine möglichst hohe Schlagkraft das entscheidende Kriterium ist (SCHMIT 2008a). Ein vermehrter Einsatz von Arbeitspferden würde sich dadurch positiv auf die Struktur der Landschaft insgesamt auswirken und die negativen Folgen der Flurbereinigung in Teilen korrigieren. Zudem dürfte bei flächigem Arbeitspferdeeinsatz die Artenvielfalt von Flora und Fauna zusätzlich dadurch gefördert werden, dass nicht alle Flächen gleichzeitig und im selben Vegetationsstadium bearbeitet würden. So könnte sich im Laufe der Zeit ein vielfältiges Mosaik herausbilden, das unterschiedlichsten Arten Lebensraum und Nahrung bieten würde.

Vergleichende Betrachtungen des heutigen Landschaftsbilds mit historischen Aufnahmen aus der Zeit, in der Zugtiere die einzige Zugkraftquelle der Landwirtschaft waren, belegen die grundsätzliche Richtigkeit dieser Überlegungen. Auch wenn es weitere wichtige Unterschiede zwischen der Landwirtschaft damals und heute gibt, die sich auf das Landschaftsbild und die Artenvielfalt auswirken (nahezu flächendeckender Nährstoffüberschuss, Anbau anderer Kulturen wie Mais etc., Einsatz von Pflanzenschutzmitteln usw.), wird deutlich, dass ein vermehrter Arbeitspferdeeinsatz in der Landwirtschaft durch den Zusammenhang zwischen Strukturvielfalt und ökologischer Funktion *ein* direkter Beitrag zum Naturschutz wäre.

2.2.4 Ökonomische Aspekte des Einsatzes von Arbeitspferden

Im Gegensatz zu den ökologischen Aspekten des Arbeitspferdeeinsatzes gibt es zu den ökonomischen Fragen bisher kaum Literatur. Erschwerend kommt hinzu, dass die Kosten im Pferdebereich von den verschiedenen Autoren auf sehr unterschiedliche Art und Weise berechnet werden. Es zeichnet sich bei Betrachtung der wenigen vorhandenen Literatur ab, dass der Einsatz von Arbeitspferden mit relativ geringen Investitionskosten verbunden ist, während die Lohnkosten der Pferdearbeit in einigen Bereichen durch eine im Vergleich zum Schleppereinsatz geringere Schlagkraft eher hoch sind.

Die Investitions- und Instandhaltungskosten von Pferden und pferdegezogenen Maschinen sind geringer als die von Traktoren und entsprechender Gerätetechnik. Einen Durchschnittswert für die Anschaffungskosten für ein Arbeitspferd im Geschirr anzugeben ist kaum möglich, da es hierfür bisher keinen richtigen Markt und schon gar keine Kalkulationstabellen oder ähnliches gibt. Die Preise schwanken daher erheblich. Betrachtet man entsprechende Anzeigen in Pferdezeitschriften, so sind ausgebildete Arbeitspferde zu Preisen zwischen 2.000 und 5.000 € zu finden (Stand: 2011). Hinzu kommen die Geschirrkosten, die für Arbeits-Kumtgeschirre bei etwa 800 bis 1.000 € pro Pferd liegen. Der Preis für ein Arbeitspferdegespann im Geschirr kann demnach mit etwa 6.000 € bis 12.000 € angenommen werden (vgl. SCHROLL 2008b, BLUMENSTEIN 2008).

Betrachtet man die Investitionskosten im Schlepperbereich, so stehen hier etwa 900 € bis 950 € pro kW zu Buche. Ein Schlepper mit 33 kW (= 45 PS) kostet demnach etwa 31.000 €, ein Allradsschlepper mit 59 kW (= 82 PS) etwa 56.500 € (vgl. GAZZARIN & VÖGELI 2010).

Unter „Wartungs- und Reparaturkosten“ kann man beim Pferd die Kosten für den Hufschmied, die Tierarztkosten sowie Kosten für die Pflege und Instandsetzung des Geschirrs annehmen. Hinzu kommt der mit Abstand größte Posten, die Lohnkosten für das tägliche Putzen der Pferde. Diese Kosten sind im Gegensatz zum Schlepper unabhängig von der Arbeitsleistung und werden von BLUMENSTEIN (2008) insgesamt auf 1.840,- € pro Pferd und Jahr beziffert. Für ein Pferdegespann ergäben sich somit Kosten von etwa 3.700,- € pro Jahr.

Hinzu kommt ein – da betriebsspezifisch extrem unterschiedlich – nicht näher bezifferbarer Kostenfaktor durch die vor Vegetationsbeginn notwendigen „Trainingszeiten“ zur Wiedererlangung der Kondition der Pferde nach der arbeitsarmen Winterpause. Diese Zeiten werden i.d.R. keine zusätzlichen Arbeitszeiten sein (also reines „Bewegen“ der Pferde), sondern äußern sich in Form einer zunächst verringerten Flächen- und Tagesarbeitsleistung (und damit höherer Arbeiterledigungskosten), die sich im Verlaufe weniger Wochen

dann zur vollen Leistung steigert. Für diesen Aspekt, den man auch zu den Wartungskosten beim Pferdeinsatz zählen kann, liegen bisher keine konkreten Zahlen vor.

Die Wartungs- und Reparaturkosten sind beim Schlepper abhängig von Maschinenart und Arbeitsleistung und fallen nur an Tagen an, an denen der Schlepper auch eingesetzt wird, während Pferde eines täglichen Mindestaufwands an Pflege und Zuwendung bedürfen, auch während der arbeitsfreien Zeit. GAZZARIN & VÖGELI (2010) berechnen die Reparaturkosten mittels eines Reparaturfaktors, der je nach Schleppertyp zwischen 0,5 und 0,9 liegt. Der Anschaffungspreis wird durch die angenommene technische Nutzungsdauer von 10.000 h (in 15 Jahren) dividiert und dann mit dem Reparaturfaktor multipliziert. Die Wartungskosten werden für beide hier betrachteten Schlepper mit ca. 0,85 € pro Arbeitsstunde angegeben. Dadurch ergeben sich insgesamt für Reparaturen und Wartungsarbeiten für den 33 kW-Schlepper 3,63 € pro Arbeitsstunde, für den 59 kW-Allrad-schlepper sind es 4,80 € pro Arbeitsstunde. Bei der angenommenen technischen Nutzungsdauer von 667 Arbeitsstunden pro Jahr (10.000 h in 15 Jahren, s.o.) liegen die jährlichen Wartungs- und Reparaturkosten somit beim 33 kW-Schlepper bei 2.420,- € und beim 59 kW-Schlepper bei 3.200,- €. Grob vereinfacht kann als Durchschnittswert somit ein jährlicher Kostensatz von etwa 5 % - 6 % des Anschaffungspreises angenommen werden.

Auf den Vergleich pferde- und schleppergezogener Geräte soll hier nicht weiter eingegangen werden. Grundsätzlich gilt, pferdegezogene Geräte sind von ihrer Konstruktion her wesentlich einfacher und kleiner und dadurch preiswerter als Traktortechnik. Zudem sind sie weniger reparaturanfällig, da sie mit geringeren Geschwindigkeiten gearbeitet werden. Reparaturen können in der Regel mit überschaubarem Aufwand vom Landwirt selber durchgeführt werden. Bei modernen Schleppergeräten sind Reparaturen meist aufwändiger und verlangen oft eine Fachwerkstatt.

Die skizzierten Kostenunterschiede führen dazu, dass sich der Einsatz von Schleppern und der entsprechenden Gerätetechnik erst ab einer gewissen Betriebsgröße rechnet (vgl. auch FORRISTAL 1999). Unterhalb dieser Größe dürfte der Einsatz von Arbeitspferden rentabler sein. Allerdings lässt sich aufgrund der zumindest auf Seiten des Arbeitspferdeinsatzes mangelhaften Datenlage, insbesondere hinsichtlich der Leistungsfähigkeit moderner pferdezogener Technik, die kritische Betriebsgröße, ab der Schleppereinsatz rentabler ist, derzeit nicht konkret benennen. In der Literatur finden sich hierzu nur sehr wenige Quellen, die ihre Aussage meist darauf beschränken, Arbeitspferdeinsatz sei vor allem für „kleinere Betriebe“ lukrativ, ohne konkrete Zahlen zu nennen (z.B. PINNEY 2003c, MORRISSEY 2009). ANDERSON (1943, zit. in COURTEAU 2007) gibt an, dass pro 25 - 30 acres (etwa 10 - 12 ha) Ackerland ein Arbeitspferd notwendig ist und dass landwirtschaftliche Betriebe erst ab einer Größe von 75 acres Ackerland (etwa 30 ha) auf Schlepper umsteigen sollten. Aktuelle Berechnungen von KENDELL (2005) anhand von Literaturdaten und von Daten aus seinem eigenen landwirtschaftlichen Betrieb mit Arbeitspferdeinsatz kommen zu dem Ergebnis, dass sich der Schleppereinsatz unter aktuellen US-amerikanischen Bedingungen langfristig erst ab einer Betriebsgröße von 174 acres (etwa 70 ha) rechnet. Bei kleineren Betrieben ist über den betrachteten Zeitraum von 40 Jahren der Einsatz von Arbeitspferden rentabler. Dabei habe er auf der Pferdeseite äußerst konservativ gerechnet, um in den Augen von Kritikern glaubwürdiger zu erscheinen, in Wirklichkeit liege die Rentabilitätsgrenze noch höher, da der Pferdeinsatz leistungsfähiger und die Arbeitskosten geringer seien als in der Berechnung angesetzt (KENDELL 2008).

Derzeit liegt die durchschnittliche Größe aller landwirtschaftlichen Betriebe in Deutschland bei 61,3 ha (BMELV 2012), die der Haupterwerbsbetriebe bei 62,7 ha (BMELV 2011). Um einen solchen Betrieb ausschließlich mit Pferden zu bewirtschaften, wären ca. 8 Arbeitspferde notwendig (SCHEPP 1952, UPPENBORN 1956, DEGREIF 1993). Bei durchschnittlich 3-spännigem Arbeiten würden 2 - 3 Fuhrleute benötigt, um diesen Betrieb zu bewirtschaften. Ob die Erlöse aus diesem Betrieb für die Entlohnung dieser Leute reichen würden, ist zumindest fraglich, denn der jetzige Arbeitskräftebesatz der Haupterwerbsbetriebe liegt bei 1,94 Arbeits-

kräften (AK) je Betrieb (BMELV 2011). Nimmt man an, dass von diesen 1,94 AK etwa 1 AK für die Durchführung der Feldarbeiten anfällt und rechnet demnach je Betrieb 1 - 2 AK als Fuhrleute hinzu, im Durchschnitt also 1,5 AK, so ergäben sich 3,44 AK je Betrieb. Bei einem Betriebsgewinn von 35.000 Euro im Wirtschaftsjahr 2009/2010 (BMELV 2011) ergäbe sich ein Einkommen von dann 10.174 Euro je AK (anstelle von tatsächlich 18.041 Euro). Hier zeigt sich ein generelles Problem: die Entwicklungen im Agrarsektor und die Europäische Agrarpolitik der vergangenen Jahrzehnte haben durch das erzwungene „Wachsen oder Weichen“ dazu geführt, dass die zur Erzielung eines ausreichenden Einkommens notwendige Betriebsgröße mit reiner Pferdekraft in den meisten Fällen nicht mehr zu bewältigen sein dürfte. Denn aufgrund der niedrigen Lebensmittelpreise reichen die Erlöse für die erzeugten Produkte offensichtlich nicht aus, um die zusätzlich benötigte menschliche Arbeitskraft zu entlohnen. Um dies aber abschließend beurteilen zu können, wären umfassende Untersuchungen notwendig, die im Vergleich Schlepper - Pferd auch die anfallenden Kosten genau erfassen und die Frage beantworten, ob die Kostenersparnisse durch den Pferde- anstelle des Schleppereinsatzes möglicherweise die zusätzlichen Arbeitskosten aufwiegen. Letztlich bleibt zudem die Frage, ob bzw. in welchem Umfang die zusätzlich notwendigen Arbeitskräfte überhaupt zur Verfügung stünden, ob genügend Menschen bereit und willens wären, diese Arbeit zu tun.

Die Schlagkraft des Systems „Pferd“, also die erzielbare Flächen- bzw. Arbeitsleistung, ist – zumindest in einigen Bereichen – geringer als die des Traktors. Hieraus ergibt sich bei vielen Arbeiten eine längere Arbeitszeit je Flächeneinheit mit entsprechend höheren Lohnkosten. In einer u.U. mehrwöchigen Phase vor Vegetationsbeginn fallen zudem geringere Flächenleistungen und damit höhere Lohnkosten dadurch an, dass die Pferde nach der Winterruhe erst wieder Kondition aufbauen müssen. Bei vielen Arbeiten ist die Arbeitsgeschwindigkeit des Schleppers deutlich höher als die der Pferde. Die hohe Zugkraft des Schleppers ermöglicht zudem oftmals den Einsatz von Gerätekombinationen, was die Flächenleistung zusätzlich erhöht. Folgerichtig kommt BENDER (2001) beim Vergleich von Amish- mit Nicht-Amishfarmen in Ohio zu dem Ergebnis, dass erstere den 2,4-fachen Arbeitszeitbedarf pro ha haben. Allerdings gibt es auch Arbeiten, bei denen die wesentlichen technischen Vorteile des Schleppers - hohe Zugkraft und Fahrgeschwindigkeit - nicht zum Tragen kommen, und bei denen das Pferd dem Schlepper hinsichtlich Flächenleistung ebenbürtig oder sogar überlegen ist. Hierzu zählt z.B. der Pflegebereich in Reihenkulturen (BLUMENSTEIN 2008, SOUKUP 2008, STRÜBER 2010). Für den gesamten Zeitaufwand einer durchzuführenden Arbeit sind neben den reinen Arbeitszeiten auch die Rüstzeiten von Bedeutung. Diese setzen sich beim Pferd aus den Arbeiten Putzen, Aufschirren und Anspannen zusammen. Hinzu kommen die Rüstzeiten am eingesetzten Arbeitsgerät. Die Rüstzeit für den Schlepper hingegen besteht lediglich aus dem Anlassen des Motors und dem Anhängen des Arbeitsgerätes, der Anteil dieser Rüstzeiten am einzelnen Arbeitsgang ist daher sehr gering. Die Rüstzeit des schleppergezogenen Arbeitsgerätes unterscheidet sich, zumal beim Vergleich mit moderner pferdegezogener Technik, nicht wesentlich von der Rüstzeit des Pferdegerätes. Insgesamt sind daher die Rüstzeiten beim Einsatz von Arbeitspferden oftmals länger als bei Verrichtung der gleichen Arbeiten mit dem Schlepper (vgl. z.B. SOUKUP et al. 2008).

Ein weiterer begrenzender Faktor der Arbeitsleistung beim Einsatz von Arbeitspferden ist, dass das Pferd im Gegensatz zur Maschine Zeit zur Regeneration und zur Ruhe sowie zur Futteraufnahme braucht. Die tägliche Gesamtarbeitszeit ist dadurch begrenzt, und auch während der Arbeit braucht das Pferd immer wieder kurzzeitige Regenerationspausen. Die Dauer der notwendigen Pausenzeiten wird dabei von der Schwere der Arbeit ebenso beeinflusst wie von der Witterung. Angaben in historischer Literatur beziffern den gesamten so entstehenden „Leerlauf“ bei der Feldarbeit mit Zugtieren, also die Gesamtheit der Wende-, Stör- und Pausenzeiten, mit 40 % bis 45 % der Gesamtarbeitszeit (z.B. ANONYMUS 1929, KRÜGER 1947). Neuere Untersuchungen sprechen von 0 % bis 40 % (HUMBERT 2003, BLUMENSTEIN 2008, SOUKUP 2008). Der Anteil der Pausenzeiten an der Gesamtarbeitszeit ist auch abhängig von der Arbeitsdauer: Durch die Ermüdung des lebendigen Organismus Pferd nimmt dieser Anteil - im Gegensatz zur Schlepperarbeit - mit zunehmender Arbeitsdauer zu (z.B. KRÜGER 1957).

Das derzeitige Preisverhältnis von Energie zu menschlicher Arbeitskraft lässt den Traktoreinsatz daher generell rentabler erscheinen. Ob dem wirklich so ist, kann (noch) nicht beantwortet werden: Im Gegensatz zur Traktortechnik (z.B. KTBL 2006) gibt es konkrete Daten zur Leistungsfähigkeit moderner pferdegezogener Geräte als Grundlage für eine Wirtschaftlichkeitsberechnung erst in Ansätzen (z.B. WELTIN 2002, BLUMENSTEIN 2008, SOUKUP et al. 2008). Beobachtungen und Untersuchungen in Land- und Forstwirtschaft weisen jedoch darauf hin, dass der Arbeitspferdeeinsatz dem Schleppereinsatz schon jetzt in verschiedenen Arbeitsbereichen hinsichtlich der erzielbaren Arbeitsleistung mindestens ebenbürtig, wenn nicht überlegen sein kann (SCHMIDT 1998, HOFFMAN-GEHR 1999, CAVALLI & SABAINI 2000, KENDELL 2005, WIRTH 2008, MORRISSEY 2009). Pferde erscheinen hinsichtlich ihrer Arbeitsleistung vor allem dann konkurrenzfähig, wenn es sich um Arbeiten handelt, bei denen eine hohe Geschwindigkeit nicht entscheidend ist, und bei denen der Zugkraftbedarf im Bereich des für die Pferde Leistbaren liegt. Bei der Grünlandbewirtschaftung z.B. sind mit Schleppern wahrscheinlich deutlich höhere Flächenleistungen zu erzielen als mit Pferden. Jedoch fehlen auch hier verlässliche Daten für den modernen Arbeitspferdeeinsatz bzw. werden mit der vorliegenden Arbeit erst in Ansätzen vorgelegt. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten spielt aber auch bei der Grünlandbewirtschaftung die Qualitätsfrage eine Rolle. Die langsamere Arbeitsgeschwindigkeit und die Nutzung von z.B. Doppelmessermähwerken anstelle von Kreiselmähern dürften die Menge und Qualität des gewonnenen Futters positiv beeinflussen: weniger Erdbeimengungen und andere Verschmutzungen sowie ein deutlich früherer und kräftigerer Nachwuchs und dadurch höherer Folgeertrag. Somit ist es denk-, wenn auch durch fehlende Daten zum Pferdeeinsatz noch nicht belegbar, dass auch Arbeiten, bei denen der Schlepper vordergründig die bessere Alternative zu sein scheint, letztlich mit Pferden ökonomischer durchgeführt werden können.

Der Nachteil der geringeren Flächenleistung und des Pausenbedarfes bei der Pferdearbeit kann aus Sicht des arbeitenden Menschen auch als Vorteil betrachtet werden. Denn dieser braucht ebenfalls Pausen zur Regeneration und kann, anders als die Maschine, nicht stundenlang ohne Unterbrechung und ohne Leistungsabfall arbeiten. Pferdearbeit ist dem Menschen somit zuträglicher, der Mensch muss sich dem Arbeitstempo und dem Arbeitsrhythmus des Pferdes anpassen. Pferd und Mensch „funktionieren“ nach ähnlichen Prinzipien, die Maschine jedoch nach gänzlich anderen. Traktoren und Maschinen werden nicht müde und brauchen keine Pausen. Und da die eingesetzte Technik zunehmend größer und teurer wird, muss sie möglichst viele Betriebsstunden im Einsatz sein, um sich zu amortisieren.

Zu einigen weiteren ökonomischen Aspekten des Arbeitspferdeeinsatzes gibt es noch keine konkreten Daten, sondern nur allgemeine Überlegungen. Arbeitspferde können sehr flexibel genutzt werden. Die Zahl der eingesetzten Pferde kann genau auf den Zugkraftbedarf des jeweiligen Arbeitsganges abgestimmt werden. Eine Übermechanisierung, wie sie heute in der Land- und Forstwirtschaft durch den Einsatz immer leistungstärkerer Traktoren bei vielen Arbeiten die Regel ist, wird durch diese Flexibilität des Pferdezeuges vermieden. Auch hieraus resultieren direkte Energieeinsparungen und Kostensenkungen.

Arbeitspferde können zusätzliche Einkommensquellen erschließen. Der Einsatz der Pferde im Wald, vor dem Planwagen (Umweltbildung, sanfter Tourismus) oder auch im Kommunaldienst kann finanziell attraktiv sein und bietet gleichzeitig die Möglichkeit, die Pferde während arbeitsextensiver Zeiten in der Landwirtschaft durch die Arbeit in den anderen Bereichen in Training und guter Kondition zu halten, was sowohl für die Arbeitsleistung als auch für die Gesundheit der Pferde unverzichtbar ist.

Auch Zucht, Ausbildung und Verkauf von (ausgebildeten) Arbeitspferden können ein Zusatzeinkommen für den Arbeitspferde einsetzenden Betrieb bedeuten.

Vor allem für direkt vermarktende landwirtschaftliche Betriebe stellt der Einsatz von Arbeitspferden zudem ein nicht zu unterschätzendes Werbeargument dar und kann hierüber zur Wirtschaftlichkeit des gesamten Betriebes beitragen. Denn Pferde sind Sympathieträger und generieren Aufmerksamkeit (RODEWALD et al. 2006, MUMMA 2008).

Wenn sich die Wirtschaftlichkeit des Arbeitspferdeeinsatzes derzeit auch noch nicht mit exakten wissenschaftlichen Daten belegen lässt, so lässt die Existenz und Entwicklung der Arbeitspferde einsetzenden Betriebe jedoch vermuten, dass ausreichende Wirtschaftlichkeit zumindest fallweise gegeben ist. Die Erhebung exakter Daten zur Wirtschaftlichkeitsberechnung des modernen Arbeitspferdeeinsatzes wäre sowohl für die Diskussion um den Sinn des Pferdeeinsatzes, als auch für die Beratung von Betrieben dringend notwendig.

Bereits seit vielen Jahren wird von verschiedenen Seiten die Verteuerung von Energie zugunsten einer Kostenentlastung von menschlicher Arbeitskraft gefordert (z.B. WEIZSÄCKER et al. 1995, BUND & MISEREOR 1996 und UBA 1997). Eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes wird den Arbeitspferdeeinsatz auch ökonomisch zunehmend konkurrenzfähiger machen.

Die Einbeziehung aller Folgekosten des Maschineneinsatzes in die Wirtschaftlichkeitsberechnungen - hier vor allem die Schäden an Boden und Atmosphäre - würde zusätzlich zu einer zunehmenden Konkurrenzfähigkeit des Arbeitspferdeeinsatzes beitragen.

Das Versprechen von Arbeitserleichterung und Gewinn an (Frei-)Zeit, das gerade in den Anfangszeiten der Traktoren ein wesentliches Verkaufsargument war, wurde nur unzureichend eingelöst. Im Gegenteil: Die zunehmende Motorisierung ist einerseits die Folge, zugleich aber durch den damit verbundenen hohen Kapitaleinsatz auch eine wesentliche Ursache für das herrschende Gesetz des „Wachsen oder Weichen!“. Die Arbeitsbelastung gerade in der Landwirtschaft hat in den letzten Jahrzehnten vielfach eher zu- als abgenommen. Der Zeitgewinn durch beschleunigte Produktionsverfahren wird durch den Zwang zu immer größeren Produktionseinheiten zunichte gemacht. Die Entlastung bei verschiedenen Arbeitsvorgängen wird durch deren relative und absolute Zunahme mehr als aufgehoben (HERRMANN 1988, INHETVEEN 1997).

Der Fortschritt hat sich überholt: Der heutige Landwirt bearbeitet im Durchschnitt die 4-fache Fläche, setzt hierzu aber, verglichen mit seinen Vorgängern vor 70 Jahren, hochmoderne Technik mit der 84(!)-fachen Zugkraft ein (HEROLD 2008). Diese Entwicklung war nur möglich durch einen wachsenden Fremdkapitalanteil an den Betrieben (HERRMANN 1988). Die zunehmende Zahl an Betriebsaufgaben belegt, dass dieser Anteil in vielen Fällen offensichtlich *zu* hoch geworden ist.

2.2.5 Weitere Aspekte des Einsatzes von Arbeitspferden

Oberster Grundsatz für das Arbeiten mit Pferden ist zunächst einmal, dass man es wollen muss. D.h., die Einstellung des beteiligten Menschen ist entscheidend und, wie MORRISSEY (2009) vermutet, vielleicht *der* entscheidende Faktor bei der Bewertung von Pferdearbeit, der letztlich mehr zählt, als die bis hierher behandelten ökologischen und ökonomischen Fragestellungen.

Alleine der angesprochene deutlich höhere Aufwand an Pflege und Betreuung der Pferde gegenüber einem Schlepper, der sich nicht nur auf die Arbeitsphasen beschränkt, sondern in Form von Füttern, Misten, auf die Weide und in den Stall führen etc. jeden Tag ansteht und, zusammen mit dem Mehraufwand bei den landwirtschaftlichen Arbeiten, im Durchschnitt ein insgesamt um 20 % erhöhtes Arbeitspensum je Betrieb erzeugt (KENDELL 2005), setzt diese Grundeinstellung voraus. Hinzukommen muss der Respekt vor einem Lebewesen mit ausgeprägtem, sensiblem Verhaltensinventar, das wie wir Menschen „gute“ und „schlechte“ Tage hat und nicht jeden Tag gleich gut „funktioniert“. Eine angstfreie Beziehung zwischen Mensch und Pferd sind Grundvoraussetzung für eine möglichst stressfreie Arbeitsbewältigung sowie menschliche Zufriedenheit bei der Arbeit. Dies setzt beim Menschen ein hohes Maß an Selbstbeherrschung voraus. Passion für die Arbeit mit Pferden, Selbstbeherrschung und Ausgeglichenheit, fachliches Wissen und technisches Können bedingen das, was unter dem Begriff „Horsemanship“ zu verstehen ist. Es wird deutlich, dass Pferdearbeit keine generelle Alternative zur Maschinenarbeit sein kann, sondern nur für diejenigen geeignet ist, die die notwendigen Vorausset-

zungen und den Willen zur Umsetzung mitbringen. Wenn diese positive Grundeinstellung dem Pferd gegenüber allerdings vorhanden ist, gibt es über die bereits genannten Punkte hinaus weitere Vorteile des Pferdeeinsatzes, die erwähnenswert sind.

Ein vermehrter Einsatz von Arbeitspferden führt zu Dezentralisierung und kann damit ein Aspekt zur Erreichung nachhaltiger Wirtschaftsstrukturen sein. Arbeitspferde einsetzende Betriebe können ihre Zugkraft durch Zucht selbst schaffen oder regional von anderen Züchtern erwerben. Sie sind nicht angewiesen auf Traktoren, die von großen Industrieunternehmen gefertigt werden. Gleichzeitig führt der Ersatz fossiler Energie (Diesel) durch lebendige Pferdekraft zur Unabhängigkeit von den Preisschwankungen und -anstiegen des globalen Ölmarktes (JANSÉN 2000, BERRY 2010).

Auch die pferdegezogene Gerätetechnik ist aufgrund ihrer einfachen Konstruktion und eher kleinen Dimensionierung geeignet, in lokalen und regionalen, kleinen bis mittelständischen Unternehmen gefertigt zu werden. Die Arbeitsgeräte haben eher handwerklichen denn industriellen Charakter. Bei ihrer Herstellung wird weniger Material und Energie benötigt, als für Traktoren und entsprechende Technik. Auch die längere Haltbarkeit der Geräte hilft, Rohstoffe und Energie einzusparen.

Damit wird deutlich, dass Arbeitspferde einsetzende Betriebe unabhängiger sind von globalen industriellen Strukturen. Bei der Umsetzung einer kleinstrukturierten, vielfältigen und lokal orientierten Wirtschaft, die z.B. der Weltagrarbericht für die Landwirtschaft als einzig zukunftsfähige Strategie fordert (IAASTD 2009a und b), kann der Einsatz von Arbeitspferden anstelle von Traktoren ein wichtiger Baustein sein.

Geht man davon aus, dass zur ausschließlichen Bewirtschaftung mit Arbeitspferden im Durchschnitt 1 Pferd je 8 - 12 ha landwirtschaftlich genutzter Fläche (LF) gerechnet werden kann (ANDERSON 1943, zit. in COURTEAU 2007, DEGREIF 1993), so wären in Deutschland mit einer LF von insgesamt 16,7 Mio. ha im Jahr 2011 (BMELV 2012) etwa 1,4 bis 2,1 Mio. Pferde notwendig. Bei einem Futterflächenbedarf von 0,8 ha je Pferd (DEGREIF 1993) würden dabei zwischen 1,1 und 1,7 Mio. ha oder 6 % bis 10 % der gesamten LF zur Futtererzeugung benötigt. Rechnet man im Durchschnitt einen Fuhrmann je 3 Arbeitspferde, so ergäbe sich ein Bedarf zwischen 370.000 und 700.000 Fuhrleuten. Im Jahr 2010 lag die Summe der Familien-Arbeitskräfte plus der ständigen familienfremden Arbeitskräfte in der deutschen Landwirtschaft bei 749.700, hinzu kamen 330.500 nichtständige familienfremde Arbeitskräfte, insgesamt also 1.080.200 Arbeitskräfte (BMELV 2012). Anhand dieser Zahlen wird deutlich, dass zumindest die Bewirtschaftung eines gewissen Anteiles der deutschen Landwirtschaft mit Arbeitspferden durchaus vorstellbar ist: Bei 5 % der gesamten LF wären es 23.200 bis 34.800 AK, bei 10 % 46.400 bis 69.600 AK.

Unter praktischen Aspekten kann der Einsatz von Arbeitspferden für bestimmte Arbeiten die einzige Alternative zur Handarbeit sein. Auf Streuobstwiesen z.B. ist der Einsatz von Traktoren weniger effektiv, da diese zum Teil gar nicht unter den herunter hängenden Ästen hindurch kommen. Der Bereich unter den Bäumen muss von Hand gemäht werden. Mit pferdegezogener Technik ist eine effektive Bewirtschaftung der gesamten Fläche problemlos machbar.

In Steillagen ist der Einsatz von pferdegezogenen Geräten auch dort noch möglich, wo kein Traktor mehr fahren kann. Die Bewirtschaftung von sehr feuchten bis nassen Standorten ist mit Arbeitspferden ohne ökologische Folgeschäden möglich, während Traktoren hier massive Bodenschäden anrichten. Diesen Beispielen ließen sich sicher noch viele weitere anfügen, bei denen Arbeitspferde aufgrund ihres geringeren Gewichtes, ihrer Bodenverträglichkeit und ihrer Wendigkeit die bessere, oft auch die einzige Alternative darstellen.

Nicht zuletzt würde vermehrte Pferdearbeit Arbeitsplätze im lokalen Umfeld schaffen. Sattler und Schmiede, um nur zwei besonders eng mit der Pferdearbeit verbundene Berufe zu nennen, gäbe es sicher mehr als heute. Und auch die modernen pferdegezogenen Maschinen würden, wie bereits erwähnt, wohl nicht von großen, durchrationalisierten agroindustriellen Konzernen gebaut, sondern eher von kleinen und mittelständischen Unternehmen. Die Erfahrungen zeigen, dass eine industrialisierte Produktion, wie sie heute bei Landmaschinen

üblich ist, gar nicht in der Lage wäre, auf die vielen standortbedingten Besonderheiten einzugehen, die die vergleichsweise geringe Dimension der pferdegezogenen Maschinen verlangt. Somit ist der Einsatz von Arbeitspferden auch indirekt ein taugliches Mittel zur Sicherung und Entwicklung des ländlichen Raumes.

2.2.6 Forschungsbedarf zum zeitgemäßen Einsatz von Arbeitspferden im Ökologischen Landbau

Durch die unzureichende Datengrundlage zum modernen Arbeitspferdeeinsatz werden die Vorteile, die das Pferd nicht nur bei ökologischer Betrachtung dem Schlepper gegenüber aufzuweisen hat, in ihrer Bedeutung noch nicht erkannt: Das Festhalten am Einsatz von Arbeitspferden bzw. dessen Wiedereinführung gelten daher als rückschrittlich, als anachronistisch. Die verbreitete ablehnende Haltung gegenüber dem Einsatz von Arbeitspferden erklärt sich vor allem aus der im Vergleich zum Traktor oftmals geringeren Schlagkraft und dem daraus folgenden höheren Arbeitskräftebedarf. Wer gegen das Arbeitspferd argumentiert, hat oftmals nicht das Pferd selber vor Augen, sondern die veraltete und wenig leistungsstarke Gerätetechnik, die damit in Zusammenhang gebracht wird (DEGREIF 1993). Zahlen zur Leistungsfähigkeit des Pferdeeinsatzes beruhen nahezu gänzlich auf Untersuchungen und Erfahrungen mit zum Teil Jahrzehnte alter pferdegezogener Technik, während Leistungsdaten zu modernen pferdegezogenen Geräten bislang erst in Ansätzen und vorwiegend im Bereich des Erfahrungswissens einiger weniger Pferde einsetzender Betriebe vorhanden sind. Eine umfassende objektive Bewertung des Einsatzes von Arbeitspferden ist daher gegenwärtig nicht möglich.

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen, dass es zwar umfangreiche „historische“ Untersuchungen zum landwirtschaftlichen Einsatz von Arbeitspferden gibt, aber so gut wie keine Arbeiten, die sich auf die heutigen Einsatzmöglichkeiten und Rahmenbedingungen beziehen. Als Voraussetzung dafür, dass die angeführten positiven Aspekte des Pferdeeinsatzes in der Landwirtschaft zum Tragen kommen, aber auch für das Erkennen der Grenzen und möglichen Nachteile dieser Arbeitsweise, sind dringend Erkenntnisse über die moderne Arbeitspferdetechnik vonnöten.

Wissenschaftlich erhobene Daten zum Leistungspotential moderner Arbeitspferdetechnologie sind Voraussetzung sowohl für eine objektive Bewertung als auch für eine fundierte Planung und Umsetzung des Einsatzes moderner pferdegezogener Geräte in der Praxis. Diese Daten sind das unerlässliche Fundament zur Formulierung von Kalkulationsunterlagen für den modernen Arbeitspferdeeinsatz, wie sie für den Einsatz von Traktoren bereits in vielfältiger Form zur Verfügung stehen. Die vorliegende Arbeit versteht sich als einen ersten Beitrag in dieser Richtung.

Die Erhebung von Daten zur technischen Performance moderner pferdegezogener Geräte muss ergänzt werden durch Untersuchungen, die sowohl die Bereiche des Natur- und Tierschutzes, als auch soziale, ökonomische und politische Fragestellungen umfassen. So stammen die meisten Erkenntnisse hinsichtlich der Auswirkungen von Pferden (und Schleppern) auf den Boden mit wenigen Ausnahmen aus dem forstwirtschaftlichen Bereich. Erstmals hat die Arbeit von MORDHORST (2009) sehr deutliche Hinweise darauf gegeben, dass auch im landwirtschaftlichen Bereich offensichtlich große Unterschiede in der Auswirkung auf den Boden bestehen und der Pferdeeinsatz den Boden nicht nur schützen, sondern sogar regenerieren kann. Hier sind tiefer gehende Untersuchungen notwendig, um die unterschiedlichen Mechanismen besser zu verstehen und die offensichtlich positive Wirkung des Pferdeeinsatzes zu beschreiben und zu quantifizieren. Gleiches gilt für die Auswirkung moderner Pferdetechnik auf Flora und Fauna sowie die Fragen des Energieverbrauches.

Der Tierschutz ist in Deutschland im Grundgesetz verankert. Untersuchungen zum Arbeitspferdeeinsatz sind notwendig, die Aufschluss geben über die Beanspruchung der Pferde bei den unterschiedlichen Arbeiten, um einen tiergerechten Einsatz zu garantieren. Auch Fragen bzgl. Haltung, Fütterung und Pflege der Pferde, die tiergerecht und zugleich arbeitswirtschaftlich sind, sind erst in Ansätzen beantwortet (ELSBACH 2010).

Eine wesentliche Fragestellung ist die nach den notwendigen Rahmenbedingungen, die denen, die danach streben, eine attraktive Existenz durch und mit Pferdearbeit ermöglichen. Dabei geht es nicht zuletzt auch um politische Entscheidungen. Da der Faktor Lohnkosten den Arbeitspferdeeinsatz in der Landwirtschaft derzeit zu begrenzen scheint (STRÜBER 2011), gilt es hier nach Lösungen zu suchen.

Nicht zuletzt ist auch die agrartechnische Forschung gefragt, derzeit noch fehlende moderne Pferdegeräte zu entwickeln. Die momentane Diskussion und die vorliegenden Erfahrungen weisen darauf hin, dass effizienter Pferdeeinsatz nicht mit Vorderwagen und angehängtem Schleppergerät, sondern langfristig nur mit speziell für den Pferdezug entwickelten Geräten möglich ist, die ausschließlich mit Pferdekraft operieren und keine Aufbaumotoren benötigen. Dabei wird es vermutlich notwendig sein, ganze Arbeitskettens zu untersuchen und Alternativen zu Arbeitsschritten wie z.B. dem Pressen oder dem Wickeln von Rundballen zu entwickeln, die zu ihrer Realisierung eines extrem hohen Energieinputs und/oder eines Antriebs des Gerätemechanismus im Stillstand bedürfen. Hierbei können mit Sicherheit in vielen Fällen die ausgereiften Eigenschaften und Mechanismen der historischen Pferdegeräte als Vorbild genommen und mit modernsten Materialien und Prinzipien auf die heutige Zeit übertragen werden.

3. Untersuchungen zum Leistungspotential moderner pferdegezogener Technik auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen - Parzellenversuch

3.1 Material und Methoden

3.1.1 Versuchsstandorte

Der Parzellenversuch wurde in den Jahren 2000 und 2001 auf Flächen der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen durchgeführt, dem Versuchsbetrieb für Ökologischen Landbau der Universität Kassel. Der 320 ha große voll arrondierte Betrieb wurde im Juli 1998 von der Universität Kassel gepachtet und wird seitdem nach den Richtlinien des Ökologischen Landbaus bewirtschaftet. Der Betrieb ist Mitglied der Anbauverbände Bioland und Naturland.

Vor der Übernahme durch die Universität Kassel wurde die Staatsdomäne etwa 25 Jahre lang von einem privaten Pächter als intensiv wirtschaftender, konventioneller, viehloser Ackerbaubetrieb mit den Schwerpunkten Getreidesaatgutvermehrung und Zuckerrübenanbau bewirtschaftet.

Die Domäne liegt ca. 10 km nördlich der Stadt Kassel in der landwirtschaftlich begünstigten Hofgeismarer Rötsecke in einer Höhenlage von 160 m - 250 m über NN. Das Klima ist gekennzeichnet durch eine durchschnittliche Jahresniederschlagsmenge von 650 mm sowie eine mittlere Jahrestemperatur von 8,5° C. Vorherrschende Bodenarten sind verschiedene Lehme aus weichen Tonsteinen des oberen Buntsandsteins (Röt), zum Teil mit Lößauflagen. In dem die Versuchsflächen umfassenden Teil der Domäne finden sich zudem sechs kleinere Basaltkegel, die z.T. von tertiären Sanden aus dem Eozän umgeben sind. Vereinzelt finden sich verstreut über das Gelände der Domäne tertiäre Quarzite bis Blockgröße. Die Bodenwertzahlen reichen von 25 bis 82 Bodenpunkten, wobei Flächen mit Bodenzahlen zwischen 55 und 75 einen großen Teil der Fläche einnehmen. Vorherrschende Bodentypen sind Parabraunerden aus Löß sowie auf den Kuppen Pelosole und in den Senken Kolluvisole (ANONYMUS 2010).

Die Versuchspartellen lagen im Jahr 2000 auf dem Schlag „Obere Kiebitzbreite 2a“, einem 1999 angesäten Kleegrasbestand. Der Schlag umfasst insgesamt 10,6 ha und ist im Bereich der Versuchspartellen leicht nach Osten exponiert. Die Ausrichtung der Längsseiten der Partellen und damit auch die Mahdrichtung war Nord-West – Süd-Ost.

Im Jahr 2001 wurde der Versuch auf dem Schlag „Auf dem Brand“ durchgeführt, einem ebenfalls 1999 angesäten Kleegrasbestand mit einer Fläche von insgesamt 14,9 ha. Die Mahdrichtung war ebenfalls Nord-West – Süd-Ost.

3.1.2 Untersuchte Varianten

Im Parzellenversuch wurden insgesamt sieben verschiedene pferdegezogene Varianten sowie zwei Schleppervarianten vergleichend untersucht (s. Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Varianten des Parzellenversuchs 2000 und 2001

Variante	Gerät Arbeitsbreite	Zapfwellen- antrieb über	Zwillings- reifen hinten?	Nr. der Parzellen in 2000, vgl. Abbildung 3-2	Nr. der Parzel- len in 2001, vgl. Abbildung 3-4	Durch- geführte Schnitte
1	Bautz GM 20 1,30 m	Boden	Nein	1, 14, 22, 28	-----	Sept. 2000
2	Pintow Power Cart mit Doppelmesser- mähwerk 1,65 m	Boden	Nein	8, 9, 18, 26	1, 9, 15, 17	Sept. 2000 Juni 2001 Juli 2001
3	Pintow Power Cart mit Doppelmesser- mähwerk 1,65 m	Motor	Nein	-----	2, 8, 11, 19	Juni 2001 Juli 2001
4	Pintow Power Cart mit Doppelmesser- mähwerk 1,65 m	Boden	Ja	2, 10, 17, 31	-----	Aug. 2000 Sept.2000
5	Pintow Power Cart mit Doppelmesser- mähwerk 1,65 m	Motor	Ja	3, 13, 24, 25	-----	Aug. 2000 Sept.2000
6	Pintow Power Cart mit Doppelmesser- mähwerk 1,90 m	Motor	Nein	4, 11, 21, 29	3, 6, 14, 20	Aug. 2000 Sept. 2000 Juni 2001 Juli 2001
7	Pintow Power Cart mit Doppelmesser- mähwerk 2,40 m	Motor	Nein	7, 12, 20, 27	4, 10, 12, 18	Aug. 2000 Sept. 2000 Juni 2001 Juli 2001
8	Fendt Farmer 309 C mit Doppelmesser- mähwerk 2,40 m	Motor	-----	5, 15, 19, 30	5, 7, 13, 16	Aug. 2000 Sept. 2000 Juni 2001 Juli 2001
9	Fendt Farmer 309 C mit Front-Scheiben- mähwerk 2,90 m	Motor	-----	6, 16, 23, 32	-----	Aug. 2000 Sept. 2000

Einige dieser Varianten kamen nur in einem Versuchsjahr zum Einsatz:

- Varianten 1, 4 und 5 nur im ersten Versuchsjahr,
- Variante 3 nur im zweiten Versuchsjahr.

3.1.3 Eingesetzte Pferde und Geschirre

Die Untersuchungen wurden mit zwei Ardenner-Wallachen durchgeführt (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und Abbildung A-1 im Anhang). Beide Pferde wurden aus dem Besitz von *Charles A. Pinney* aus Honiton in Großbritannien gekauft, der sie für landwirtschaftliche Arbeiten ausgebildet und mehrere Jahre eingesetzt hatte. Die Pferde wurden im Mai 1999 vom Fachgebiet Ökologischer Land- und Pflanzenbau der Universität Kassel erworben und auf die Hessische Staatsdomäne Frankenhausen verbracht.

Diese universitätseigenen Pferde waren beim dritten und vierten Block des zweiten Versuchsdurchganges im September 2000 krankheitsbedingt nicht einsatzfähig. Daher wurden diese Blöcke mit zwei Ardenner-Stuten bearbeitet, gefahren von ihrem Züchter und Besitzer *Nicolas Hamen* aus Drauffelt in Luxemburg. Auch diese Pferde waren mit landwirtschaftlichen Arbeiten vertraut.

Bei den Versuchen arbeiteten alle vier Pferde in amerikanischen Arbeits-Kumtgeschirren vom Typ „Team Leather Work Harness (Basic work harness)“ der Firma *Aaron Martin Harness Ltd.* in Wallenstein, Ontario (Canada) (s. Abbildung A-1 im Anhang). Die Pferde wurden mit Kreuzleine gefahren, bei allen Pferden wurde ein ungebrochenes Stangengebiss (ein so genanntes „straight bar bit“) verwendet.

Tabelle 3-2: Bei den Versuchen eingesetzte Pferde

Rasse, Geschlecht	Name	Eltern	Geburtsdatum	Züchter
Ardenner, Wallach	Piroux de Montauchamps	V: Coca de Montauchamps M: Gitane	24.05.1994	Pol Jaspert, Houdemont (Belgien)
Ardenner, Wallach	Alphonse de Fuusselach	V: Albion d'Hargi M: Mistinguette de la Petrusse	29.03.1993	Dr. Pit Schlechter, Schoos (Luxemburg)
Im dritten und vierten Block des zweiten Versuchsdurchganges im September 2000 statt dieser eingesetzt:				
Ardenner, Stute	Charlotte des Roses	V: Valseur de Verenne M: Etoile du Monty	18.03.1992	Nicolas Hamen, Drauffelt (Luxemburg)
Ardenner, Stute	Dragonne des Deux Ourthes	V: Marquis de Chincha M: Bichette de Marbehan	12.06.1996	Nicolas Hamen, Drauffelt (Luxemburg)

3.1.4 Untersuchte Geräte

Grasmäher

Bei dem pferdegezogenen Grasmäher handelte es sich um einen „GM 20“ der Firma *Bautz* mit zweiräderigem Vorderkarren und einem Normalschnitt-Fingerbalken mit einer ausgemessenen Arbeitsbreite von

1,30 m (s. Abbildung A-1 im Anhang). Das Gerät besitzt bereits ein Ölbadgetriebe für den Messerantrieb. Weitere Daten sind Tabelle 3-3 zu entnehmen.

Tabelle 3-3: Technische Daten der untersuchten Maschinen

	Schlepper	Vorderwagen	Grasmäher	Doppelmesser- mähwerk	Scheiben- mähwerk
Bezeichnung	Fendt Farmer 309 C	Pintow Power Cart	Bautz GM 20, Fabrik No. 134085	Mörtl BM 1205	Mörtl FT 295
Baujahr	1999	1999	ca. 1935 -1940	2000	2000
Arbeitsbreite (m)			1,30	1,65 / 1,90 / 2,40	2,90
Gewicht ca. (kg)	4.500	640	384	196 / 200 / 206	890
Erforderliche Schlepper-KW (-PS) ca.				20 (27)	59 (80)
Leistungs- aufnahme (kW/PS)				3,8/5,0 (1,65 m) 4,2/5,7 (1,90 m) 5,3/7,2 (2,40 m) ⇒ 2,2 kW pro Meter Arbeitsbreite	22,89 ⇒ 7,76 kW pro Meter Arbeitsbreite
Bereifung (vorne)	440/65R24	165 R 15	Eisenräder Ø = 28 cm Breite = 8 cm		
Bereifung (hinten)	540/65R34	6.00 - 16	Eisenräder Ø = 82 cm Breite = 11 cm		

Quelle: Eigene Erhebungen, DLG (1987), MÖRTL (o.J.), MÖRTL (1997)

Vorderwagen

Zum Einsatz kam ein „Pintow Power Cart“ der Firma *Carthorse Machinery* in Wales (GB) (vgl. Abbildung A-2 und Abbildung A-7 im Anhang). Der vierrädrige *Pintow Power Cart* verfügt über eine Dreipunkthydraulik der Kategorie 1 sowie einen externen Hydraulikanschluss. Beide Hydraulikkreisläufe können entweder mittels Hand- oder elektrischer Pumpe bedient werden. Im Versuch kam lediglich die elektrische Pumpe zum Einsatz. Der Antrieb der angehängten Geräte erfolgt über eine Standard-Zapfwelle. Diese wiederum kann entweder über die Hinterräder des Vorderwagens („Bodenantrieb“) oder mittels des Aufbaumotors vom Typ „OHC 18“ der Marke *Kohler*, Wisconsin (USA), mit 13,4 kW (= 18 PS) („Motorantrieb“) angetrieben werden. Speziell für den Einsatz im wissenschaftlichen Versuch wurden an dem Vorderwagen einige Veränderungen vorgenommen. Wesentlich für den hier beschriebenen Versuch ist die Vorverlagerung des Anhängepunktes der Spielwaage um ca. 0,5 m, die den Einbau einer Kraftmessdose zur Messung der Zugkraft ermöglicht. Weitere Daten zum *Pintow Power Cart* sind Tabelle 3-3 zu entnehmen.

Schlepper

Bei dem eingesetzten Schlepper handelte es sich um einen „Farmer 309 C“ der Firma *Fendt*, ein konventioneller Allradschlepper mit 70 kW (= 95 PS). Weitere Daten sind Tabelle 3-3 zu entnehmen.

Doppelmessermähwerke und Scheibenmähwerk

Untersucht wurde ein Heck-Doppelmessermähwerk vom Typ „BM 1205“ der Firma *Mörtl* in Pöttmes, Bayern, mit hydraulischem Aufzug und drei verschiedenen Mähbalken (Arbeitsbreiten: 1,65 m, 1,90 m und 2,40 m). Alle drei Arbeitsbreiten wurden am Power Cart eingesetzt, das Mähwerk mit 2,40 m Arbeitsbreite zusätzlich auch am Schlepper im Heckanbau.

Darüber hinaus wurde bei den Versuchen im Jahr 2000 am Schlepper ein Front-Scheibenmähwerk vom Typ „FT 295“ der Firma *Mörtl* mit einer Arbeitsbreite von 2,90 m eingesetzt. Weitere technische Daten der Mähwerke sind Tabelle 3-3 zu entnehmen.

3.1.5 Versuchsanlagen

Der Parzellenversuch diente dem direkten Vergleich unterschiedlicher pferde- und schleppergezogener Mähwerke unter einheitlichen Bedingungen. Er wurde in beiden Jahren (2000 und 2001) in Form einer randomisierten Blockanlage mit vier Blöcken angelegt (s. Abbildung 3-1 und 3-3).

Jeder Block beinhaltete im Jahr 2000 acht Parzellen (entsprechend den acht untersuchten Varianten), im Jahr 2001 fünf Parzellen (entsprechend den fünf untersuchten Varianten; vgl. Tabelle 3-1). Die randomisierte Lage der Parzellen innerhalb der Blöcke ist aus Abbildung 3-2 und Abbildung 3-4 ersichtlich. Die Parzellen wurden für den Versuch von links nach rechts von 1 bis 32 (im Jahr 2000) bzw. von rechts nach links von 1-20 (im Jahr 2001) durchnummeriert.

Die Parzellen waren jeweils 141 m lang und entsprechend der fünffachen Arbeitsbreite des zugehörigen Mähwerkes breit. Die Größe der Parzellen wurde angelehnt an die vom KTBL verwendete Flächengröße zur Ermittlung der Flächenleistung landwirtschaftlicher Maschinen (dort: $141 \text{ m} \times 70 \text{ m} = 9.870 \text{ m}^2 = \text{ca. } 1 \text{ ha}$; vgl. z.B. KTBL 1998). Zwischen den Parzellen sowie auf allen vier Seiten der Versuchsanlage befand sich jeweils ein Randstreifen, der zum Anmähen bzw. zum Wenden notwendig war. Diese Streifen wurden im Jahr 2000 mit dem Front-Scheibenmähwerk (Arbeitsbreite 2,90 m), im Jahr 2001 mit einem Front-Kreiselmähwerk (Arbeitsbreite 2,70 m) unmittelbar vor Versuchsbeginn gemäht.

Die Größe der Versuchsanlage betrug in 2000 insgesamt $412,70 \text{ m} \times 146,80 \text{ m}$, entsprechend 6,06 ha; hiervon entfielen 4,47 ha auf die Parzellen, die Randbereiche um die Parzellen herum machten insgesamt 1,59 ha aus (vgl. Abbildung 3-1). Im Jahr 2001 war die Versuchsanlage insgesamt $256,70 \text{ m} \times 146,80 \text{ m}$, entsprechend 3,77 ha, groß. Hiervon entfielen 2,82 ha auf die Parzellen und 0,95 ha auf die Randbereiche (vgl. Abbildung 3-3). Die Lage der Varianten (vgl. Tabelle 3-1) innerhalb der Blöcke zeigen Abbildung 3-2 und Abbildung 3-4.

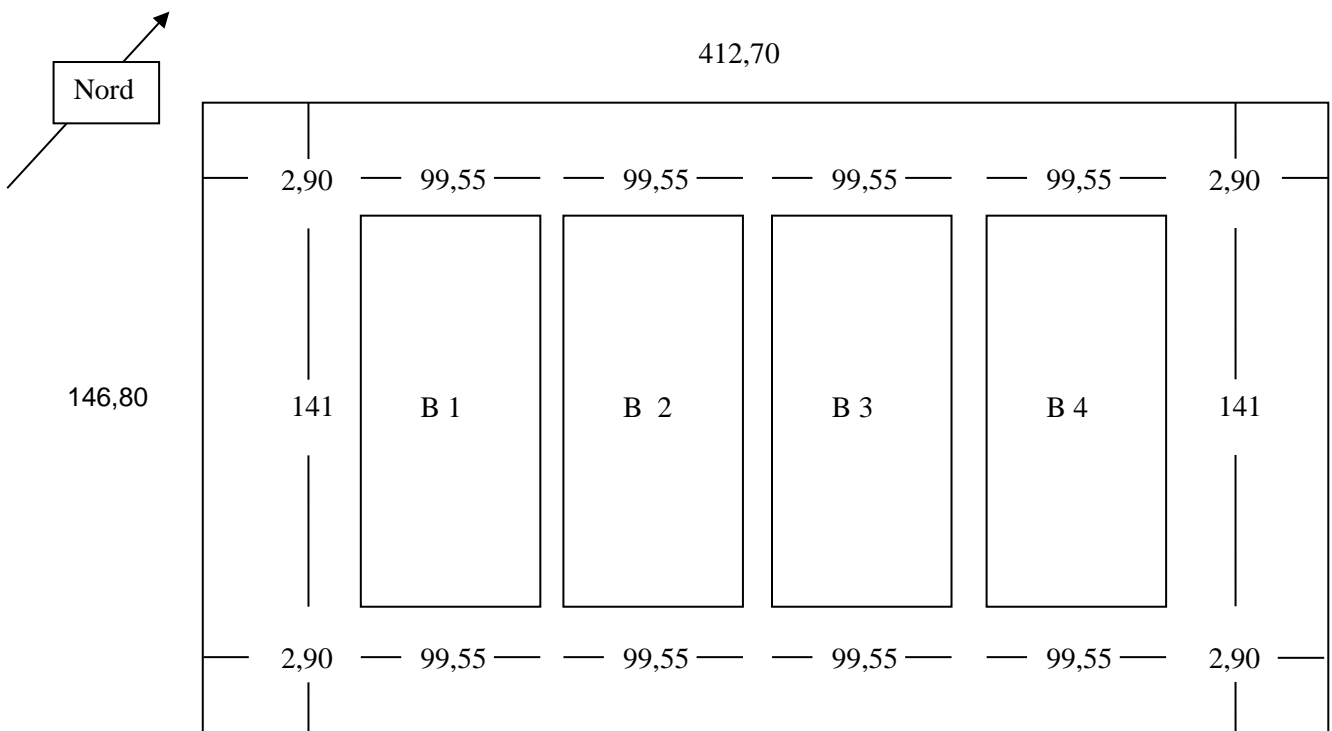


Abbildung 3-1: Versuchsanlage 2000, Anordnung und Abmessung der Blöcke (B1-B4)

alle Längenangaben in Meter

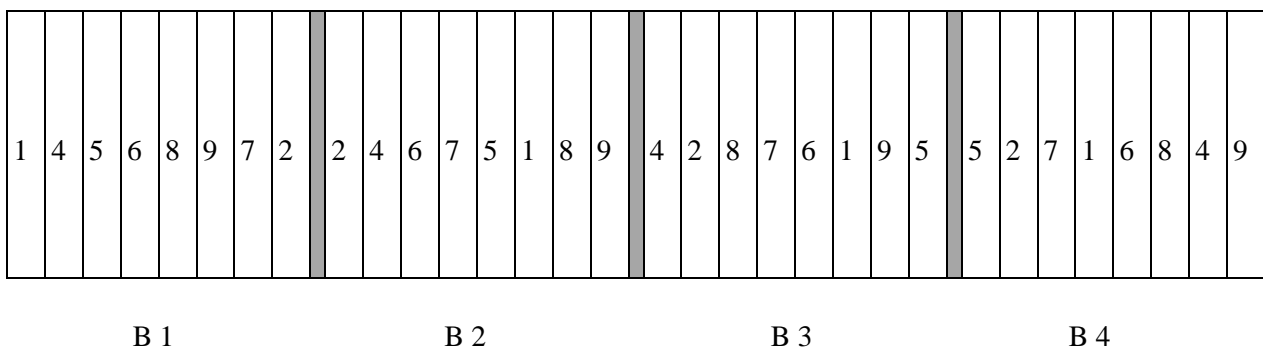


Abbildung 3-2: Versuchsanlage 2000, Lage der Varianten innerhalb der Blöcke (B1-B4)

die Randparzellen der Blöcke grenzen unmittelbar aneinander; die grauen Streifen dienen hier lediglich der Verdeutlichung

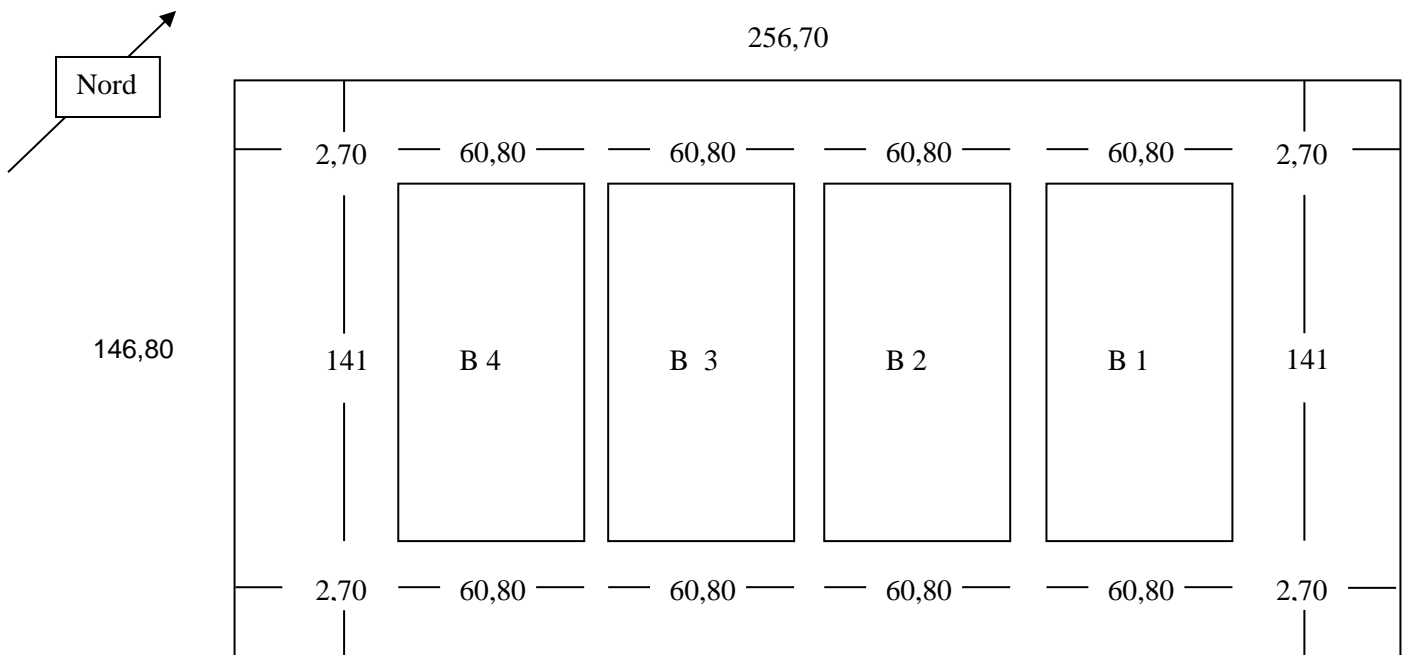


Abbildung 3-3: Versuchsanlage 2001, Anordnung und Abmessung der Blöcke (B1-B4)

alle Längenangaben in Meter

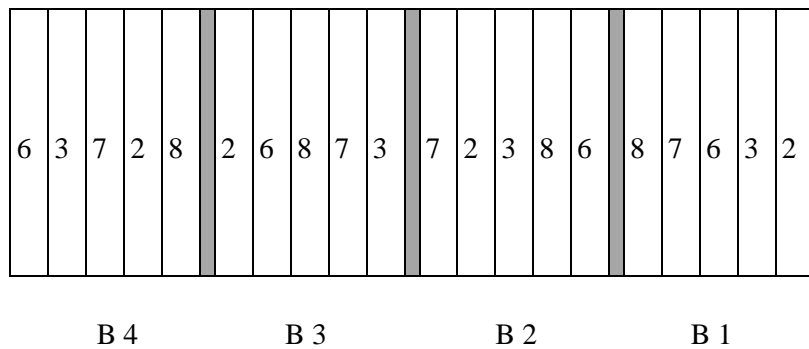


Abbildung 3-4: Versuchsanlage 2001, Lage der Varianten innerhalb der Blöcke (B1-B4)

die Randparzellen der Blöcke grenzen direkt aneinander; die grauen Streifen dienen hier lediglich der Verdeutlichung

3.1.6 Erhobene Parameter

3.1.6.1 Topographie und Bodenart

Topographie

Die Lage der einzelnen Parzellen auf der Versuchsfläche wurde mit Hilfe eines „Global Positioning System“ (GPS) der Firma *Leica* exakt eingemessen, so dass deren genaue geographische Lage bekannt war. Durch Überlagerung einer Karte mit den eingezeichneten Versuchspartellen und einer Hangneigungskarte der betreffenden Flächen in einem „Geographischen Informationssystem“ (GIS) konnte die Topographie für jede Parzelle bestimmt werden. Dazu wurden ein Transsekt in die Parzellenmitte gelegt und die auf diesem Transsekt liegenden Punkte mit Angaben zur Höhe über NN erfasst. Diese Arbeiten wurden von Dipl.-Ing. *Cindy Baierl* vom Fachbereich Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung der Universität Kassel, Fachgebiet Ökologische Standorts- und Vegetationskunde, durchgeführt. Im Ergebnis lag für jede Parzelle eine Tabelle mit sechs bis neun Wertepaaren aus Position in der Parzelle und zugehöriger Höhe über NN vor (vgl. Abbildung 3-5).

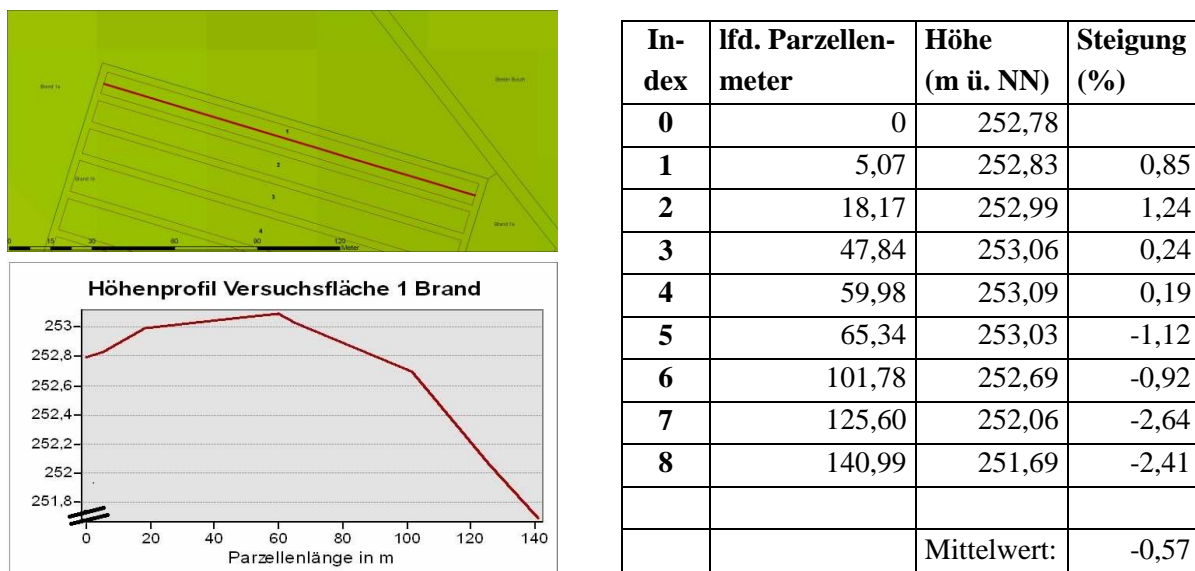


Abbildung 3-5: Ermittlung der mittleren Steigung der Versuchspartellen am Beispiel der Parzelle 1 auf der Versuchsfläche „Auf dem Brand“ **Graphik: C. Baierl**

Aus diesen Wertepaaren wurde die Steigung in % zwischen den jeweils benachbarten Messpunkten und daraus wiederum durch Mittelwertbildung die durchschnittliche Steigung der Parzelle berechnet.

Die topographischen Verhältnisse der beiden Versuchsflächen unterscheiden sich zu einem gewissen Grad. Beide Flächen sind nicht völlig eben, sondern weisen eine leichte Hangneigung auf. Während sich die Steigungswerte auf der Fläche *Kiebitzbreite* im Bereich zwischen 2,36 % und 4,87 % bei einem Mittelwert von 3,55 % alle im positiven Bereich bewegen, liegen diese Werte auf der Fläche *Brand* zwischen -1,35 % und 2,89 %, bei einem Mittelwert von 0,09 % (vgl. Tabelle A-4 und Tabelle A-5 im Anhang). Die Fläche *Brand* ist also deutlich ebener als die *Kiebitzbreite* und weist positive wie negative Steigung (Gefälle) auf, beides

jedoch in einem geringen Bereich. Auf der *Kiebitzbreite* ist die Steigung auf der gesamten Fläche gleichsinnig und deutlich ausgeprägter als auf dem *Brand*.

Betrachtet man die Steigungsverhältnisse jeweils für die vier Blöcke der Versuchsfächen so zeigt sich, dass auf der *Kiebitzbreite* die mittleren Blöcke steiler sind als die beiden äußeren Blöcke (vgl. Tabelle 3-4). Auf dem *Brand* ist es gerade umgekehrt, hier sind die mittleren Blöcke flacher geneigt, während der vierte Block durch einen deutlich höheren Wert gegenüber den anderen Blöcken gekennzeichnet ist.

Tabelle 3-4: Mittlere Steigung (%) der Blöcke auf den beiden Versuchsfächen

Block	Mittlere Steigung Kiebitzbreite (%)	Mittlere Steigung Brand (%)
1	2,64	0,89
2	4,16	-0,83
3	4,07	0,15
4	3,35	1,94

Bezogen auf die Varianten ergeben sich die in Tabelle 3-5 dargestellten Werte für die mittlere Steigung. So betrachtet stellen sich die Verhältnisse auf den beiden Versuchsfächen jeweils deutlich ausgeglichener dar. Auf der *Kiebitzbreite* liegen die Steigungswerte zwischen 3,33 % und 3,74 %, auf dem Brand zwischen -0,09 % und 0,20 %.

Tabelle 3-5: Mittlere Steigung (%) der Varianten auf den beiden Versuchsfächen

fehlende Werte: Varianten kamen auf den betreffenden Flächen nicht vor (vgl. Kapitel 3.1.5)

Variante	Mittlere Steigung Kiebitzbreite (%)	Mittlere Steigung Brand (%)
1	3,74	-
2	3,67	0,13
3	-	0,12
4	3,47	-
5	3,60	-
6	3,34	0,20
7	3,68	0,11
8	3,60	-0,09
9	3,33	-

Da nicht auszuschließen war, dass auch diese relativ geringen und - bezogen auf die untersuchten Varianten - insgesamt recht nah beieinander liegenden Steigungswerte bereits einen spürbaren Einfluss auf die Ergebnisse haben könnten, wurden sie in die statistischen Berechnungen mit einbezogen. Dabei zeigte sich jedoch, dass bei keinem der untersuchten Parameter ein signifikanter Einfluss der Topographie auf die Ergebnisse nachzuweisen war (vgl. Kapitel 3.1.7).

Bodenverhältnisse

Um über die Böden und ihren Versorgungszustand mehr zu erfahren, wurde ab 1998 vom Fachgebiet Bodenkunde der Universität Kassel eine umfangreiche Bodenkartierung aller Flächen der Domäne Frankenhausen im 50 m-Raster durchgeführt. An insgesamt ca. 1.200 Rasterpunkten, die alle mit GPS eingemessen wurden und deren genaue geographische Lage dadurch bekannt ist, wurden an einem 1 m tiefen Bohrkern, der mit einem Pürckhauer-Bohrstock gewonnen wurde, die Bodenprofile nach der Kartieranleitung beschrieben (BRANDT et al. 2001).

Zur Beschreibung der Bodenverhältnisse der Versuchsflächen wurden die Ergebnisse der innerhalb der Versuchsflächen liegenden Punkte der 50 m-Rasterkartierung herangezogen. Zusätzlich werden die Ackerzahlen der Reichsbodenschätzung graphisch dargestellt.

Auf der Kiebitzbreite liegen die Punkte Nr. 646-655, 664-672 und 681-689 der 50 m-Rasterkartierung innerhalb der Versuchsfläche, insgesamt also 28 Punkte (vgl. Abbildung 3-8). Die Ergebnisse der Rasterkartierung für diese Punkte zeigen als Bodentyp im westlichen knappen Drittel der Versuchsfläche (erster und Teile des zweiten Blocks), eine z.T. pseudovergleyte Parabraunerde, die übrige Fläche wird durch ein Kolluvisol gebildet (vgl. auch Tabelle A-6 im Anhang). Der Ap-Horizont ist an nahezu allen Messpunkten 35 cm mächtig und besteht bei beiden Bodentypen aus tonigem Schluff (Ut)

Auf der Fläche Auf dem Brand liegen die Rasterpunkte 1194, 1195, 1198, 1202-1207, 1212-1216 und 1221-1223, insgesamt 18 Punkte innerhalb der Versuchsfläche (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Der erste Block wird vornehmlich von Parabraunerden gebildet, während der zweite und der dritte Block überwiegend Braunerden aufweisen. Der vierte Block besteht im westlichen Drittel aus einer Parabraunerde, der Mittelteil wird von einem Pelosol beherrscht, während das östliche Drittel von einem Kolluvisol gebildet wird (vgl. Tabelle A-7 im Anhang).

Die Mächtigkeit des Ap-Horizontes schwankt zwischen 28 cm und 35 cm, er besteht aus tonigem Schluff (Ut) bis schluffigem Ton (Tu).

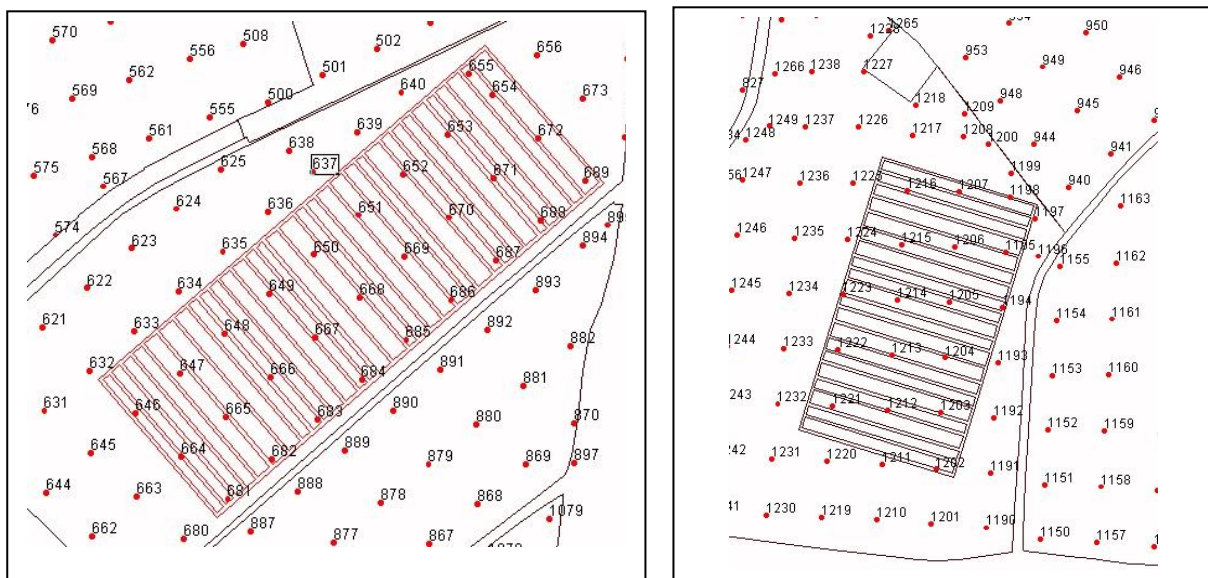


Abbildung 3-6: Rasterpunkte der Bodenkartierung innerhalb der Versuchsfläche auf der Kiebitzbreite (links) und Auf dem Brand (rechts)

Graphik: T. Fricke

Die Verteilung der Ackerzahlen der Reichsbodenschätzung zeigt Abbildung 3-7.

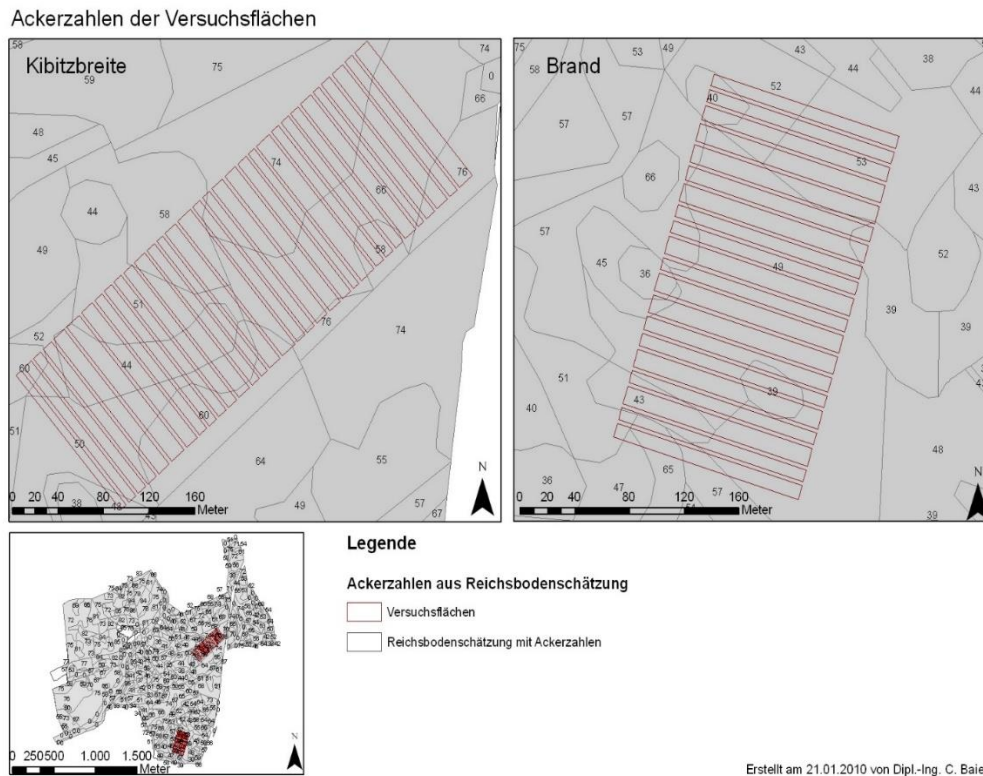


Abbildung 3-7: Ackerzahlen der Reichsbodenschätzung für die Versuchsflächen „Obere Kiebitzbreite 2“ (links) und „Auf dem Brand“ (rechts)

Graphik: C. Baierl

Die Werte liegen auf der „Oberen Kiebitzbreite“ zwischen 44 und 60 Bodenpunkten im südwestlichen bzw. 58 und 76 Bodenpunkten im nordöstlichen Bereich. Die Werte für die Fläche „Auf dem Brand“ liegen mit 39 bis 53 Bodenpunkten niedriger, die Fläche ist homogener als die Kiebitzbreite.

3.1.6.2 Vegetation

Die Vegetation wurde am Tag vor dem jeweiligen Versuchsdurchgang für jede der vier Wiederholungen aufgenommen. Auf einer Diagonale über die jeweilige Wiederholung wurden acht (in 2000) bzw. fünf (in 2001) Probestellen à 1 m² im Abstand von ca. 20 m zueinander untersucht. Somit entsprach jede Probestelle einer bestimmten Parzelle. Die Probestellen wurden gemäß den folgenden Kriterien untersucht.

Artenzusammensetzung und Deckungsgrad

Hinsichtlich der Artenzusammensetzung der Vegetation wurden zum einen die jeweilige Ansaatmischung anhand der Unterlagen des Betriebes sowie der tatsächliche Artenbestand anhand der in den Probestellen vorkommenden Pflanzenarten aufgenommen. Alle in den Probestellen vorkommenden Pflanzenarten wurden bestimmt und mit deutschem und lateinischem Artnamen aufgelistet. Hierbei wurde unterschieden zwischen Gräsern und Kräutern.

Beim zweiten Durchgang in 2001 wurden bei den Gräsern die Arten nicht mehr unterschieden, da ihr Deckungsgrad recht gering war und die Gräser sich alle noch im vegetativen Stadium befanden, was die Bestimmung sehr erschwert.

Der Deckungsgrad wurde für jede Pflanzenart in Prozent an der Gesamtdeckung der jeweiligen Probestelle bestimmt. Bei einer Deckung unter 1 % wurde noch einmal differenziert in „+“ = mehrere Exemplare, aber Deckung ≤ 1 % und „r“ = einzelne Exemplare, Deckung ≤ 1 %. Aus diesen Aufzeichnungen wurde anschließend der Deckungsgrad bestimmt für:

- die Gesamtdeckung,
- den Deckungsgrad der Gräser und
- den Deckungsgrad der Kräuter.

Beide Versuchsflächen wurden im Herbst 1999 innerhalb einer Woche angesät, die *Kiebitzbreite* am 02.09.99 und der *Brand* am 24.08.99. In beiden Fällen wurde ein zweijähriges Klee gras angesät, das aus folgenden Komponenten bestand (vgl. Tabelle 3-6).

Tabelle 3-6: Verwendete Ansaatmischung (Herkunft: Camena) auf den Versuchsflächen Kiebitzbreite und Brand

Deutscher Artname	Wissenschaftlicher Artname	Sorte	Aussaatmenge (kg/ha)
Weißklee	Trifolium repens	Milkanova	3
Weißklee	Trifolium repens	Lirepa	2
Rotklee	Trifolium pratense	Maro	6
Deutsches Weidelgras	Lolium perenne	Limes	5
Deutsches Weidelgras	Lolium perenne	Fennema	5
		Summe:	21

Quelle: TAMM (2010)

Aus dieser einheitlichen Ansaatmischung hatten sich zum Versuchszeitpunkt auf den beiden Standorten unterschiedliche Pflanzenbestände entwickelt, wie die nachfolgende Tabelle 3-7 zeigt.

Auf beiden Versuchsflächen sind die Bestände mit fünf bzw. sechs Arten, im September 2000 sogar nur zwei Arten, ausgesprochen artenarm. Neben den ausgesäten haben sich auf der *Kiebitzbreite* fünf und auf dem *Brand* drei neue Arten angesiedelt, die mit Ausnahme des Wiesen-Schwingels (*Festuca pratensis*) und der Saat-Luzerne (*Medicago sativa*) allerdings nur sehr sporadisch vorkommen (vgl. Tabelle 3-6 und Tabelle 3-7).

Während auf der *Kiebitzbreite* der Rot-Klee (*Trifolium pratense*) bei beiden Versuchsdurchgängen nahezu einen Reinbestand bildet, besteht die Vegetation auf dem *Brand* zu 50 - 60 % aus Gräsern, vorwiegend Deutsches Weidelgras (*Lolium perenne*) und Wiesen-Schwingel (*Festuca pratensis*). Im zweiten Versuchsjahr weist die Vegetation auf dem *Brand* beim zweiten Versuchsdurchgang im Juli Lücken auf, die Gesamtdeckung liegt nur noch bei 92,3 %.

Tabelle 3-7: Artenzusammensetzung und Deckungsgrad der Vegetation auf den Versuchsf lächen „Obere Kiebitzbreite“ und „Auf dem Brand“

r = einzelne Exemplare, Deckung ≤ 1 %

? = keine Artbestimmung möglich (vgl. Text)

Art		Deckung (%)			
		Obere Kiebitzbreite		Auf dem Brand	
Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	August 2000	September 2000	Juni 2001	Juli 2001
Lolium perenne	Deutsches Weidelgras	2,0	-	31,8	?
Lolium multiflorum	Welsches Weidelgras	0,3	1,5	-	-
Triticum aestivum	Weizen	r	-	-	-
Festuca pratensis	Wiesen-Schwingel	-	-	26,3	?
Poa pratensis	Wiesen-Rispengras	-	-	0,3	?
	Deckung Gräser gesamt	2,3	1,5	58,4	50,6
Trifolium pratense	Rotklee	96,6	98,8	24,3	23,9
Trifolium repens	Weißklee	1,3	-	8,78	6,3
Tripleurospermum perforatum	Geruchlose Kamille	r	-	-	-
Geranium spec.	Storchschnabel	r	-	-	-
Medicago sativa	Saat-Luzerne	r	-	10,9	11,5
	Deckung Kräuter gesamt	97,9	98,8	44,0	41,70
	Deckung gesamt	100,2	100,3	102,4	92,3

Bestandshöhe

Die Bestandshöhe wurde mit einem Bestandshöhenmessgerät in Anlehnung an CASTLE (1976) jeweils in der Mitte einer jeden Probestelle gemessen. Bei diesem Messgerät handelte es sich um eine 50 cm x 50 cm große, dünne Styroporplatte. Diese Platte hatte mittig ein Loch, über dem eine Aluminiumführung befestigt war (Gewicht der Platte inkl. Führung ca. 60 g). Ein 150 cm langer Aluminiumstab mit einem Durchmesser von 12 mm wurde mittig durch die Aluminiumführung gesteckt, so dass die sich in der Horizontalen befindende Platte an dem senkrecht auf dem Boden abgestellten Stab vom oberen Ende nach unten gleiten konnte, bis sie auf der Vegetation auflag und dadurch angehalten wurde. Auf dem Stab befand sich eine Zentimetereinteilung, so dass die Höhe der Vegetation direkt abgelesen werden konnte.

Die Messwerte für die Bestandshöhe fallen mit im Durchschnitt 49,1 cm (Kiebitzbreite) bzw. 51,6 cm (Brand) sehr einheitlich aus (vgl. Tabelle 3-8). Im ersten Versuchsjahr unterscheiden sich auch die beiden Versuchsdurchgänge nur geringfügig, während die Vegetation beim zweiten Versuchsdurchgang im zweiten Versuchsjahr mit 40,8 cm deutlich niedriger ist als im ersten Versuchsdurchgang mit 62,4 cm.

Tabelle 3-8: Zustand der Vegetation auf den Versuchsf lächen zum Bearbeitungszeitpunkt

Parameter	Kiebitzbreite			Brand		
	August 2000	September 2000	Ø	Juni 2001	Juli 2001	Ø
Artenzahl gesamt	8	2	5	6	6	6
Artenzahl Gräser	3	1	2	3	3	3
Deckungsgrad Gräser (%)	2,29	1,52	1,91	58,36	50,60	54,48
Artenzahl Kräuter	5	1	3	3	3	3
Deckungsgrad Kräuter (%)	97,84	98,75	98,30	43,95	41,70	42,83
Bestandshöhe (cm)	47,80	50,40	49,10	62,40	40,80	51,60
Lagerung (Grad)	6,88	3,19	5,04	4,75	1,00	2,88
Ertrag Frischmasse (dt/ha)	417,96	334,57	376,27	240,18	67,75	153,97
Trockensubstanz-Gehalt (%)	15,34	12,58	13,96	23,81	28,39	26,10
Ertrag Trockenmasse (dt/ha)	63,40	42,18	52,79	57,22	19,22	38,22

Grad der Lagerung

Der Grad der Lagerung der Vegetation wurde mit Noten von 1 bis 9 in Anlehnung an WAGNER & PREDIGER (1989) bewertet (vgl. Tabelle 3-9). Die Noten 2, 4, 6 und 8 bezeichnen jeweils die Zwischenzustände zwischen den hier angegebenen ungeraden Noten.

Insgesamt weist das erste Versuchsjahr mit der Note 5,04 einen deutlichen höheren Lagerungsgrad auf, als das zweite Jahr mit 2,88 (s. Tabelle 3-8). Aber auch zwischen den beiden Versuchsdurchgängen innerhalb der Versuchsjahre gibt es deutliche Unterschiede. Während auf der *Kiebitzbreite* im ersten Versuchsdurchgang nahezu drei Viertel des Bestandes lagert, ist im zweiten Durchgang nur etwa ein Viertel des Bestandes als lagernd anzusprechen. Im zweiten Versuchsjahr lagert im ersten Durchgang knapp die Hälfte des Bestandes, während beim zweiten Durchgang keine Lagerung des Bestandes festzustellen ist.

Tabelle 3-9: Bewertung der Lagerung des Bewuchses

(nach: WAGNER & PREDIGER 1989, verändert)

Note	Beschreibung
1	kein Lager auf der Probestelle; alle Halme stehen aufrecht
3	Neigung aller Halme um ca. 30° von der Senkrechten oder Nesterweise auf ca. ¼ der Probestelle stärkeres Lager
5	Neigung aller Halme um ca. 45° oder Nesterweise stärkeres Lager auf ½ der Probestelle
7	Neigung aller Halme um ca. 60° oder totales Lager auf ¾ der Probestelle
9	totales Lager auf der Probestelle

Ertrag

Der Ertrag wurde im Jahr 2000 während der Durchführung des Versuches bestimmt. Nach dem Mähen der Variante 9 (Front-Scheibenmäherwerk am Schlepper) der jeweiligen Wiederholung wurde aus den mittleren drei Schwaden der entsprechenden Parzelle an drei Stellen Erntegut von jeweils 1 m Schwadlänge als Probe genommen. Die Probestellen lagen im dritten Schwad bei 50 m Parzellenlänge, im benachbarten fünften Schwad bei Parzellenlänge 70 m und im wiederum benachbarten vierten Schwad bei Parzellenlänge 90 m. Das Gewicht der resultierenden drei Proben wurde vor Ort gewogen. Unter Bezug auf die an den gleichen Stellen gemessene jeweilige Arbeitsbreite wurde der jeweilige Frischmasseertrag in dt/ha ermittelt. Aus den resultierenden drei Werten je Parzelle wurde der Mittelwert gebildet, der den Frischmasseertrag des betreffenden Blockes repräsentiert. Aus diesen vier Werten für die vier Blöcke wurde der durchschnittliche Frischmasseertrag der gesamten Versuchsfläche durch Bildung des Mittelwertes bestimmt.

Aus dem gesamten entnommenen Erntegut je Block wurde eine Mischprobe gezogen, im Trockenschrank bei 105° C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und dann erneut gewogen, um den Trockensubstanzgehalt und mit dessen Hilfe den Trockenmasseertrag in dt/ha des jeweiligen Blockes zu bestimmen. Aus den vier Werten für die vier Blöcke wurde der Trockenmasseertrag der Versuchsfläche durch Bildung des Mittelwertes bestimmt.

Im Jahr 2001 wurden die Proben zur Bestimmung des Ertrags am Tag vor der Versuchsdurchführung genommen, in dem nach der Feststellung der Vegetationszusammensetzung (s.o.) die jeweilige Probestelle gemäht wurde und das Frischgewicht des Mähgutes bestimmt wurde. Aus dem Mittelwert der resultierenden fünf Werte je Block wurde unter Bezug auf die Größe der Probestellen (1 m²) der Frischmasseertrag in dt/ha für jeden Block und aus den hieraus resultierenden vier Werten wiederum durch Mittelwertbildung der Frischmasseertrag der gesamten Versuchsfläche errechnet.

Aus dem Mähgut der Probestellen wurden je zwei (erster Versuchsdurchgang) bzw. je eine (zweiter Versuchsdurchgang) Mischprobe entnommen, eingewogen, im Trockenschrank bei 105° C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und dann erneut gewogen, um den Trockensubstanzgehalt und mit dessen Hilfe den Trockenmasseertrag in dt/ha der jeweiligen Probestelle zu bestimmen. Aus diesen Werten wurde durch Mittelwertbildung zunächst der Trockenmasseertrag für jeden Block und aus diesen Werten wiederum der Trockenmasseertrag für die gesamte Versuchsfläche berechnet.

Der Frischmasseertrag beträgt im Jahr 2000 im ersten Versuchsdurchgang 417,96 dt/ha und im zweiten Versuchsdurchgang 334,57 dt/ha, somit im Durchschnitt 376,27 dt/ha. Im Jahr 2001 weist der erste Versuchsdurchgang mit 240,18 dt/ha noch knapp 60 % des entsprechenden Ertrags im Vorjahr auf, während dieser Wert beim zweiten Versuchsdurchgang mit 67,75 dt/ha nur noch bei 20 % liegt. Im Durchschnitt beträgt der Frischmasseertrag im zweiten Versuchsjahr mit 153,97 dt/ha ca. 40 % des Ertrags im ersten Versuchsjahr (vgl. Tabelle 3-8).

Der Trockensubstanzgehalt ist mit 15,34 % im ersten und 12,58 % im zweiten Versuchsdurchgang des Jahres 2000 deutlich niedriger als 2001 mit 23,81 % im ersten bzw. 28,39 % im zweiten Versuchsdurchgang. Im Durchschnitt der beiden jeweiligen Versuchsdurchgänge ist der Trockensubstanzgehalt im Jahr 2001 mit 26,10 % nahezu doppelt so hoch wie im Jahr 2000 mit 13,90 %.

Dementsprechend sind die Unterschiede beim Trockenmasseertrag zwischen den Flächen deutlich geringer als beim Frischmasseertrag. Im Jahr 2001 erreicht der Trockenmasseertrag mit 38,22 dt/ha 72,4 % des Ertrags im Jahr 2000 (52,79 dt/ha). Innerhalb der Versuchsjahre weist jeweils der erste Versuchsdurchgang mit 63,40 dt/ha im Jahr 2000 bzw. 57,22 dt/ha im Jahr 2001 einen deutlich höheren Wert auf als der zweite Durchgang mit 42,18 dt/ha in 2000 und 19,22 dt/ha in 2001.

3.1.6.3 Bodenfeuchtigkeit zum Zeitpunkt des Versuches

Unmittelbar nach Beenden des Mähens eines Blocks wurden auf einer Diagonale über den Block im Abstand von 20 m jeweils unter einem Schwad acht (in 2000) bzw. fünf (in 2001) Bodenproben mit einem Pürckhauer Bohrstock gezogen. Damit entstammte jede Probe einer Parzelle des Blocks. Die Proben wurden getrennt in die Bereiche 0 – 15 cm Bodentiefe und 15 – 30 cm Bodentiefe. Für diese beiden Bodentiefen wurde aus den Bodenproben je eine Mischprobe pro Block erstellt, eingewogen, im Trockenschrank bei 105° C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und erneut gewogen. Aus der Gewichts-differenz wurde der Feuchtegehalt des Bodens zum Zeitpunkt des Mähens der Parzellen berechnet. Aus den 4 Werten je Bodentiefe und Block wurden jeweils der Mittelwert sowie die Standardabweichung für die gesamte Versuchsfläche gebildet.

Die Messungen der Bodenfeuchtigkeit zum Versuchszeitpunkt (vgl. Tabelle 3-10) zeigen für die beiden Versuchsjahre sehr unterschiedliche Ergebnisse. Im ersten Jahr war die Bodenfeuchtigkeit bei beiden Durchgängen annähernd gleich hoch. Sie betrug im Durchschnitt 15,51 Gewichts-% in 0 - 15 cm Bodentiefe und 13,57 Gewichts-% in 15 - 30 cm Bodentiefe, wobei die Werte im ersten Versuchsdurchgang geringfügig höher waren als im ersten.

Im zweiten Versuchsjahr lagen die Werte dagegen im zweiten Versuchsdurchgang höher als im ersten. Insgesamt waren die Verhältnisse mit im Durchschnitt 6,94 Gewichts-% in 0 - 15 cm Bodentiefe bzw. 5,52 Gewichts-% in 15 - 30 cm Bodentiefe aber deutlich trockener als im ersten Versuchsjahr.

Tabelle 3-10: Bodenfeuchtigkeit zum Versuchszeitpunkt (Gewichts-%)

Parameter	2000			2001		
	August	September	Ø	Juni	Juli	Ø
Bodenfeuchtigkeit 0 – 15 cm (Gewichts-%)	16,26	14,75	15,51	5,16	8,72	6,94
Bodenfeuchtigkeit 15 – 30 cm (Gewichts-%)	13,90	13,23	13,57	1,78	9,26	5,52

3.1.6.4 Lufttemperatur und Luftfeuchte zum Zeitpunkt des Versuches

Lufttemperatur und relative Luftfeuchte wurden über den gesamten Versuchstag kontinuierlich erfasst. Hierzu wurde auf jeder Längsseite der Versuchsfläche je ein Datalogger vom Typ „Testostor 175-2“ der Firma *Testo* in Lenzkirch in 2 m Höhe über der Bodenoberfläche an einer in den Boden gesteckten Dachlatte befestigt. Die beiden Logger wurden mittig vor bzw. hinter den aktuell zu mähenden Blöcken aufgestellt. Sie zeichneten für beide Parameter die Werte im Minutentakt auf.

Durch das Festhalten der Anfangs- und Endzeiten der Bearbeitung jeder Parzelle (s.u.) ließen sich die jeweils zugehörigen Werte im Nachhinein ermitteln. Aus diesen wurde für beide Parameter der jeweilige Mittelwert je Parzelle gebildet. Da die Bearbeitungsdauer der Parzellen im Allgemeinen nicht länger als 10 bis 15 Minuten betrug, und die Werte sich in dieser Zeit kaum veränderten, wird auf die Angabe weiterer Werte (Minimum, Maximum, Standardabweichung) verzichtet.

Die statistische Auswertung hat gezeigt, dass die Witterungsparameter Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit keinen signifikanten Einfluss auf die Versuchsergebnisse hatten (vgl. Kapitel 3.1.7). Daher kann auf eine vertiefende Darstellung verzichtet werden. Tabelle A-8 im Anhang zeigt die gemessenen Minima und Maxima sowie die Mittelwerte und die Differenzen zwischen Minimum und Maximum für beide erfassten Parameter je Versuchstag.

Im ersten Versuchsjahr fanden alle Versuchsdurchgänge bei einer mittleren Temperatur von 14 °C bis 23 °C statt, mit einer Differenz zwischen höchstem und niedrigstem gemessenen Wert von 0,6 °C bis 9 °C je Versuchstag. Die Werte für die relative Luftfeuchtigkeit weisen wesentlich unausgeglichene Verhältnisse auf. Die Mittelwerte reichen von 58 % bis 98 %, die Differenzen zwischen niedrigstem und höchstem Wert je Versuchstag schwanken von 6 % bis zu 35 %.

Im zweiten Versuchsjahr waren die Temperaturverhältnisse ähnlich ausgeglichen wie im ersten Jahr, allerdings auf einem höheren Niveau. Die mittlere Temperatur betrug zwischen 19 °C und 28 °C, die Differenz zwischen höchstem und niedrigstem Wert betrug zwischen 4,5 °C und 6,5 °C je Versuchstag. Die relative Luftfeuchtigkeit war hier deutlich niedriger und sehr viel ausgeglichener als im ersten Versuchsjahr. Sie lag zwischen 46 % und 57 %, die Differenzen zwischen höchstem und niedrigstem gemessenem Wert schwankten zwischen 19 % und 25 %.

3.1.6.5 Geräteparameter

Zur Aufnahme der Daten eines Teiles der Geräteparameter war auf dem Vorderwagen ein Datalogger vom Typ „MinMessage“ der Firma *Delphin* in Kürten angebracht. Dieser mit einer 12 V-Autobatterie betriebene Logger verfügt über zwei Speichermodule (a: 4 Analogeingänge, b: 5 Frequenzeingänge) und einen Speicherplatz von 1 MB. Die Speicherkapazität liegt bei 100.000 Messwerten.

Für jeden Parameter (s.u.) wurde während der Bearbeitung fortlaufend pro Sekunde ein Wert mit der zugehörigen Zeitangabe in Echtzeit gespeichert. Die während des Versuchs im Logger gespeicherten Daten konnten anschließend auf einen Computer übertragen und dort mit Hilfe des Programms „Excel 7.0“ von *Microsoft* ausgewertet werden. Auch die Konfigurierung der Speicherkanäle erfolgte mittels entsprechender Software („Busmanager V 3.20 1“ von *Delphin*) über den Computer.

Zugkraftbedarf

Die von den Pferden aufzubringende Zugkraft wurde kontinuierlich über die gesamte Parzelle durch eine Kraftmessdose gemessen. Am Vorderwagen kam eine Messdose vom Typ „U 1“ (Nennlast 50 kN; Messfrequenz 1 Wert pro Sekunde) der Firma *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH* in Darmstadt zum Einsatz. Am Bautz-Grasmäher war es eine Messdose vom Typ „K-25“ (Nennlast 5 kN; Messfrequenz 1 Wert pro 3 Sekunden) der Firma *Lorenz Messtechnik GmbH* in Alfdorf. Die Zugkraftbedarfswerte für die Vorderwagenvarianten wurden in den Datalogger eingespeist, die für den Grasmäher von dem Anzeigerät „TR-200 Loadcell Read-out“ der Firma *Novatech Measurements Ltd.* in St. Leonhards on Sea, Großbritannien, abgelesen und auf ein Tonbandgerät aufgesprochen. Nach dem Versuch wurden letztere abgehört und manuell im Computer in das Programm „Excel“ eingegeben. Die parallele Erfassung der Teilarbeitszeiten (s.u.) ermöglichte nach dem Versuch eine Zuordnung der gemessenen Werte zu den jeweiligen Teilarbeiten.

Für die Teilarbeit *Lastfahrt* wurde jeweils der mittlere und der maximale Zugkraftbedarf je Parzelle ermittelt. Um die „Effektivität“ der untersuchten Varianten hinsichtlich des Zugkraftbedarfes zu beleuchten, wurde zusätzlich aus den ermittelten Werten für den mittleren Zugkraftbedarf unter Bezug auf die Arbeitsbreite der jeweiligen Variante der mittlere Zugkraftbedarf je Meter Arbeitsbreite berechnet.

Der Zugkraftbedarf der verglichenen Varianten wird gemäß dem Internationalen Einheitensystem in der Einheit N (Newton) angegeben, während man in älteren Untersuchungen eher die Einheit kg (Kilogramm) findet. Da eine Masse von 1 kg an einem Ort der Norm-Schwerebeschleunigung eine Gewichtskraft von 9,80665 N (= 1 kp; kp = Kilopond, heute nicht mehr zulässige Einheit) entwickelt (WALCHER 1989), lassen sich die Werte in den Tabellen zum Vergleich mit älterer Literatur in erster Näherung im Verhältnis $1 \text{ kg} \approx 10 \text{ N}$ vergleichen.

Arbeitsgeschwindigkeit und Arbeitsleistung der Pferde

Die durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit wurde aus den Teilarbeitszeitmessungen (s.u.) errechnet. Grundlage hierfür war die für die Teilarbeit *Lastfahrt* gemessene Zeit, die Wendevorgänge blieben unberücksichtigt.

Die von den Pferden erbrachte Arbeitsleistung L wurde aus dem durchschnittlichen Zugkraftbedarf Z und der durchschnittlichen Arbeitsgeschwindigkeit G errechnet und bezieht sich damit auch nur auf die Teilarbeit *Lastfahrt*. Die Berechnung erfolgte mit der Formel:

$$L_{[\text{kW}]} = Z_{[\text{N}]} * G_{[\text{km} * \text{h}^{-1}]} * 3,6^{-1} * (1000 \text{ Nm} * \text{sec}^{-1} * \text{kW}^{-1})^{-1}, \text{ mit}$$

Z = durchschnittlicher Zugkraftbedarf in N,

G = durchschnittliche Geschwindigkeit in $\text{km} * \text{h}^{-1}$ und $1 \text{ kW} = 1000 \text{ Nm} * \text{sec}^{-1}$ (vgl. BRODY 1945).

Tatsächliche und relative Arbeitsbreite

Die tatsächlich erzielte Arbeitsbreite wurde je Parzelle aus den beiden nebeneinander liegenden Mähbahnen 1 und 3 ermittelt. An 5 Messpunkten im Abstand von jeweils 20 m wurde die Breite der in den 2 Anschlussbahnen insgesamt gemähten Fläche gemessen. Aus diesen 5 Werten wurde der arithmetische Mittelwert gebildet und durch 2 geteilt. Dieser Wert entsprach der erzielten Arbeitsbreite.

Um einen Vergleich der Effektivität der verschiedenen Mähwerke zu ermöglichen, wurde aus dem gemessenen Wert für die tatsächlich erzielte Arbeitsbreite unter Bezug auf die vom Hersteller angegebene Arbeitsbreite des jeweiligen Mähwerks der Wert für die relative Arbeitsbreite in % errechnet.

Arbeitszeit Pro Parzelle und Teilarbeitszeiten ab Feldrand

Zur differenzierten Beurteilung der Flächenleistung sowie zur arbeitswirtschaftlichen Bewertung der untersuchten Arbeitsgänge wurden die jeweiligen Teilarbeitszeiten ab Feldrand getrennt erfasst und aus der Summe dieser Teilarbeitszeiten die Gesamtarbeitszeit pro Parzelle errechnet.

Die Arbeitszeit wurde unterteilt in die Teilarbeiten *Lastfahrt*, *Wendevorgang* und *Störung*. Bei allen Fahrten je Parzelle wurde die jeweilige Dauer dieser Teilarbeiten mit einer Stoppuhr gemessen und in einem Erhebungsbogen protokolliert; bei der Teilarbeit *Störung* wurde zusätzlich der jeweilige Grund festgehalten. Die Teilarbeit *Störung* bezeichnet Unterbrechungen des Mähvorganges, die z.B. durch Verstopfen des Mähwerkes oder ähnliche Defekte entstanden.

Flächenleistung

Die erzielte Flächenleistung errechnet sich aus der Parzellengröße und der insgesamt für die Bearbeitung der Parzelle benötigten Zeit, sie wird auf die Einheit $\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$ umgerechnet.

Treibstoffverbrauch und Energiebedarf sowie Emissionen

Der Benzinverbrauch des Aufbaumotors auf dem Vorderwagen sowie der Dieselverbrauch des Schleppers wurden gemessen, indem vor Mähbeginn der jeweiligen Parzelle der Tank bis zu einer Markierung aufgefüllt wurde. Nach Beendigung der Parzelle wurde der Tank unter Verwendung eines Messbechers wieder bis zur gleichen Markierung aufgefüllt und so die verbrauchte Treibstoffmenge pro Parzelle bestimmt. Unter Berücksichtigung der Parzellengröße wird dieser Verbrauch zum Vergleich der untersuchten Varianten auf einen Hektar Fläche hochgerechnet.

Sowohl für den Aufbaumotor des Vorderwagens als auch für den Schlepper wird aus dem Treibstoffverbrauch pro Hektar der Energiebedarf anhand von Literaturwerten berechnet, um diesen mit dem Energiebedarf der Pferde vergleichen zu können. Die in Kraftstoffen enthaltene Energie pro Volumeneinheit („Energiedichte“) wird als Heizwert gemessen. Für den praktischen Betrieb ist der untere Heizwert (vor Kondensation des Wasserdampfs) relevant. Typische untere Heizwerte für konventionelle Kraftstoffe liegen etwas oberhalb von $30 \text{ MJ} \cdot \text{l}^{-1}$ (BASSHUYSEN & SCHÄFER 2007). Da Kraftstoffe immer ein Stoffgemisch darstellen, das in seiner Zusammensetzung selbst bei Verwendung derselben Kraftstoffmarke stark schwanken kann, lassen sich ohne chemische Analyse nur ungefähre Angaben aus der Literatur zur Energiedichte des im Versuch verwendeten Kraftstoffs heranziehen.

Der 18-PS-Aufbaumotor auf dem Pintow Power Cart wurde mit bleifreiem Normalbenzin betrieben, der Motor des Fendt Farmer 309 C mit Dieselmotorkraftstoff. Die Energiedichten für diese beiden Treibstoffe liegen nach BASSHUYSEN & SCHÄFER (2007) bei $30,5 \text{ MJ} \cdot \text{l}^{-1}$ (bleifreies Normalbenzin) bzw. $35,7 \text{ MJ} \cdot \text{l}^{-1}$ (Dieselmotorkraftstoff).

Der Energiebedarf der Pferde wird anhand der geleisteten Arbeit ebenfalls mit Hilfe von Literaturwerten berechnet. Dabei muss unterschieden werden zwischen Netto-Energie (*net energy*, NE), umsetzbarer Energie (*metabolisable energy*, ME) und verdaulicher Energie (*digestible energy*, DE).

Der Energieverbrauch von Pferden, die Zugarbeit leisten, setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen (LAWRENCE & STIBBARDS 1990, LAWRENCE et al. 1991):

- dem Erhaltungsenergiebedarf zur Aufrechterhaltung der Körperfunktionen und der Körpertemperatur,
- dem Energiebedarf für die eigene Fortbewegung (Lokomotion),
- dem Energiebedarf für das Tragen des Geschirrs,
- dem Energiebedarf für das Erbringen des Zugkraftbedarfs und
- dem Energiebedarf für die Überwindung des Höhenunterschieds im Gelände.

PAGAN & HINTZ (1986) ermittelten in Fütterungsversuchen zur Berechnung des Erhaltungsenergiebedarfs pro Tag EEP in Form von verdaulicher Energie (*digestible energy*, DE) in Abhängigkeit von der Körpermasse KM die folgende Formel:

$$\text{EEP}_{[\text{kcal} \cdot \text{d}^{-1}]} = 1.375 + (30 \cdot \text{KM}) \quad \text{KM} = \text{Körpermasse in kg}$$

bzw. in der Einheit MJ:

$$EEP_{[MJ * d^{-1}]} = [1.375 + (30 * KM)] * 4,18 * 10^{-3} \quad 1 MJ = 4,18 * 10^{-3} kcal$$

Zum direkten Vergleich mit den Schleppervarianten wird der so errechnete Tageserhaltungsenergiebedarf der Pferde anhand der gemessenen Arbeitszeiten umgerechnet auf die Arbeitszeit pro Hektar.

Die für die geleistete Arbeit benötigte zusätzliche Energiemenge (ZEP) kann in Form von Netto-Energie (*net energy*, *NE*) wie folgt berechnet werden (LAWRENCE & STIBBARDS 1990, LAWRENCE et al. 1991):

$$ZEP_{[kJ]} = A * F * M + B * F * L + W / C + (9,81 * H * M) / D$$

mit:

$A_{[J/kg*m]}$ = notwendige Energie zur horizontalen Bewegung des Körpergewichts

$F_{[km]}$ = zurückgelegte Wegstrecke; hier: pro Parzelle

$M_{[kg]}$ = Körpermasse

$B_{[J/kg*m]}$ = notwendige Energie zur horizontalen Bewegung einer getragenen Last

$L_{[kg]}$ = Masse der getragenen Last

$W_{[kJ]}$ = verrichtete Zugarbeit = Zugkraftbedarf [N] * F [km]

$C_{[%]}$ = Effizienz der Energieumsetzung in Zugarbeit (Verhältnis von verrichteter Zugarbeit zur dazu verbrauchten Energie; $C = 30 \%$, PEARSON & LAWRENCE (1997))

9,81 = Wert für die normale Erdanziehungskraft in N

$H_{[km]}$ = überwundener Höhenunterschied

$D_{[%]}$ = Effizienz der Energieumsetzung bei der Überwindung des Höhenunterschieds (Verhältnis von verrichteter Arbeit zur vertikalen Bewegung des Körpergewichts zur dazu verbrauchten Energie)

Da die Topographie keinen Einfluss auf die übrigen Versuchsergebnisse hat und der Höhenunterschied innerhalb der Parzellen sich zwischen 0,13 m und 4,87 m bewegt (vgl. Tabelle A-4 und Tabelle A-5 im Anhang), kann der Energiebedarf für die Überwindung des Höhenunterschieds im Gelände vernachlässigt werden. Gleiches gilt für den Energiebedarf zum Tragen des Geschirrs, das pro Pferd eine Masse von 15 kg aufweist.

Die Werte für den Faktor A schwanken je nach Tierart und Bodenbeschaffenheit (LAWRENCE & STIBBARDS 1990). Da der Parzellenversuch auf trockenem, festem und nahezu ebenem Boden durchgeführt wurde, kann für A der Wert $1,6 J * (kg * m)^{-1} = 1,6 kJ * (kg * km)^{-1}$ angenommen werden (nach BRODY 1945).

In den Faktor W geht der Zugkraftbedarf ein. Da die Pferde im 2-Spanner gearbeitet haben, muss zur Berechnung von ZEP je Pferd die Hälfte des gemessenen Zugkraftbedarfs in die Formel eingetragen werden.

Somit wird zur Berechnung für die zur Verrichtung der Zugarbeit pro Parzelle notwendige Zusatzenergie folgende Formel angewendet:

$$ZEP_{[kJ]} = 1,6 * F * M + W / 0,30$$

Auch hier erfolgt die Umwandlung in die Einheit MJ:

$$ZEP_{[MJ]} = (1,6 * F * M + W / 0,30) * 10^{-3}$$

Anschließend wird auch der Zusatzenergiebedarf unter Berücksichtigung der Parzellengröße auf einen Hektar Fläche umgerechnet. Bei der so berechneten Zusatzenergie für die Arbeit handelt es sich um Netto-Energie (*net energy*, *NE*). Diese muss zunächst in umsetzbare Energie (*metabolisable energy*, *ME*) und diese dann in

verdauliche Energie (*digestible energy*, DE) umgerechnet werden. Hierzu werden folgende Formeln verwendet (PEARSON 2010):

$$ZEP_{(NE)} * 0,70^{-1} = ZEP_{(ME)} \quad 0,70 = \text{Effizienz der Umsetzung von ME durch Arbeit in NE}$$

und

$$ZEP_{(ME)} * 0,87^{-1} = ZEP_{(DE)} \quad 0,87 = \text{Effizienz der Umsetzung von DE durch Arbeit in ME}$$

In einem letzten Schritt werden der Erhaltungsenergiebedarf (EEP) und der Zusatzenergiebedarf (ZEP) zum Gesamtenergiebedarf (GEP) der Pferde addiert. Bei den Pferdevarianten mit motorgetriebener Zapfwelle wird zusätzlich der Energiebedarf des Aufbaumotors (EM) addiert, der aus dem Treibstoffverbrauch errechnet wird.

Menge und Qualität der produzierten Emissionen werden für den Aufbaumotor auf dem Vorderwagen sowie den Motor des Schleppers anhand von Literaturwerten berechnet. Berücksichtigt werden hierbei die unverbrannten Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenmonoxid (CO) und die Stickoxide (NO_x) sowie beim Dieselmotor des Schleppers zusätzlich die Partikel. Ergänzend werden der Kohlendioxid- (CO₂-), der Methan (CH₄-) und der Lachgasausstoß (N₂O) berechnet.

Da keine eigenen Messungen durchgeführt wurden, Motoren zudem nach Betriebsart unterschiedlich hohe Emissionswerte aufweisen und somit auch keine Standardwerte für die Schadstoff-Emissionen existieren, bleibt für einen Vergleich der Varianten nur die Berechnung mit Hilfe des Energiebedarfs und der Schadstoff-Grenzwerte gemäß der zum Zeitpunkt des Versuchs gültigen EU-Richtlinie für HC, CO, NO_x und Partikel (ECOPOINT 2010). Die hierfür berechneten Emissionswerte sind somit Maximalwerte, berechnet unter der Annahme, dass die eingesetzten Motoren die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte einhalten.

Zum Zeitpunkt des Versuchs galten für die betrachteten Schadstoffe für Land- und Forstwirtschaftliche Schlepper die EU-Grenzwerte der Stufe I, die 1999 in Kraft traten und in drei Leistungskategorien gestaffelt sind (ECOPOINT 2010): A: 130 ≤ P ≤ 560 kW, B: 75 ≤ P < 130 kW, C: 37 ≤ P < 75 kW. Der im Versuch eingesetzte Schlepper fällt mit 70 kW in Kategorie C, die entsprechenden Schadstoffgrenzwerte zeigt Tabelle 3-11.

Durch Multiplikation des Energiebedarfs in kWh/ha mit den EU-Grenzwerten erhält man die Werte für den maximalen Schadstoffausstoß der untersuchten Varianten je Hektar für CO, HC, NO_x und Partikel.

Der Ausstoß an CO₂, CH₄ und N₂O wird anhand der mittleren Gehalte berechnet, die das *Intergovernmental Panel on Climate Change* verwendet (EGGLESTONE et al. 2006, s. Tabelle 3-12).

Tabelle 3-11: EU-Schadstoffgrenzwerte für Nicht-Straßenfahrzeuge, Stufe I, 37 bis < 75 kW

			g/kWh			
Kategorie	kW	gültig ab	CO	HC	NO _x	Partikel
C	37 ≤ P < 75	April 1999	6,5	1,3	9,2	0,85

Quelle: ECOPOINT (2010)

Tabelle 3-12: Werte für CO₂-, CH₄- und N₂O- Ausstoß von Benzin und Diesel

Treibstoff	effektiver CO ₂ - Emissionsfaktor (g/MJ)	CH ₄ -Ausstoß (g/MJ)	N ₂ O-Ausstoß (g/MJ)
Benzin	69,3	0,08	0,002
Diesel	74,1	0,00415	0,0286

Quelle: EGGLESTONE et al. (2006)

Die entsprechenden Emissionswerte je Hektar der im Versuch eingesetzten Motoren ergeben sich durch Multiplikation dieser mittleren Gehalte mit dem jeweiligen Treibstoff-Energiebedarf.

Bei den Pferden werden als Emissionen der Methan (CH₄-) sowie der Stickstoff-Ausstoß (N) berechnet und bei den entsprechenden Varianten (V 3, V 5 bis V 7) zu den Motoremissionen hinzugerechnet. Der Kohlendioxid-Ausstoß (CO₂) kann unberücksichtigt bleiben, da die Pferde lediglich CO₂ freisetzen, das vorher in den Futtermitteln (Gras und Getreide) gebunden wurde, und somit CO₂-neutral arbeiten.

EGGLESTONE et al. (2006) geben für den jährlichen Gesamt-CH₄- und -N-Ausstoß von Pferden die folgenden Werte an:

- CH₄-Ausstoß (Pferd, 550 kg Lebendmasse): 18 kg pro Tier und Jahr
- CH₄-Ausstoß aus dem Pferdemist: 2,34 kg pro Tier und Jahr
- N-Ausscheidung: 0,26 kg pro 1.000 kg Lebendmasse und Tag

Bezogen auf die im Versuch eingesetzten Pferde mit 850 kg Lebendgewicht und umgerechnet auf eine Zeitsunde ergeben sich somit:

CH₄:

$$18 \text{ kg} * (550 \text{ kg})^{-1} * 850 \text{ kg} + 2,34 \text{ kg} * (550 \text{ kg})^{-1} * 850 \text{ kg} = 31,44 \text{ kg} * (\text{Pferd} * \text{a})^{-1}$$

und

$$31,44 \text{ kg} * (365 \text{ d} * 24 \text{ h})^{-1} = 0,00359 \text{ kg} = \mathbf{3,59 \text{ g CH}_4 * (\text{Pferd} * \text{h})^{-1}}$$

N:

$$0,26 \text{ kg} * (1000 \text{ kg})^{-1} * 850 \text{ kg} = 0,221 \text{ kg} * (\text{Pferd} * \text{d})^{-1}$$

und

$$0,221 \text{ kg} * 24 \text{ h}^{-1} = 0,00921 \text{ kg/h} = \mathbf{9,21 \text{ g N} * (\text{Pferd} * \text{h})^{-1}}$$

Unter Berücksichtigung der entsprechenden Arbeitszeit werden die Werte auf einen Hektar Fläche umgerechnet.

Bodenbelastung (betretene und befahrene Fläche)

Die Belastung des Bodens in Form von Verdichtung wurde in erster Näherung durch den Anteil der von den Pferden betretenen und von den Maschinen befahrenen Fläche an der insgesamt bearbeiteten Fläche, den so genannten Spurantanteil, beschrieben. Dies geschah hier durch die Erfassung dieser Größen im Bereich der Hauptparzelle, also nur im Hinblick auf die Teilarbeit *Lastfahrt*. Das Vorgewende, also die Teilarbeit *Wendung*, wurde im vorliegenden Versuch aus methodischen Gründen außer Acht gelassen.

Die insgesamt durch die Maschinen überfahrene Fläche für die Teilarbeit *Lastfahrt* ergab sich aus der Breite der Reifen und der zurückgelegten Fahrstrecke je Parzelle. Hierbei müssen die Breiten aller vier Reifen des jeweiligen Fahrzeugs addiert werden, da der Boden bei jeder Überfahung durch die Vorderreifen verdichtet und durch die Hinterreifen nachverdichtet wird (vgl. z.B. OLFE 1995).

Die insgesamt von den Pferden betretene Fläche wurde durch Auszählen der Schritte pro Pferd und Parzelle sowie anschließende Multiplikation mit der Gesamthufffläche beider Pferde ermittelt. Dazu wurde beim Mähen des 1. und 2. Schwads das Aufußeln des Sattelpferdes (= linkes Pferd) mit dem linken Vorderhuf sowie beim Mähen des 3. und 4. Schwads das Aufußeln des Handpferdes (= rechtes Pferd) mit dem rechten Vorderhuf innerhalb der Parzelle gezählt. Aus diesen Werten wurde für beide Pferde jeweils der Mittelwert errechnet. Diese Zahl wurde jeweils mit der Summe der 4 Hufflächen der beiden Pferde multipliziert.

Die Hufflächen wurden ermittelt, in dem die jeweiligen Eisen nach dem Versuch abgenommen, die Konturen auf Karton gezeichnet und anschließend mit Hilfe eines Planimeter-Rasters (Hrsg.: *Institut für Forsteinrichtung und Ertragskunde, Universität Göttingen*) die Fläche ausgezählt wurde. Das Planimeter-Raster war aufgeteilt in 48 Quadrate mit einer Kantenlänge von je 3 cm, die jeweils 100 voneinander äquidistante Punkte enthielten, so dass ein Punkt auf dem Raster $0,09 \text{ cm}^2$ entsprach.

3.1.6.6 Physiologische Parameter der Pferde

Die Belastung der Pferde durch die ausgeführte Arbeit wurde durch die Erfassung der folgenden physiologischen Parameter ermittelt:

Herzfrequenz

Die Herzfrequenz wurde für beide Pferde getrennt mit Herzfrequenzmessgeräten vom Typ „Polar Horse XT-rainer Plus“ der Firma *Polar* in Büttelborn im 5-Sekunden-Takt ermittelt. Die Daten wurden im Anschluss an die Versuche über ein Interface auf den Computer überspielt und dort ausgewertet.

Pro Parzelle wurden die durchschnittliche sowie die maximale Herzfrequenz ermittelt. Als Parameter für die Einschätzung der „Vorbelastung“ der Pferde durch die bereits geleistete Arbeit vor Beginn einer jeden Parzelle wurde der erste Wert der Herzfrequenzmessung als „Ruhewert“ angegeben.

Atemfrequenz

Die Atemfrequenz wurde bei beiden Pferden unmittelbar vor dem Anmähen einer jeden Parzelle sowie unmittelbar nach Beendigung der letzten Mähbahn derselben Parzelle ermittelt. Hierzu wurden je Zählvorgang pro Pferd zweimal die Atemzüge in 15 Sekunden gezählt und der Mittelwert aus diesen beiden Werten mit 4 multipliziert als Atemfrequenz angegeben. Die Differenz zwischen diesen beiden Werten je Pferd wurde als die durch die geleistete Arbeit verursachte Zu- bzw. Abnahme der Atemfrequenz berechnet.

Körpertemperatur

Die Körpertemperatur wurde bei beiden Pferden unmittelbar vor dem Anmähen einer jeden Parzelle sowie unmittelbar nach Beendigung der letzten Mähbahn derselben Parzelle rektal mit einem digitalen Fieberthermometer ermittelt. Die Differenz zwischen diesen beiden Werten je Pferd wurde als die durch die geleistete Arbeit verursachte Zu- bzw. Abnahme der Körpertemperatur berechnet.

Schwitzverhalten

Das Schwitzverhalten beider Pferde wurde vor Beginn und nach Beendigung einer jeden Parzelle beschrieben. Dabei wurde der Körper der Pferde in die folgenden Körperregionen eingeteilt:

- Hals
- Brust
- Unterarm
- Rücken
- Flanke
- Bauch
- Unterschenkel

Für jede dieser sieben Regionen wurde ein Wert von 0 bis 4 vergeben; hierbei galt folgende Skala:

0: trocken 1: feucht 2: nass 3: tropfend 4: schäumend

Anschließend wurde für jede der sieben Körperregion die Differenz zwischen dem Ausgangs- und dem Endwert berechnet und aus diesen Differenzwerten die Summe als Parameter für die Zu- bzw. Abnahme des Schwitzens insgesamt angegeben.

Da es zwischen den Pferden „Alphonse“ und „Charlotte“ einerseits sowie „Piroux“ und „Dragonne“ andererseits keine signifikanten Unterschiede bei den Ergebnissen zu den physiologischen Parametern gab, konnten diese bei der Auswertung im Jahr 2000 und über beide Versuchsjahre hinweg zusammengefasst werden.

3.1.7 Statistische Methoden bei der Auswertung der Ergebnisse

Ziel des Parzellenversuchs war die Untersuchung des Einflusses der insgesamt neun eingesetzten Varianten auf die Ausprägung der untersuchten Parameter. Die statistische Auswertung des Parzellenversuchs erfolgte zunächst getrennt nach den beiden Versuchsjahren sowie anschließend über beide Versuchsjahre hinweg mittels Varianzanalyse mit der Prozedur „Mixed“ des Statistikpaketes SAS in der Version 9.1.

Neben der Variante (var) ging als weiterer fixer Einflussfaktor der jeweilige Versuchszeitpunkt in das Modell ein, charakterisiert durch den Versuchsdurchgang (durch) und den Block (block), sowie bei der Auswertung über beide Versuchsjahre hinweg zusätzlich durch das Versuchsjahr (jahr). Es war zu berücksichtigen, dass die Durchgänge eines Jahres Messwiederholungen auf denselben Parzellen darstellen, die korreliert sind. Hierzu wurden gemischte Modelle für Messwiederholungen formuliert (PIEPHO et al. 2003). Für Durchgang, Block und Jahr wurde dabei die Interaktion berücksichtigt, bei der Auswertung für die Einzeljahre in der Form durch*block sowie bei der Auswertung über beide Versuchsjahre hinweg als jahr*durch*block. Diese Effekte wurden als fix betrachtet und stellen die Blockeffekte je Durchgang und Jahr dar. Feste Haupteffekte für Jahr und Durchgang sowie deren Wechselwirkungen mussten nicht gesondert spezifiziert werden, da diese mit dem jahr- und durchgangsspezifischen Blockeffekt vermengt und somit bereits erfasst sind.

Zufällige Effekte im Modell waren bei der Einzeljahrauswertung die Interaktionen aus Durchgang und Variante (durch*var) sowie der Parzellenfehler, ausgedrückt als Interaktion aus Variante und Block (var*block). Dieser Effekt gilt für beide Durchgänge und modelliert daher die Korrelation der beiden Messwiederholungen (Durchgänge). Zusammen mit dem unabhängigen Restfehler ergibt dieses Modell eine sog. „Compound Sym-

metry-Struktur“ für die Autokorrelation je Parzelle (PIEPHO et al. 2003). Bei der Auswertung über beide Versuchsjahre hinweg wurde das Versuchsjahr mit in diese Effekte hinein genommen. Der Parzellenfehler bestand hier also aus der Interaktion von Jahr, Variante und Block (jahr*var*block), als weitere zufällige Faktoren kamen die Interaktion aus Jahr und Variante (jahr*var) sowie die Interaktion aus Jahr, Durchgang und Variante hinzu (jahr*durch*var).

Sowohl bei der Einzeljahrauswertung, als auch bei der Auswertung über beide Versuchsjahre hinweg wurden zunächst nacheinander die in Tabelle 3-13 aufgelisteten Kovariablen in das Modell eingebaut und auf ihren möglichen Einfluss auf die Ausprägung der untersuchten Parameter getestet.

Tabelle 3-13: Untersuchte Kovariablen im Parzellenversuch

Kovariablen
Anzahl bereits gemähter Parzellen am selben Tag (n)
Pausenzeit seit letzter Parzelle (min.)
Herzfrequenz zu Beginn der Parzelle („Ruhepuls“; min ⁻¹)
Lufttemperatur (°C)
Luftfeuchtigkeit (%)
Topographie der Parzelle (% Steigung)

a) Getrennte Auswertung der beiden Versuchsjahre

Die statistische Auswertung des Parzellenversuchs erfolgte zunächst getrennt nach den beiden Versuchsjahren mittels Varianzanalyse mit der Prozedur „Mixed“ des Statistikpaketes SAS in der Version 9.1.

Das Ausgangsmodell lautete für beide Versuchsjahre:

$$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + \beta * \text{kovar}_{ijk} + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$$

wobei

- μ = Gesamtmittel
- var_i = fixer Effekt der i-ten Variante; i: 1-9
- $(\text{durch*block})_{jk}$ = fixer Effekt der Interaktion aus j-tem Durchgang und k-tem Block; j: 1-2; k: 1-4
- $\beta * \text{kovar}_{ijk}$ = fixer Effekt der in Tabelle 3-13 aufgeführten Kovariablen; i: 1-9, j: 1-2, k: 1-4
- $(\text{durch*var})_{ij}$ = zufälliger Effekt der Interaktion aus j-tem Durchgang und i-ter Variante;
i: 1-9, j: 1-2
- $(\text{block*var})_{ik}$ = zufälliger Effekt der Interaktion aus k-tem Block und i-ter Variante;
i: 1-9, k: 1-4
- e_{ijk} = Restfehler; $e_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$; i: 1-9, j: 1-2, k: 1-4

Die Kovariablen hatten in keinem Fall einen signifikanten Einfluss auf die Versuchsergebnisse und konnten daher vernachlässigt werden.

Nach dem ersten Rechengang wurden zunächst alle zufälligen Effekte aus den Modellen entfernt, bei denen die Varianzkomponentenschätzung mit der Methode REML („restricted maximum likelihood“) gleich 0 war. Dann wurden die sich ergebenden reduzierten Modelle wieder mit der Prozedur Mixed durchgerechnet und anschließend alle fixen Effekte, die keinen signifikanten Einfluss auf das untersuchte Ergebnis hatten (Ergebnis Typ 3 Test: p-Wert < 0,05), aus den Modellen entfernt. Somit blieb für jeden untersuchten Parameter ein Modell übrig, das ausschließlich fixe Effekte mit signifikantem Einfluss und/oder zufällige Effekte mit einem Varianzschätzwert > 0 enthielt. Bei einigen Parametern konnten keinerlei signifikante Einflüsse der fixen und zufälligen Effekte auf die Versuchsergebnisse nachgewiesen werden.

Die sich letztlich ergebenden Modelle sind in Tabelle A-2 im Anhang dargestellt.

Für jeden Parameter wurde der F-Wert bestimmt und auf Signifikanz überprüft. Lag auf einem Wahrscheinlichkeitsniveau von $p < 0,05$ Signifikanz vor, wurden die geschätzten Mittelwerte (Least Squares Means, „LSMeans“) der untersuchten Varianten mit der Option „pdiff“ in PROC MIXED paarweise auf signifikante Unterschiede überprüft. In den Tabellen im Ergebnisteil bezeichnen unterschiedliche Buchstaben-Indices an den dargestellten Werten signifikante Unterschiede. Die Indices wurden mittels der Methode von PIEPHO (2004) generiert.

b) Auswertung über beide Versuchsjahre hinweg

Im Anschluss an die getrennte Auswertung für die einzelnen Versuchsjahre erfolgte die Auswertung über beide Versuchsjahre hinweg mittels Varianzanalyse mit der Prozedur „Mixed“ des Statistikpaketes SAS in der Version 9.1. Hierbei wurde ebenfalls ein gemischtes Modell mit fixen und zufälligen Effekten verwendet.

Fixe Effekte waren die Variante (var) sowie der durch die Interaktion aus Jahr, Durchgang und Block (jahr*durch*block) beschriebene Versuchszeitpunkt. Zufällige Effekte waren die Interaktion aus Jahr und Variante (jahr*var), aus Jahr, Durchgang und Variante (jahr*durch*var) sowie der Parzellenfehler, ausgedrückt als Interaktion aus Jahr, Variante und Block (jahr*var*block).

Auch hier wurden zunächst die Kovariablen (vgl. Tabelle 3-13) nacheinander auf ihren möglichen Einfluss auf die Ergebnisse der verschiedenen Parameter getestet.

Das Ausgangsmodell über beide Versuchsjahre hinweg lautete:

$$y_{ijkl} = \mu + \text{var}_i + (\text{jahr}*\text{durch}*\text{block})_{jkl} + \beta * \text{kovar}_{ijkl} + (\text{jahr}*\text{var})_{ij} + (\text{jahr}*\text{durch}*\text{var})_{ijk} + (\text{jahr}*\text{var}*\text{block})_{ijl} + e_{ijkl}$$

wobei

μ	= Gesamtmittel
var_i	= fixer Effekt der i-ten Variante; i: 1-9
$(\text{jahr}*\text{durch}*\text{block})_{jkl}$	= fixer Effekt der Interaktion aus j-tem Jahr, k-tem Durchgang und l-tem Block; j: 1-2; k: 1-2; l: 1-4
kovar_{ijkl}	= fixer Effekt der in Tabelle 3-13 aufgeführten Kovariablen
$(\text{jahr}*\text{var})_{ij}$	= zufälliger Effekt der Interaktion aus j-tem Jahr und i-ter Variante; i: 1-9, j: 1-2
$(\text{jahr}*\text{durch}*\text{var})_{ijk}$	= zufälliger Effekt der Interaktion aus j-tem Jahr, k-tem Durchgang und i-ter Variante; i: 1-9, j: 1-2, k: 1-2
$(\text{jahr}*\text{var}*\text{block})_{ijl}$	= zufälliger Effekt der Interaktion aus j-tem Jahr, i-ter Variante und l-tem Block; i: 1-9, j: 1-2; l: 1-4
e_{ijkl}	= Restfehler; $e_{ijkl} \sim N(0, \sigma^2)$

Die Kovariablen hatten auch hier in keinem Fall einen signifikanten Einfluss auf die Versuchsergebnisse und konnten daher vernachlässigt werden.

Nach dem ersten Rechengang wurden zunächst alle zufälligen Effekte aus den Modellen entfernt, bei denen die Varianzkomponentenschätzung mit der Methode REML („restricted maximum likelihood“) gleich 0 war. Dann wurden die sich ergebenden reduzierten Modelle wieder mit der Prozedur „Mixed“ durchgerechnet und anschließend alle fixen Effekte, die keinen signifikanten Einfluss auf das untersuchte Ergebnis hatten (Ergebnis Typ 3 Test: p-Wert < 0,05), aus den Modellen entfernt. Somit blieb für jeden untersuchten Parameter ein Modell übrig, das ausschließlich fixe Effekte mit signifikantem Einfluss und/oder zufällige Effekte mit einem Varianzschätzwert > 0 enthielt. Bei einem Parameter konnten keinerlei signifikante Einflüsse der fixen und zufälligen Effekte auf die Versuchsergebnisse nachgewiesen werden.

Die sich schließlich ergebenden Modelle sind in Tabelle A-3 im Anhang dargestellt.

Für jeden Parameter wurde der F-Wert bestimmt und auf Signifikanz überprüft. Lag auf einem Wahrscheinlichkeitsniveau von $p < 0,05$ Signifikanz vor, wurden die geschätzten Mittelwerte (Least Squares Means, „LSMeans“) der untersuchten Varianten mit der Option „pdiff“ in PROC MIXED paarweise auf signifikante Unterschiede überprüft. In den Tabellen im Ergebnisteil bezeichnen unterschiedliche Buchstaben-Indices an den dargestellten Werten signifikante Unterschiede. Die Indices wurden mit der Methode von PIEPHO (2004) generiert.

3.2. Ergebnisse

3.2.1 Geräteparameter

Zum besseren Verständnis werden in den folgenden Tabellen nicht nur die numerischen Bezeichnungen der untersuchten Varianten angegeben, sondern zusätzlich die beschreibenden Kürzel (vgl. Tabelle 3-14).

Tabelle 3-14: Bedeutung der Kürzel für die untersuchten Varianten

Variante	Kürzel	Bedeutung
1	GM 130 B	Grasmäher, 1,30 m Arbeitsbreite, Bodenantrieb des Messers
2	PC 165 B	Power Cart, 1,65 m Arbeitsbreite, Bodenantrieb des Messers
3	PC 165 M	Power Cart, 1,65 m Arbeitsbreite, Motorantrieb des Messers
4	PC 165 B Zw	Power Cart, 1,65 m Arbeitsbreite, Bodenantrieb des Messers, Zwillingsreifen
5	PC 165 M Zw	Power Cart, 1,65 m Arbeitsbreite, Motorantrieb des Messers, Zwillingsreifen
6	PC 190 M	Power Cart, 1,90 m Arbeitsbreite, Motorantrieb des Messers
7	PC 240 M	Power Cart, 2,40 m Arbeitsbreite, Motorantrieb des Messers
8	S 2,40	Schlepper, Arbeitsbreite 2,40 m (Heck-Doppelmesser-Mähwerk)
9	S 2,90	Schlepper, Arbeitsbreite 2,90 m (Front-Scheibenmähwerk)

3.2.1.1 Zugkraftbedarf

a) Durchschnittlicher Zugkraftbedarf

Die Werte für den durchschnittlichen Zugkraftbedarf der untersuchten Varianten sind Tabelle 3-15 zu entnehmen, die Abfolge der Varianten mit steigendem durchschnittlichem Zugkraftbedarf zeigt Abbildung 3-8.

Die geringsten Werte weisen die Varianten 3 und 6 auf, gefolgt von den Varianten 1 und 7, dann Variante 5 und schließlich die Varianten 2 und 4. Dieses Muster ist sowohl für die beiden Einzeljahre, als auch für die Auswertung über beide Versuchsjahre hinweg gleich.

Der Vergleich der Vorderwagen-Varianten mit Motorantrieb der Zapfwelle (V 3, V 6 und V 7) zeigt, dass mit zunehmender Arbeitsbreite auch der mittlere Zugkraftbedarf steigt. Allerdings sind sämtliche Unterschiede nicht signifikant.

Weiterhin wird deutlich, dass die Varianten mit Bodenantrieb der Zapfwelle (V 2 und V 4) eine deutlich höhere Zugkraft erfordern, als die Varianten mit gleicher Arbeitsbreite und Ausstattung, bei denen der Antrieb der Zapfwelle über den Aufbaumotor erfolgt (V 2 zu V 3 bzw. V 4 zu V 5). In beiden Versuchsjahren wie auch in der Auswertung über beide Jahre hinweg unterscheiden sich die Varianten mit Bodenantrieb der Zapfwelle (V 2 und V 4) zudem signifikant von allen anderen Varianten, sind untereinander aber nicht signifikant verschieden.

Tabelle 3-15: Durchschnittlicher Zugkraftbedarf (N)

LS Means; unterschiedliche Indices bezeichnen signifikante Unterschiede

		Versuchsjahr		
Variante	Bezeichnung	2000	2001	Gesamt
1	GM 130 B	1.422 ^{ab}	-	1.255 ^a
2	PC 165 B	2.634 ^c	2.111 ^b	2.355 ^b
3	PC 165 M	-	983 ^a	1.154 ^a
4	PC 165 B Zw	2.848 ^c	-	2.684 ^b
5	PC 165 M Zw	1.500 ^b	-	1.335 ^a
6	PC 190 M	1.261 ^a	1.052 ^a	1.157 ^a
7	PC 240 M	1.420 ^{ab}	1.172 ^a	1.300 ^a

Das Anbringen der Zwillingsreifen am Vorderwagen führt zu einem deutlichen Anstieg des durchschnittlichen Zugkraftbedarfs, wie der Vergleich von Variante 4 zu Variante 2 bzw. Variante 5 zu Variante 3 zeigt.

Der Bautz Grasmäher (V 1) hat einen vergleichbaren Zugkraftbedarf wie die Variante mit 2,40 m Arbeitsbreite und motorgetriebener Zapfwelle (V 7). Die kleineren Doppelmesservarianten mit motorgetriebener Zapfwelle (V 3 und V 6) haben sogar einen geringeren Zugkraftbedarf als der Grasmäher. Auch diese Unterschiede sind nicht signifikant.

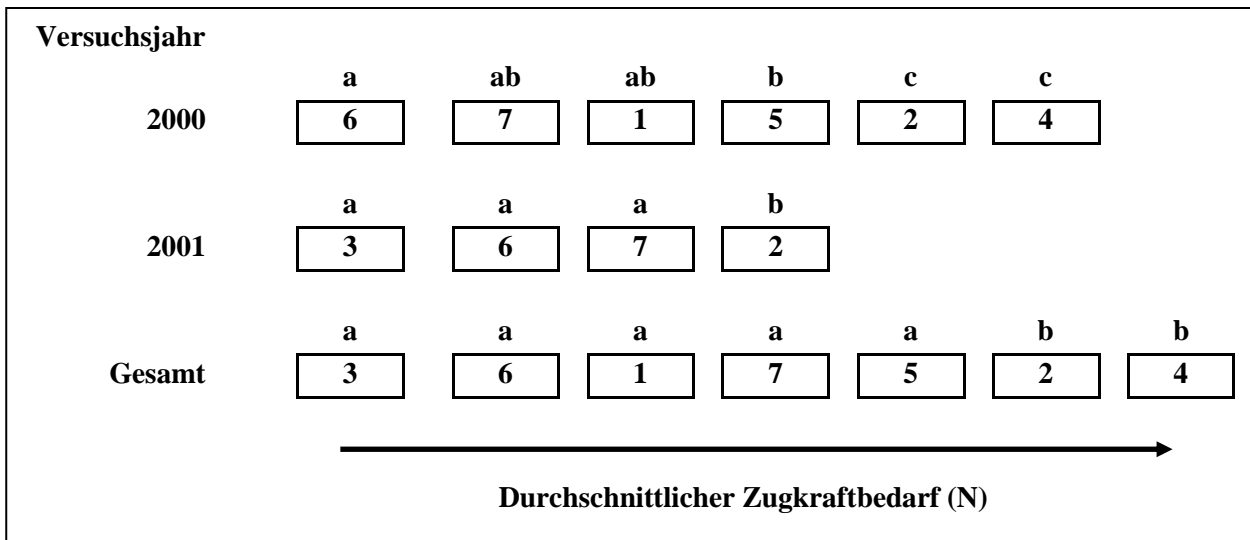


Abbildung 3-8: Durchschnittlicher Zugkraftbedarf (N); Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)
 unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede

b) Durchschnittlicher Zugkraftbedarf pro Meter Arbeitsbreite (relativer Zugkraftbedarf)

Um die verschiedenen Mähwerke hinsichtlich ihrer Effektivität zu vergleichen, wurden aus den gemessenen Werten für den durchschnittlichen Zugkraftbedarf unter Bezugnahme auf die Arbeitsbreite des Gerätes die Werte für den durchschnittlichen Zugkraftbedarf pro Meter Arbeitsbreite errechnet. Dieser Wert wird im Folgenden „relativer Zugkraftbedarf“ genannt. Tabelle 3-16 zeigt die entsprechenden Werte, Abbildung 3-9 die Abfolge der Varianten mit zunehmendem relativem Zugkraftbedarf.

Tabelle 3-16: Durchschnittlicher Zugkraftbedarf pro Meter Arbeitsbreite („relativer Zugkraftbedarf“)
 (Nm⁻¹)

Variante	Bezeichnung	Versuchsjahr		
		2000	2001	Gesamt
1	GM 130 B	1.094	-	965
2	PC 165 B	1.596	1.279	1.427
3	PC 165 M	-	596	699
4	PC 165 B Zw	1.726	-	1.627
5	PC 165 M Zw	909	-	809
6	PC 190 M	664	554	609
7	PC 240 M	592	488	542

Auch hier zeigt sich ein einheitliches Muster sowohl bei den Einzeljahren, als auch über beide Jahre hinweg. Das Gerät mit dem geringsten relativen Zugkraftbedarf ist das größte Mähwerk mit 2,40 m Arbeitsbreite (V 7), gefolgt vom Mähwerk mit 1,90 m Arbeitsbreite (V 6) und dem mit 1,65 m Arbeitsbreite (V 3 bzw. V 5). Der

folgende Grasmäher (V 1) ist somit deutlich weniger effektiv bezüglich des Zugkraftbedarfs als die Vorderwagenvarianten mit motorgetriebener Zapfwelle. Die beiden Vorderwagen mit bodengetriebener Zapfwelle (V 2 und V 4) schneiden auch bei diesem Parameter am schlechtesten ab und weisen Werte auf, die deutlich über den Werten der übrigen Varianten liegen. Die Unterschiede dieses theoretischen Parameters wurden statistisch nicht überprüft, da es sich nicht um gemessene, sondern um errechnete Werte handelt, die ihrerseits nur auf jeweils einem Mittelwert beruhen.

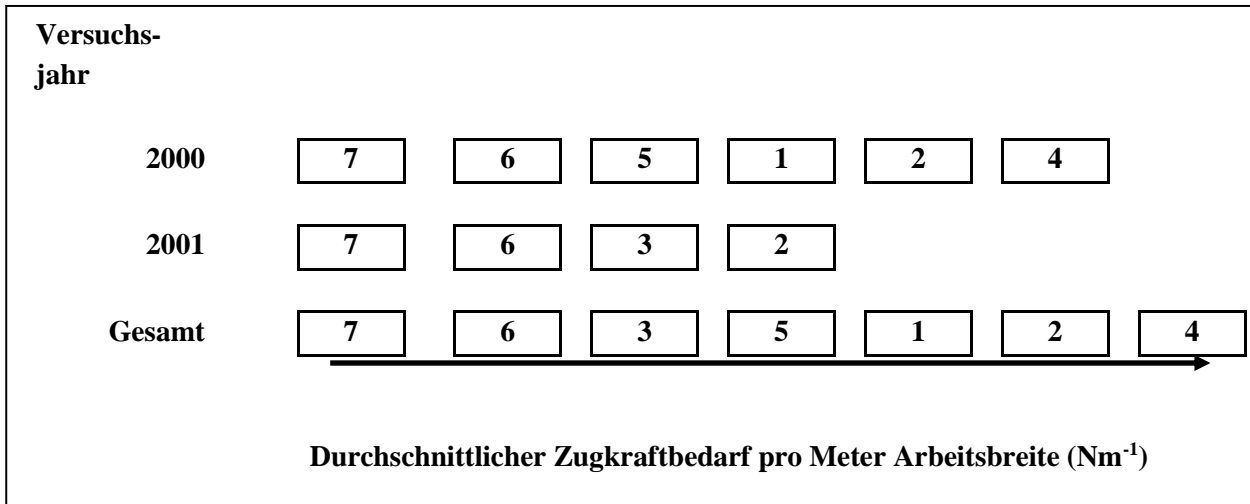


Abbildung 3-9: Durchschnittlicher Zugkraftbedarf pro Meter Arbeitsbreite (relativer Zugkraftbedarf) (Nm⁻¹); Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

c) Maximaler Zugkraftbedarf

Die Werte für den maximalen Zugkraftbedarf zeigt Tabelle 3-17, die Variantenabfolge ist Abbildung 3-10 zu entnehmen.

Tabelle 3-17: Maximaler Zugkraftbedarf (N)

LS Means; unterschiedliche Indices bezeichnen signifikante Unterschiede

Variante	Bezeichnung	Versuchsjahr		
		2000	2001	Gesamt
1	GM 130 B	2.717 ^a	-	2.046 ^a
2	PC 165 B	5.047 ^b	3.428 ^b	4.192 ^{de}
3	PC 165 M	-	2.375 ^a	3.042 ^{bc}
4	PC 165 B Zw	5.185 ^b	-	4.536 ^c
5	PC 165 M Zw	4.222 ^{ab}	-	3.571 ^{cd}
6	PC 190 M	3.233 ^a	2.207 ^a	2.726 ^{ab}
7	PC 240 M	3.833 ^{ab}	2.440 ^a	3.139 ^{bc}

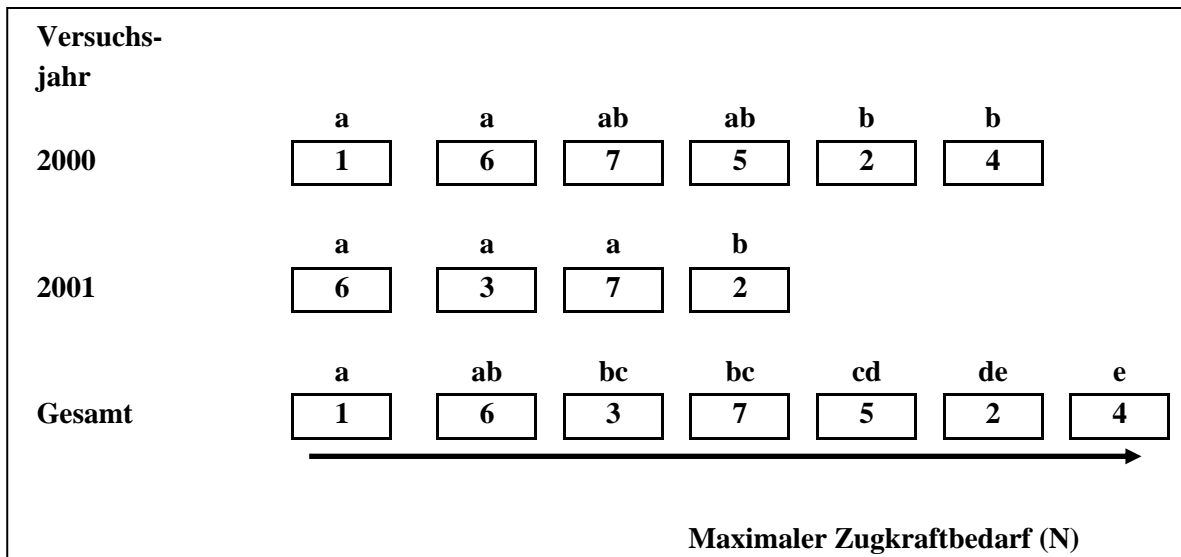


Abbildung 3-10: Maximaler Zugkraftbedarf (N), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede

Bei gleicher Arbeitsbreite verursacht der Bodenantrieb der Zapfwelle einen höheren maximalen Zugkraftbedarf als der Motorantrieb (V 2 zu V 3 bzw. V 4 zu V 5), in beiden Fällen sind die Unterschiede signifikant. Die Zwillingsräder erhöhen den maximalen Zugkraftbedarf sowohl bei Boden- (V 4 zu V 2), als auch bei Motorantrieb der Zapfwelle (V 5 zu V 3). Diese Unterschiede sind jedoch nicht signifikant.

Mit zunehmender Arbeitsbreite steigt der maximale Zugkraftbedarf, wobei zwischen V 3 (1,65 m AB) und V 6 (1,90 m AB) kein Unterschied besteht (über beide Versuchsjahre) bzw. sogar das kleinere Mähwerk den größeren maximalen Zugkraftbedarf aufweist (2001). Der Grasmäher hat den geringsten maximalen Zugkraftbedarf, signifikant ist dieser Unterschied aber nur zu den Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle (V 2 und V 4 in 2000 und über beide Jahre) sowie zu den Varianten 5 und 7 (über beide Jahre).

3.2.1.2 Arbeitsgeschwindigkeit und Arbeitsleistung der Pferde

a) Arbeitsgeschwindigkeit

Der Parameter Arbeitsgeschwindigkeit zeigt die einheitlichsten Ergebnisse aller erfassten Parameter. Signifikante Unterschiede bestehen nur zwischen den Schleppervarianten (V 8 und V 9) auf der einen und den deutlich langsameren Pferdevarianten (V 1 bis V 7) auf der anderen Seite. Die Pferde erzielen Geschwindigkeiten zwischen $4,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ und $5,4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, während die Schleppervarianten zwischen $7,3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ und $8,0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ liegen. Eindeutige Unterschiede zwischen den pferdegezogenen Varianten sind nicht zu erkennen. Tabelle 3-18 zeigt die Ergebnisse, Abbildung 3-11 die Variantenabfolge.

Tabelle 3-18: Arbeitsgeschwindigkeit (km * h⁻¹)

LS Means; unterschiedliche Indices bezeichnen signifikante Unterschiede

Variante	Bezeichnung	Versuchsjahr		
		2000	2001	Gesamt
1	GM 130 B	5,2 ^a	-	5,1 ^a
2	PC 165 B	5,4 ^a	4,6 ^a	4,9 ^a
3	PC 165 M	-	4,9 ^a	5,0 ^a
4	PC 165 B Zw	5,1 ^a	-	5,0 ^a
5	PC 165 M Zw	5,2 ^a	-	5,1 ^a
6	PC 190 M	5,0 ^a	4,9 ^a	4,9 ^a
7	PC 240 M	5,0 ^a	4,7 ^a	4,8 ^a
8	S 240	7,3 ^b	7,4 ^b	7,4 ^b
9	S 290	8,0 ^b	-	7,9 ^b

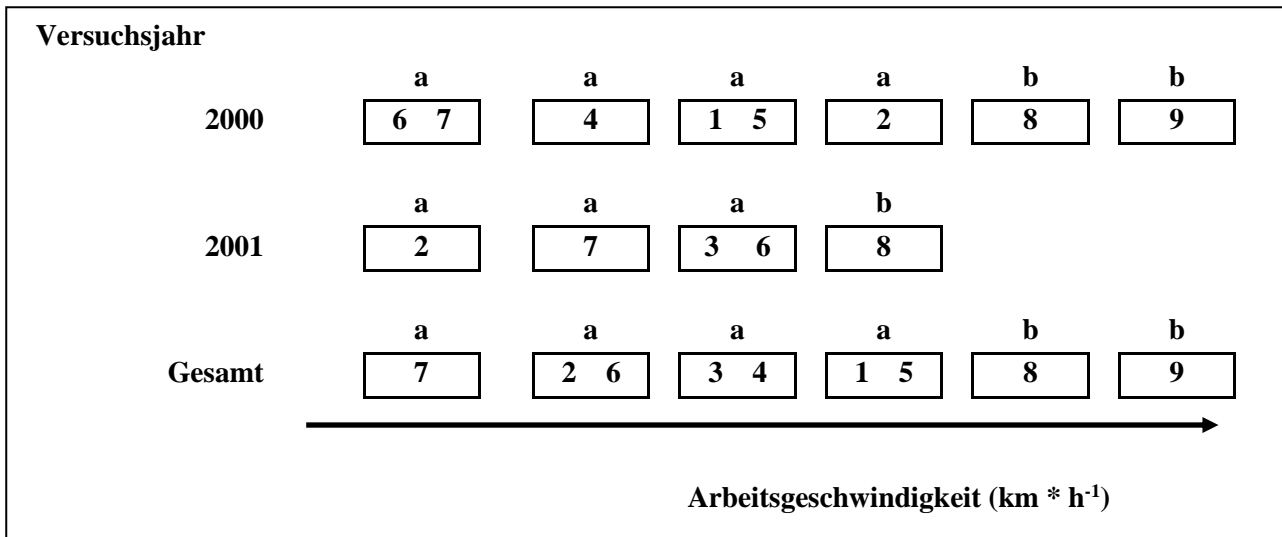


Abbildung 3-11: Arbeitsgeschwindigkeit (km * h⁻¹), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede

b) Arbeitsleistung der Pferde

Aus den gemessenen Parametern Arbeitsgeschwindigkeit und durchschnittlicher Zugkraftbedarf wurde die von den Pferden erzielte Arbeitsleistung (kW) errechnet. Im Gegensatz zur Einzeljahresauswertung zeigt die Variante bei der statistischen Auswertung über beide Arbeitsjahre hinweg keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse. Dennoch sind die Ergebnisse auch hier sehr deutlich (vgl. Tabelle 3-19 und Abbildung 3-12).

Die höchste Arbeitsleistung haben die Pferde sowohl in den Einzeljahren, als auch bei der Auswertung über beide Jahre bei den Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle erbracht (V 2 und V 4), in den beiden Einzeljahren unterscheiden sich diese Varianten jeweils signifikant von den übrigen. Die Werte für Variante 4 sind mit 4,0 kW im ersten Jahr bzw. 3,7 kW über beide Jahre jeweils höher als die für Variante 2 mit 3,8 kW bzw. 3,2 kW.

Während im zweiten Versuchsjahr nur ein geringfügiger Unterschied zwischen den drei Vorderwagenvarianten mit motorgetriebener Zapfwelle besteht und die Arbeitsleistung mit zunehmender Arbeitsbreite von 1,3 kW (V 3) über 1,4 kW (V 6) auf 1,5 kW (V 7) leicht ansteigt, ist das Bild im ersten Versuchsjahr differenzierter. Den geringsten Wert hat hier Variante 6 mit 1,8 kW, gefolgt von Variante 7 mit 2,0 kW. Der Unterschied zwischen diesen beiden ist nicht signifikant. Variante 5 hat im ersten Versuchsjahr mit 2,1 kW einen höheren Leistungsbedarf als die Varianten 6 und 7, der Unterschied ist zwischen Variante 5 und 6 sogar signifikant, zwischen Variante 5 und 7 nicht. Die Montage der Zwillingräder führt also zu einem vermehrten Leistungsbedarf.

Variante 1 und 5 liegen mit 2,1 kW gleich auf und unterscheiden sich signifikant von Variante 6, aber nicht von Variante 7. Es folgen die beiden Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle (V 2 und V 4), wie oben beschrieben.

Tabelle 3-19: Arbeitsleistung der Pferde (kW)

LS Means; unterschiedliche Indices bezeichnen signifikante Unterschiede

Variante	Bezeichnung	Versuchsjahr		
		2000	2001	Gesamt
1	GM 130 B	2,1 ^b	-	1,7
2	PC 165 B	3,8 ^c	2,6 ^b	3,2
3	PC 165 M	-	1,3 ^a	1,7
4	PC 165 B Zw	4,0 ^c	-	3,7
5	PC 165 M Zw	2,1 ^b	-	1,8
6	PC 190 M	1,8 ^a	1,4 ^a	1,6
7	PC 240 M	2,0 ^{ab}	1,5 ^a	1,8

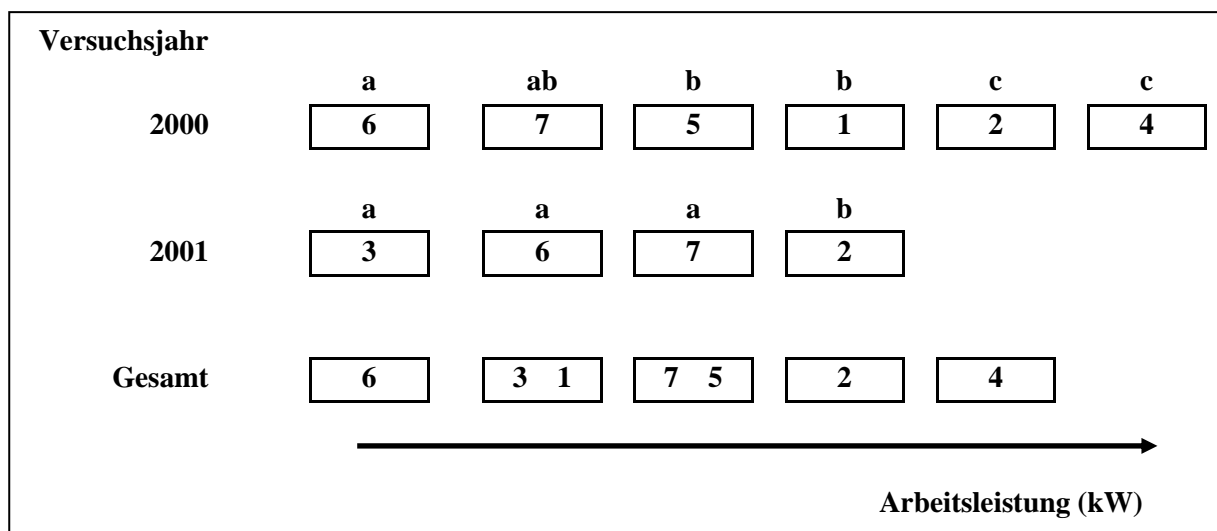


Abbildung 3-12: Arbeitsleistung der Pferde (kW), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede

3.2.1.3 Tatsächliche und relative Arbeitsbreite

a) Tatsächliche Arbeitsbreite

Bei der im Versuch erzielten tatsächlichen Arbeitsbreite zeichnen sich erwartungsgemäß klare Ergebnisse ab. Es bestehen sowohl in den Einzeljahren als auch in der Gesamtauswertung signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Mähwerksbreiten, während die Varianten mit gleicher Mähwerksbreite (V 2 bis V 5 bzw. V 7 und V 8) sich nicht signifikant unterscheiden. Die Variantenabfolge ist für alle drei Auswertungen gleich (s. Tabelle 3-20 und Abbildung 3-13).

Bei den Varianten mit dem 1,65 m breiten Mähwerk (V 2 bis V 5) schwanken die Werte im Bereich von wenigen Zentimetern zwischen 1,52 m und 1,57 m. Einzige Ausnahme ist Variante 4 mit bodengetriebener Zapfwelle und zusätzlich montierten Zwillingsrädern, die lediglich eine Arbeitsbreite von 1,45 m erzielt.

Tabelle 3-20: Tatsächliche Arbeitsbreite (cm)

LS Means; unterschiedliche Indices bezeichnen signifikante Unterschiede

		Versuchsjahr		
Variante	Bezeichnung	2000	2001	Gesamt
1	GM 130 B	119 ^a	-	119 ^a
2	PC 165 B	157 ^b	157 ^a	157 ^b
3	PC 165 M	-	156 ^a	156 ^b
4	PC 165 B Zw	145 ^b	-	145 ^b
5	PC 165 M Zw	152 ^b	-	152 ^b
6	PC 190 M	179 ^c	181 ^b	180 ^c
7	PC 240 M	226 ^d	230 ^c	228 ^d
8	S 240	221 ^d	221 ^c	221 ^d
9	S 290	268 ^e	-	268 ^e

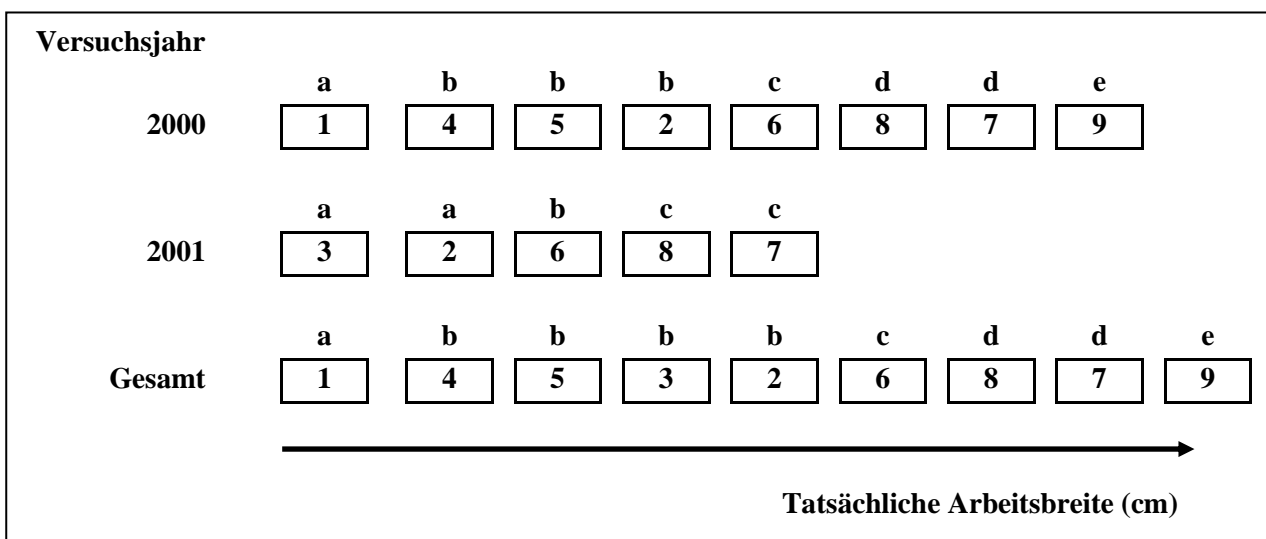


Abbildung 3-13: Tatsächliche Arbeitsbreite (cm), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede

Im Vergleich der Varianten mit dem 2,40 m breiten Mähwerk (V 7 und V 8) erzielt die pferdegezogene Variante (V 7) mit 2,26 m bis 2,30 m deutlich höhere Werte als die Schleppervariante (V 8) mit 2,20 m bis 2,21 m.

b) relative Arbeitsbreite

Die relative Arbeitsbreite ist ein Maß für die Genauigkeit, mit der gearbeitet wurde, und damit auch ein Maß für die Effektivität des eingesetzten Gerätes. Der Wert gibt an, welcher Anteil der bauartbedingten maximal möglichen Arbeitsbreite tatsächlich erzielt wurde. Im Gegensatz zur tatsächlichen Arbeitsbreite hat die Variante bei der relativen Arbeitsbreite keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse. Dennoch lassen sich einige Trends erkennen (vgl. Tabelle 3-21 und Abbildung 3-14).

Tabelle 3-21: Relative Arbeitsbreite (%)

LS Means

Variante	Bezeichnung	Versuchsjahr		
		2000	2001	Gesamt
1	GM 130 B	89	-	90
2	PC 165 B	94	95	95
3	PC 165 M	-	95	94
4	PC 165 B Zw	87	-	88
5	PC 165 M Zw	92	-	93
6	PC 190 M	94	95	95
7	PC 240 M	94	96	95
8	S 240	92	92	92
9	S 290	92	-	93

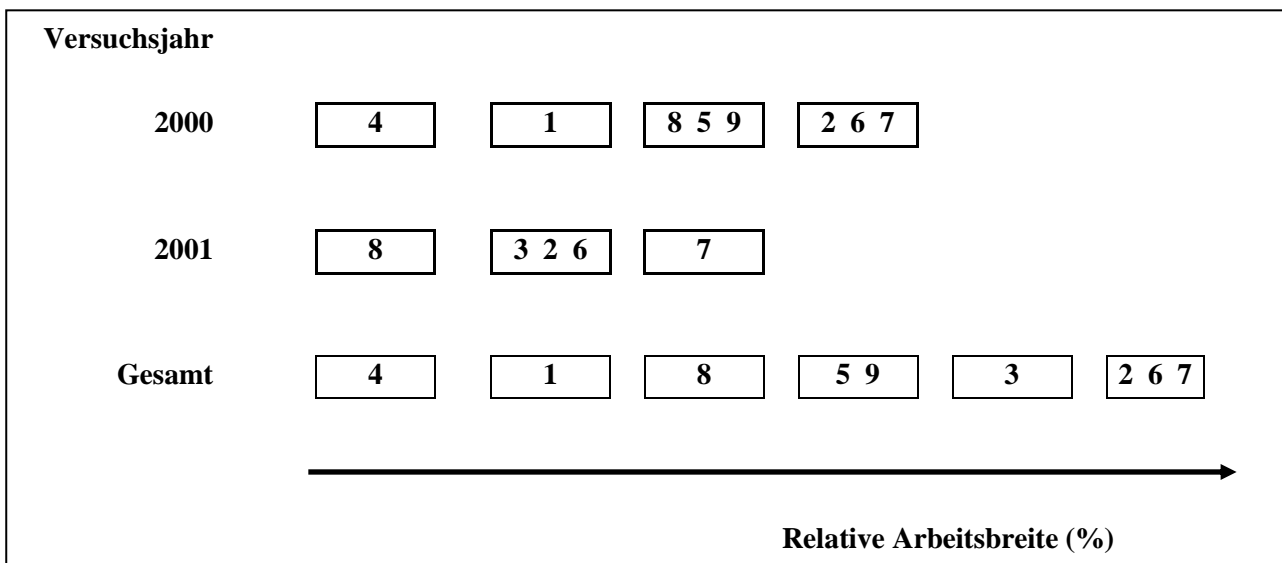


Abbildung 3-14: Relative Arbeitsbreite (%), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

Mit Ausnahme des Grasmähers (V 1; 90 %) und der Vorderwagenvariante mit bodengetriebener Zapfwelle und Zwillingsrädern (V 4; 88 %) bewegen sich die Ergebnisse alle im Bereich von 92 % bis 96 %. Die Variantenabfolge ist recht einheitlich. Die Schleppvarianten (V 8 und V 9) liegen zwischen den beiden erwähnten Varianten 1 und 4 und den übrigen Pferdevarianten. Variante 7 ist in allen drei Auswertungen die effektivste Variante.

3.2.1.4 Arbeitszeit pro Parzelle und Teilarbeitszeiten ab Feldrand

a) **Arbeitszeit pro Parzelle**

Die Arbeitszeiten pro Parzelle liegen bei den Pferdevarianten im Bereich von 584 sec. bis 695 sec. (9,7 min. bis 11,6 min.), es gibt keine signifikanten Unterschiede der Pferdevarianten untereinander (vgl. Tabelle 3-22). Einzige Ausnahme ist Variante 4, die mit 695 sec. den höchsten Wert aufweist, der in der Auswertung über beide Jahre signifikant höher ist als der der Varianten 2, 3, 5 und 7. Für die übrigen Varianten mit dem 1,65 m Mähwerk (V 2, V 3 und V 5) lässt sich kein eindeutiger Trend erkennen (vgl. Abbildung 3-15). Die Werte sind, mit Ausnahme der bodengetriebenen Variante 2 im zweiten Jahr geringer als die Werte für die beiden großen Mähwerke (V 6 und 7). Der Grasmäher (V 1) liegt mit 622 sec. zwischen den Varianten 7 und 8, mit einer größeren Nähe zu Variante 7.

Die Werte für die beiden Schleppvarianten sind in allen Fällen signifikant geringer als die Werte für die Pferdevarianten und liegen zwischen 391 sec. und 435 sec. (6,5 min. bis 7,3 min.).

Tabelle 3-22: Arbeitszeit pro Parzelle (sec.)

LS Means; unterschiedliche Indices bezeichnen signifikante Unterschiede

Variante	Bezeichnung	Versuchsjahr		
		2000	2001	Gesamt
1	GM 130 B	622 ^b	-	622 ^{bc}
2	PC 165 B	585 ^b	621 ^b	609 ^b
3	PC 165 M	-	606 ^b	606 ^b
4	PC 165 B Zw	695 ^b	-	695 ^c
5	PC 165 M Zw	599 ^b	-	599 ^b
6	PC 190 M	665 ^b	613 ^b	639 ^{bc}
7	PC 240 M	620 ^b	612 ^b	616 ^b
8	S 240	435 ^a	391 ^a	413 ^a
9	S 290	411 ^a	-	411 ^a

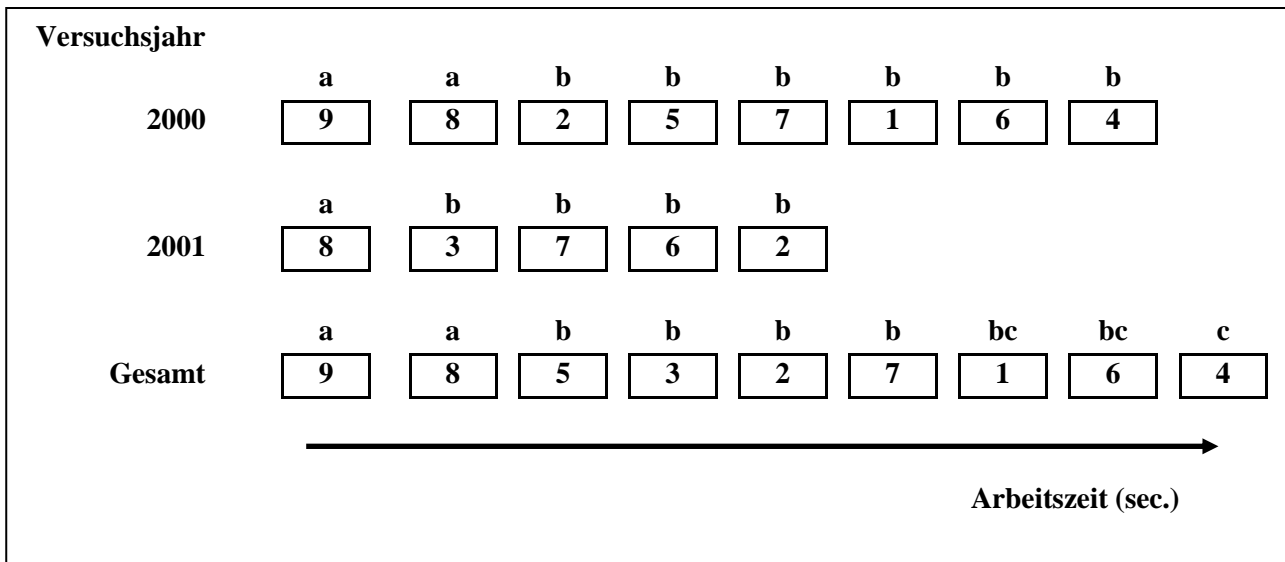


Abbildung 3-15: Arbeitszeit pro Parzelle (sec.), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede

b) Teilarbeitszeiten ab Feldrand

Bei den Teilarbeitszeiten bestehen bis auf eine Ausnahme keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten. Lediglich bei der Auswertung über beide Jahre ist der Anteil der Wendezeit bei der Schleppervariante mit Scheibenmäherwerk (V 9) mit 19 % signifikant höher als bei allen anderen Varianten.

Anteil Lastfahrt

Der Anteil der Teilarbeit Lastfahrt liegt bei allen Varianten zwischen 76 % und 89 % (s. Tabelle 3-23 und Abbildung 3-16). Den geringsten Wert mit 76 % bzw. 78 % hat stets Variante 4. Im Übrigen sind keine eindeutigen Muster zu erkennen.

Tabelle 3-23: Anteil Lastfahrt an der gesamten Arbeitszeit (%)

LS Means

Variante	Bezeichnung	Versuchsjahr		
		2000	2001	Gesamt
1	GM 130 B	82	-	84
2	PC 165 B	82	89	86
3	PC 165 M	-	87	84
4	PC 165 B Zw	76	-	78
5	PC 165 M Zw	85	-	87
6	PC 190 M	81	86	83
7	PC 240 M	86	88	87
8	S 240	83	88	85
9	S 290	80	-	83

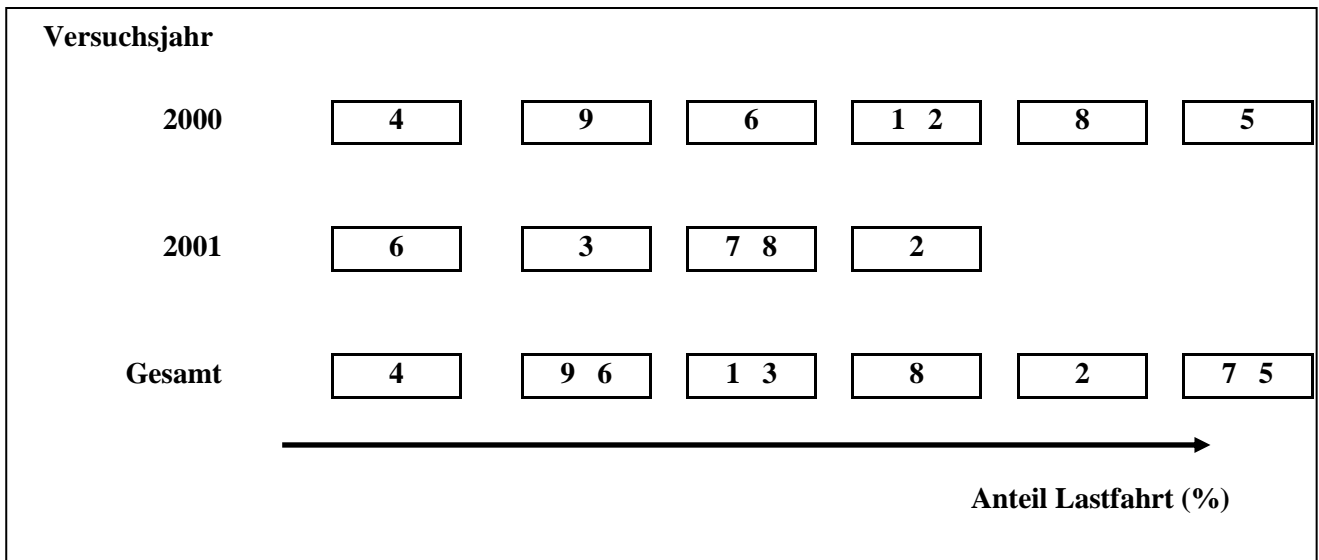


Abbildung 3-16: Anteil Lastfahrt (%), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

Anteil Wendezeit

Die Werte für den Anteil der Wendezeit an der gesamten Arbeitszeit bewegen sich zwischen 11 % und 20 % (vgl. Tabelle 3-24 und Abbildung 3-17). Lediglich bei der Auswertung über beide Versuchsjahre hat die Variante einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse, hier ist der Wert für die Schleppervariante mit dem Front-Scheibenmäherwerk (V 9) mit 19 % signifikant höher als Werte für die übrigen Varianten, die zwischen 11 % und 13 % liegen.

Tabelle 3-24: Anteil Wendezeit an der gesamten Arbeitszeit (%)

LS Means; unterschiedliche Indices bezeichnen signifikante Unterschiede

		Versuchsjahr		
Variante	Bezeichnung	2000	2001	Gesamt
1	GM 130 B	12	-	11 ^a
2	PC 165 B	15	11	13 ^a
3	PC 165 M	-	11	12 ^a
4	PC 165 B Zw	13	-	12 ^a
5	PC 165 M Zw	13	-	12 ^a
6	PC 190 M	14	11	13 ^a
7	PC 240 M	13	12	13 ^a
8	S 240	15	12	13 ^a
9	S 290	20	-	19 ^b

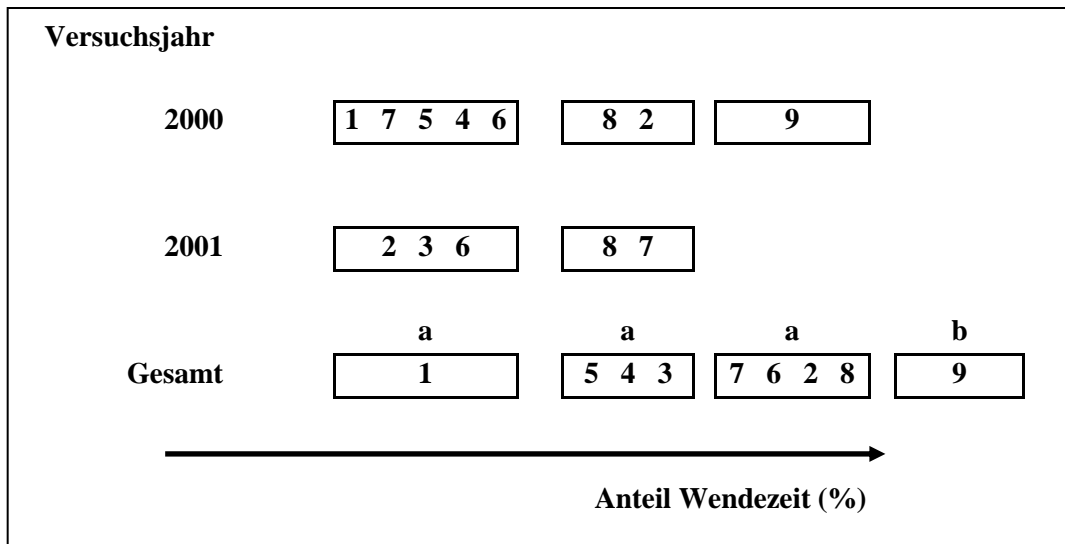


Abbildung 3-17: Anteil Wendezeit (%), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede

Anteil Störungen

Auch beim Anteil Störungen an der Gesamt-Arbeitszeit gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten (vgl. Tabelle 3-25 und Abbildung 3-18). Die Werte liegen zwischen 0 % und 11 %, Variante 4 weist sowohl mit 11 % im ersten Versuchsjahr als auch mit 10 % in der Auswertung über beide Jahre einen mindestens doppelt so hohen Wert auf, wie die übrigen Varianten. Bei den Pferdevarianten hat Variante 7 stets den geringsten Wert.

Tabelle 3-25: Anteil Störungen an der gesamten Arbeitszeit (%)

LS Means

		Versuchsjahr		
Variante	Bezeichnung	2000	2001	Gesamt
1	GM 130 B	6	-	5
2	PC 165 B	3	0	1
3	PC 165 M	-	2	3
4	PC 165 B Zw	11	-	10
5	PC 165 M Zw	2	-	1
6	PC 190 M	5	3	4
7	PC 240 M	2	0	1
8	S 240	3	0	1
9	S 290	0	-	0

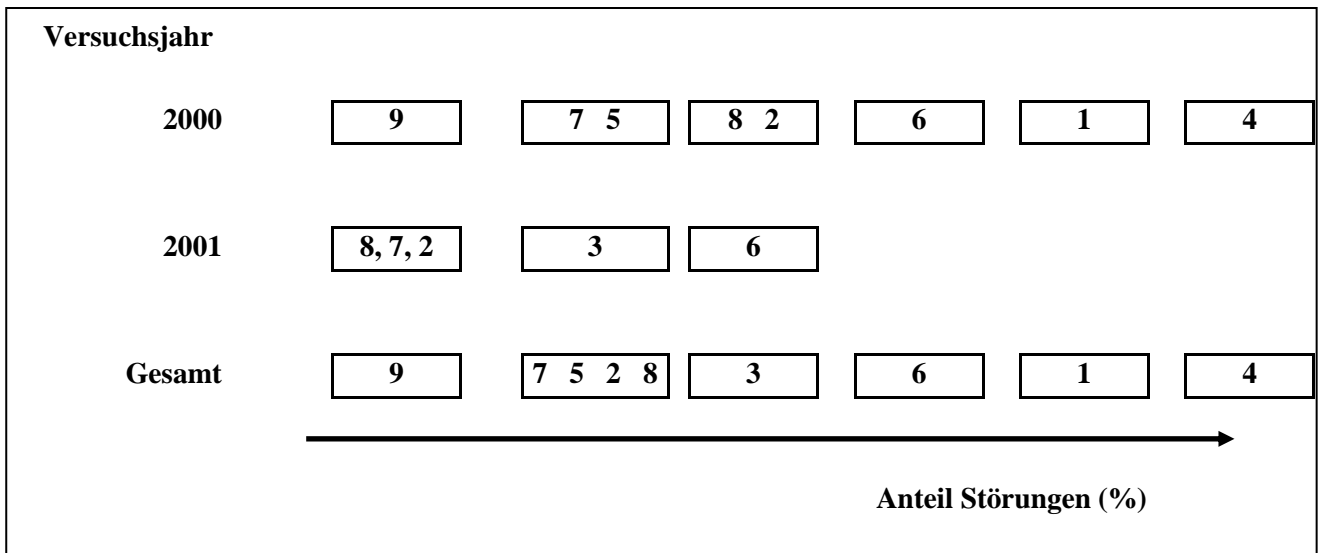


Abbildung 3-18: Anteil Störungen (%), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

3.2.1.5 Flächenleistung

Der Grasmäher mit der geringsten Arbeitsbreite erzielt mit $0,53 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ erwartungsgemäß die geringste Flächenleistung. Es folgen die Varianten mit 1,65 m breitem Mähwerk (V 2 bis V 5) mit Werten von $0,63 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ bis $0,72 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$. Alle diese Werte sind nicht signifikant verschieden (vgl. Tabelle 3-26).

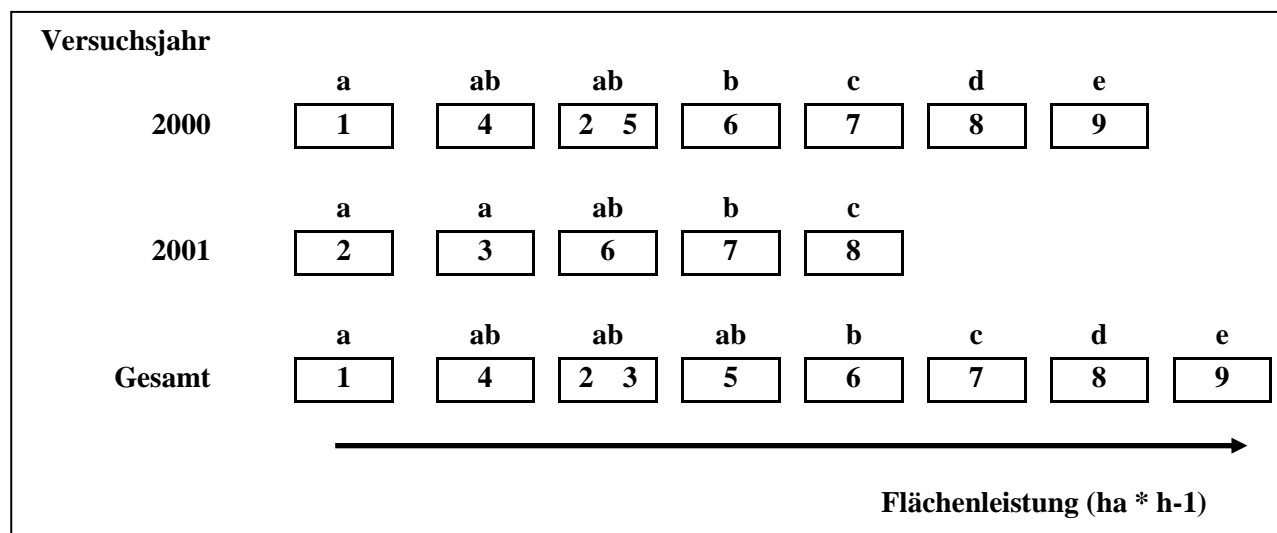
Die nächst höheren Flächenleistungen erzielt Variante 6 mit $0,76 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ bis $0,79 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$. Diese Werte sind - mit Ausnahme des zweiten Versuchsjahres - signifikant höher als die der kleineren Mähwerke. Das nächst größere Mähwerk (V 7) erzielt $1,00 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ bzw. $1,01 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$. Diese Werte sind signifikant höher als die der kleineren Mähwerke. Nur im zweiten Versuchsjahr ist der Unterschied zu Variante 6 nicht signifikant.

Die beiden Schleppervarianten haben mit $1,44 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ bis $1,57 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ (V 7) bzw. $1,84 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ (V 8) signifikant höhere Flächenleistungen als die Pferdevarianten und unterscheiden sich auch untereinander signifikant.

Betrachtet man die Variantenabfolgen (s. Abbildung 3-19), so zeigt sich, dass bei den Varianten mit 1,65 m breitem Mähwerk (V 2 bis V 5) der Antrieb der Zapfwelle keinen deutlichen Einfluss auf die Flächenleistung hat. Lediglich die Kombination aus Zwillingrädern und Bodenantrieb (V 4) führt zu einer erkennbar geringeren Flächenleistung.

Tabelle 3-26: Flächenleistung (ha * h⁻¹)*LS Means; unterschiedliche Indices bezeichnen signifikante Unterschiede*

Variante	Bezeichnung	Versuchsjahr		
		2000	2001	Gesamt
1	GM 130 B	0,53 ^a	-	0,53 ^a
2	PC 165 B	0,72 ^{ab}	0,68 ^a	0,69 ^{ab}
3	PC 165 M	-	0,69 ^a	0,69 ^{ab}
4	PC 165 B Zw	0,63 ^{ab}	-	0,63 ^{ab}
5	PC 165 M Zw	0,72 ^{ab}	-	0,72 ^{ab}
6	PC 190 M	0,76 ^b	0,79 ^{ab}	0,78 ^b
7	PC 240 M	1,01 ^c	1,00 ^b	1,00 ^c
8	S 240	1,44 ^d	1,57 ^c	1,51 ^d
9	S 290	1,84 ^e	-	1,84 ^e

**Abbildung 3-19: Flächenleistung (ha * h⁻¹), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)***unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede*

3.2.1.6 Treibstoffverbrauch, Energiebedarf und Emissionen

a) Treibstoffverbrauch pro Parzelle

Der durchschnittliche Treibstoffverbrauch der pferdegezogenen Varianten mit motorgetriebenem Mähwerk (V 3, V 5 bis V 7) zeigt bei der Betrachtung auf Parzellenebene nur geringfügige Unterschiede (vgl. Tabelle 3-27 und Abbildung 3-20). In keinem Versuchsdurchgang gibt es signifikante Unterschiede zwischen diesen Varianten, der Verbrauch schwankt zwischen 0,41 l * Parzelle⁻¹ und 0,52 l * Parzelle⁻¹.

Die Schleppervarianten V 8 und V 9 weisen einen deutlich höheren Treibstoffverbrauch auf, der sich im ersten Versuchsjahr signifikant von den anderen Ergebnissen unterscheidet. Im zweiten Versuchsjahr gibt es keinen signifikanten Unterschied, allerdings ist auch hier der Verbrauch der Schleppervariante mit 0,78 l * Parzelle⁻¹

deutlich höher als der der Pferdevarianten, die zwischen $0,41 \text{ l} * \text{Parzelle}^{-1}$ und $0,47 \text{ l} * \text{Parzelle}^{-1}$ liegen. Bei der Auswertung über beide Versuchsjahre unterscheiden sich die Schleppervarianten wiederum signifikant von den Pferdevarianten. Lediglich V 8 und V 5 sind nicht signifikant verschieden, aber der Verbrauch der Schleppervariante ist mit $0,94 \text{ l} * \text{Parzelle}^{-1}$ deutlich höher als der der Pferdevariante mit $0,52 \text{ l} * \text{Parzelle}^{-1}$. Zudem ist der Verbrauch des Frontmähdwerkes (V 9) mit $1,91 \text{ l} * \text{Parzelle}^{-1}$ nahezu doppelt so hoch wie der des Heck-Doppelmesser-Mähwerks (V 8) mit $0,94 \text{ l} * \text{Parzelle}^{-1}$; dieser Unterschied ist ebenfalls signifikant.

Tabelle 3-27: Treibstoffverbrauch pro Parzelle ($1 * \text{Parzelle}^{-1}$)

LS Means; unterschiedliche Indices bezeichnen signifikante Unterschiede

Variante	Bezeichnung	Versuchsjahr		
		2000	2001	Gesamt
3	PC 165 M	-	0,41	0,41 ^a
5	PC 165 M Zw	0,52 ^a	-	0,52 ^{ab}
6	PC 190 M	0,48 ^a	0,47	0,47 ^a
7	PC 240 M	0,52 ^a	0,46	0,49 ^a
8	S 240	1,09 ^b	0,78	0,94 ^b
9	S 290	1,91 ^b	-	1,91 ^c

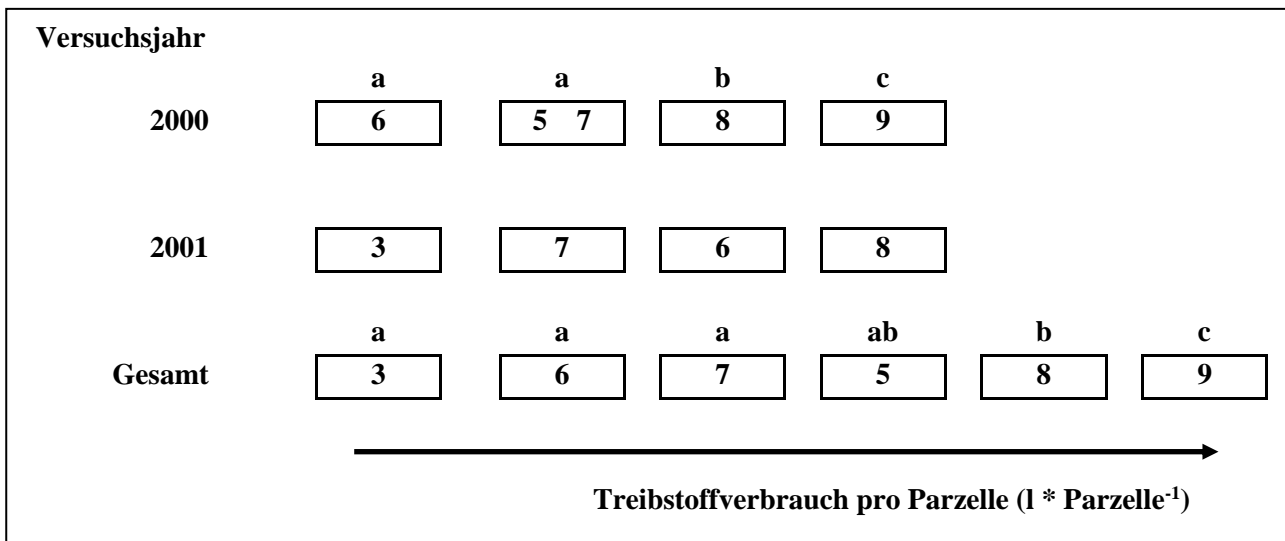


Abbildung 3-20: Treibstoffverbrauch pro Parzelle ($1 * \text{Parzelle}^{-1}$), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede

b) Treibstoffverbrauch pro Hektar

Aussagekräftiger, weil auf dieselbe Flächeneinheit bezogen, sind die aus den Parzellenergebnissen errechneten Werte für den Treibstoffverbrauch pro Hektar (s. Tabelle 3-28 und Abbildung 3-21). Bei der Auswertung im zweiten Versuchsjahr und über beide Versuchsjahre hinweg hat die Variante keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse.

Die Ergebnisse für die pferdegezogenen Varianten zeigen, dass der Verbrauch pro Hektar mit zunehmender Mähwerksgröße abnimmt. Auffällig sind die deutlich höheren Verbrauchswerte von Variante 5 gegenüber Variante 3, da der Unterschied zwischen diesen - die montierten Zwillingräder - ja keinen Einfluss auf die erforderliche Motorleistung hat.

Bei den Schleppervarianten wird der Mehrverbrauch des Frontscheibenmähwerkes (V 9) gegenüber dem Doppelmessermähwerk (V 8) deutlich. Beide Varianten weisen deutlich höhere Werte auf als die Pferdevarianten, sie unterschieden sich im ersten Versuchsjahr signifikant von den Pferdevarianten und untereinander.

Tabelle 3-28: Treibstoffverbrauch pro Hektar (l * ha⁻¹)

LS Means; unterschiedliche Indices bezeichnen signifikante Unterschiede

		Versuchsjahr		
Variante	Bezeichnung	2000	2001	Gesamt
3	PC 165 M	-	3,49	3,80
5	PC 165 M Zw	4,41 ^b	-	4,25
6	PC 190 M	3,48 ^{ab}	3,50	3,49
7	PC 240 M	2,94 ^a	2,74	2,84
8	S 240	6,26 ^c	4,62	5,44
9	S 290	9,04 ^d	-	8,74

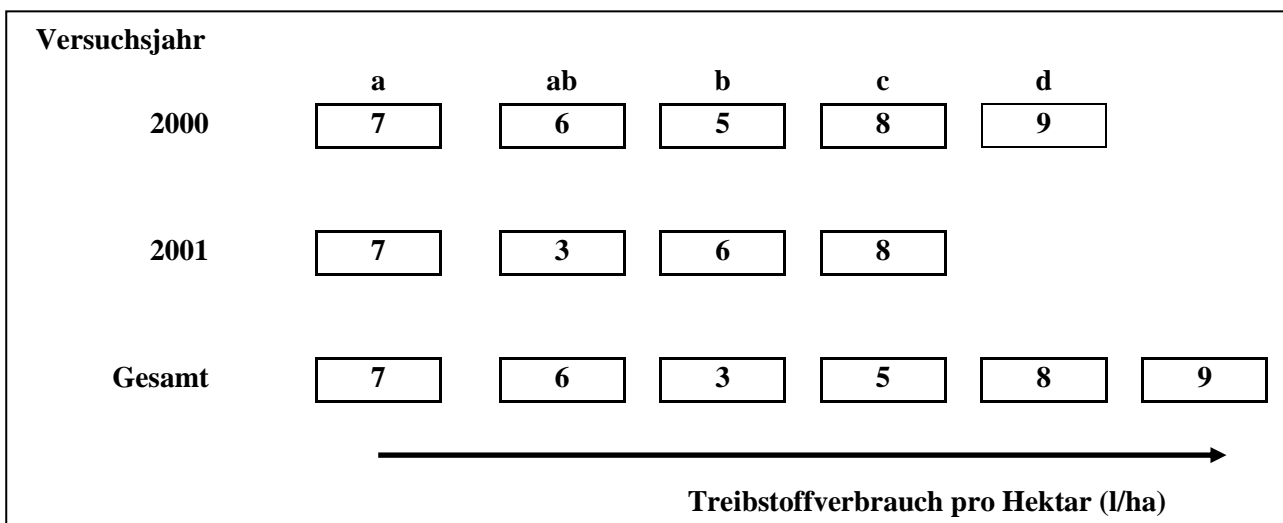


Abbildung 3-21: Treibstoffverbrauch pro Hektar (l * ha⁻¹), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede

Insgesamt ergibt sich aus der Variantenabfolge eine deutliche Reihung (Abbildung 3-21). Der Treibstoffverbrauch pro Hektar sinkt bei den Pferdevarianten - mit Ausnahme von Variante 3 im zweiten Versuchsjahr - mit zunehmender Mähwerksgröße, während die Schleppervarianten einen deutlich höheren Verbrauch als die Pferdevarianten aufweisen; bei den Schleppervarianten hat das Frontmähwerk einen deutlich höheren Treibstoffverbrauch als das Doppelmessermähwerk.

c) Energiebedarf

Um den Energiebedarf der untersuchten Varianten vergleichen zu können, werden die gemessenen Treibstoff-Verbrauchswerte der Motoren in Energieeinheiten (MJ) umgerechnet, bei den Pferdevarianten wird die von den Pferden verbrauchte Energie (MJ) berechnet. Diese Berechnungen werden mit den Ergebnissen der Auswertung über beide Versuchsjahre durchgeführt.

Energiebedarf der Motoren

Tabelle 3-29 zeigt den Energiebedarf pro Hektar der Motoren der untersuchten Varianten. Die Schleppervarianten weisen mit 194,21 MJ * ha⁻¹ (V 8) bzw. 312,02 MJ * ha⁻¹ (V 9) deutlich höhere Energieverbrauchswerte auf als die Pferdevarianten mit Werten von 86,62 MJ * ha⁻¹ (V 7) bis 129,63 MJ * ha⁻¹ (V 5). Bei diesen nimmt der Energieverbrauch mit zunehmender Mähwerksbreite ab. Die Variante mit den montierten Zwillingsrädern (V 5) hat mit 129,63 MJ * ha⁻¹ den höchsten Verbrauch, dieselbe Variante ohne Zwillingsräder (V 3) hat einen Verbrauch von 115,90 MJ * ha⁻¹. Es folgen das Mähwerk mit 1,90 m Arbeitsbreite (V 6) mit 106,45 MJ * ha⁻¹ und schließlich das Mähwerk mit 2,40 m Arbeitsbreite (V 7) mit 86,62 MJ * ha⁻¹.

Der direkte Vergleich desselben Mähwerks am Vorderwagen bzw. am Schlepper (V 7 zu V 8) zeigt, dass die Schleppervariante die 2,24-fache Energiemenge benötigt.

Tabelle 3-29: Energieverbrauch der Motoren (MJ * ha⁻¹)

Energiedichte nach BASSHUYSEN & SCHÄFER (2007)

Variante	Bezeichnung	Treibstoff	gemessener Verbrauch [l * ha ⁻¹]	Energiedichte H _u [MJ * l ⁻¹]	Energieverbrauch Motor EM [MJ * ha ⁻¹]
3	PC 165 M	Normal bleifrei	3,80	30,5	115,90
5	PC 165 M Zw	Normal bleifrei	4,25	30,5	129,63
6	PC 190 M	Normal bleifrei	3,49	30,5	106,45
7	PC 240 M	Normal bleifrei	2,84	30,5	86,62
8	S 240	Diesel	5,44	35,7	194,21
9	S 290	Diesel	8,74	35,7	312,02

Energiebedarf der Pferde

Die Wägungen der im Versuch eingesetzten Ardenner-Wallache ergaben eine durchschnittliche Körpermasse von jeweils 850 kg. Somit haben die Pferde einen Erhaltungsenergiebedarf pro Tag von je etwa:

$$EEP_{[MJ DE * d^{-1}]} = [1.375 + (30 * 850)] * 4,18 * 10^{-3} = 112,34 \text{ MJ verdaulicher Energie pro Pferd}$$

Beide Pferde zusammen haben demnach einen Erhaltungsenergiebedarf pro Tag von 224,68 MJ verdaulicher Energie. Unter Berücksichtigung der pro Hektar benötigten Arbeitszeit ergibt sich der Erhaltungsenergiebedarf pro Hektar (E_[MJ DE * ha⁻¹]) für die untersuchten Varianten wie in Tabelle 3-30 dargestellt.

Tabelle 3-30: Erhaltungsenergiebedarf EEP beider Pferde (MJ DE * ha⁻¹)

$E_{[MJ\ DE * d^{-1}]}$ = Erhaltungsenergiebedarf beider Pferde pro Tag in MJ verdauliche Energie
 $t[h * ha^{-1}]$ = Arbeitszeitbedarf pro Hektar

Variante	Bezeichnung	EEP [MJ DE * d ⁻¹]	t [h * ha ⁻¹]	EEP [MJ DE * ha ⁻¹]
1	GM 130 B	224,68	1,89	17,69
2	PC 165 B	224,68	1,45	13,57
3	PC 165 M	224,68	1,45	13,57
4	PC 165 B Zw	224,68	1,59	14,89
5	PC 165 M Zw	224,68	1,39	13,01
6	PC 190 M	224,68	1,28	11,98
7	PC 240 M	224,68	1,00	9,36

Zur Berechnung des Gesamtenergiebedarfs muss die notwendige Zusatzenergie zur Verrichtung der Arbeit (= Lokomotion + Zugkraft) ergänzt werden. Die Zusatzenergie für die Lokomotion berechnet sich pro Pferd und Parzelle nach der Formel

$$ZEP_{[MJ\ DE]} = 1,6 * F * M * 10^{-3} * 0,7^{-1} * 0,87^{-1}; \text{ mit KM} = 850 \text{ kg}$$

Die Zusatzenergie für die Zugkraft ergibt sich pro Pferd und Parzelle aus der Formel

$$ZEP_{[MJ\ DE]} = W * 0,3^{-1} * 10^{-3} * 0,7^{-1} * 0,87^{-1}; \text{ mit } W = 0,5 * Z * F$$

Die so errechneten Werte müssen jeweils mit 2 multipliziert und das Ergebnis durch die Flächengröße der betreffenden Parzelle dividiert werden, um die Werte pro Gespann und Hektar zu erhalten. Die Addition der Beträge für Lokomotion und Zugkraft ergibt den Zusatzenergiebedarf der beiden Pferde je Variante. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 3-31.

Tabelle 3-31: Zusatzenergiebedarf ZEP der Pferde (MJ DE * ha⁻¹)

Variante	Bezeichnung	0,5 * Z _[N]	F [km]	W je Pferd [kJ * Parz ⁻¹]	Parzellen- größe [ha]	Zusatzenergiebedarf ZEP beide Pferde [MJ DE * ha ⁻¹] für		
						Loko- motion	Zugkraft	Gesamt
1	GM 130 B	628	0,705	442,74	0,09	34,99	53,85	88,84
2	PC 165 B	1.178	0,705	830,49	0,12	26,24	75,76	102,00
3	PC 165 M	577	0,705	406,79	0,12	26,24	37,11	63,35
4	PC 165 B Zw	1.342	0,705	946,11	0,12	26,24	86,31	112,55
5	PC 165 M Zw	668	0,705	470,94	0,12	26,24	42,96	69,20
6	PC 190 M	579	0,705	408,20	0,13	24,22	34,37	58,59
7	PC 240 M	650	0,705	458,25	0,17	18,52	29,51	48,03

Durch Addition des Erhaltungs- und des Zusatzenergiebedarfs errechnet sich der in Tabelle 3-32 dargestellte Gesamtenergiebedarf der Pferde GEP.

Tabelle 3-32: Gesamtenergiebedarf GEP der Pferde (MJ DE * ha⁻¹)

$EEP_{[MJ\ DE * ha^{-1}]} = \text{Erhaltungsenergiebedarf pro Hektar}$

$ZEP_{[MJ\ DE * ha^{-1}]} = \text{Zusatzenergiebedarf pro Hektar}$

Variante	Bezeichnung	EEP [MJ DE * ha ⁻¹]	ZEP [MJ DE * ha ⁻¹]	GEP [MJ DE * ha ⁻¹]
1	GM 130 B	17,69	88,84	106,53
2	PC 165 B	13,57	102,00	115,57
3	PC 165 M	13,57	63,35	76,92
4	PC 165 B Zw	14,89	112,55	127,44
5	PC 165 M Zw	13,01	69,20	82,21
6	PC 190 M	11,98	58,59	70,57
7	PC 240 M	9,36	48,03	57,39

Gesamtenergiebedarf der untersuchten Varianten

Für den Vergleich mit den Schleppvarianten muss bei den Pferdevarianten mit motorgetriebener Zapfwelle die vom Motor verbrauchte Energie hinzugefügt werden. Dadurch ergibt sich der in Tabelle 3-33 dargestellte Gesamtenergiebedarf pro Hektar der untersuchten Varianten. Bezüglich des Gesamtenergiebedarfs pro Hektar schneiden die bodengetriebenen Varianten am besten ab (vgl. auch Abbildung 3-22). Der Grasmäher (V 1) hat mit 106,53 MJ * ha⁻¹ den geringsten Energiebedarf, gefolgt von den bodengetriebenen Doppelmesser-Varianten ohne Zwillingräder (V 2) mit 115,57 MJ * ha⁻¹ sowie mit Zwillingrädern (V 4) mit 127,44 MJ * ha⁻¹. Der Anteil regenerativer Energie am Gesamtenergiebedarf liegt bei diesen drei Varianten bei 100 %, da die gesamte Arbeit von den Pferden erbracht wird.

Die motorgetriebenen Doppelmesser-Varianten haben alle einen höheren Energiebedarf pro Hektar als die bodengetriebenen Varianten. V 7 weist unter den motorgetriebenen Varianten mit 144,01 MJ * ha⁻¹ den geringsten Wert auf, gefolgt von V 6 mit 177,02 MJ * ha⁻¹, V 3 mit 192,82 MJ * ha⁻¹ und schließlich V 5 mit 211,84 MJ * ha⁻¹. D.h., der Gesamtenergiebedarf sinkt mit zunehmender Arbeitsbreite und wird bei gleicher Arbeitsbreite (V 3 zu V 5) durch die Zwillingräder erhöht. Der Anteil regenerativer Energie am Gesamtenergiebedarf pro Hektar beträgt bei den motorgetriebenen Doppelmesservarianten nahezu einheitlich 40 % (V 5: 39 %), während 60 % (V 5: 61 %) des Energiebedarfs in fossiler Form (Diesel) auf den Aufbaumotor entfallen.

Die Schleppvariante mit dem 2,40 m Mähwerk (V 8) hat mit 194,21 MJ * ha⁻¹ einen um über 50 % höheren Energiebedarf als die Pferdevariante mit demselben Mähwerk (V 7), während die Schleppvariante mit dem Front-Scheibenmähwerk (V 9) mit 312,02 MJ * ha⁻¹ einen deutlich höheren Energiebedarf hat als alle anderen Varianten. Der Anteil regenerativer Energie am Gesamtenergiebedarf pro Hektar beträgt bei den Schleppvarianten naturgemäß 0 %.

Tabelle 3-33: Gesamtenergiebedarf EG der untersuchten Varianten (MJ * ha⁻¹)

GEP = Gesamtenergiebedarf Pferde;

EM = Energiebedarf Motor;

EG = Gesamtenergiebedarf Variante (= *GEP* + *EM*)

		Energiebedarf			
		Pferde	Motor	Gesamt	
Variante	Bezeichnung	GEP _[MJ * ha⁻¹]	EM _[MJ * ha⁻¹]	EG _[MJ * ha⁻¹]	davon % erneuerbare Energie (gerundet)
1	GM 130 B	106,53	-	106,53	100
2	PC 165 B	115,57	-	115,57	100
3	PC 165 M	76,92	115,90	192,82	40
4	PC 165 B Zw	127,44	-	127,44	100
5	PC 165 M Zw	82,21	129,63	211,84	39
6	PC 190 M	70,57	106,45	177,02	40
7	PC 240 M	57,39	86,62	144,01	40
8	S 240	-	194,21	194,21	0
9	S 290	-	312,02	312,02	0

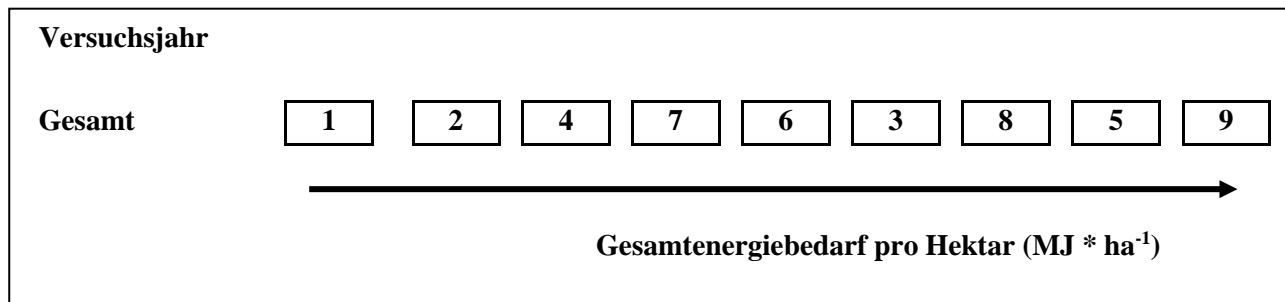


Abbildung 3-22: Gesamtenergiebedarf pro Hektar (MJ * ha⁻¹), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

d) Emissionen

Für die Berechnung der aus dem Energiebedarf resultierenden Emissionen ist die Umrechnung des Energiebedarfs pro Hektar (MJ * ha⁻¹) in Kilowattstunden pro Hektar (kWh * ha⁻¹) notwendig. Hierfür gilt gemäß SI-Einheitensystem: 3,6 MJ entsprechen 1 kWh. Tabelle 3-34 zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 3-34: Treibstoff-Energiebedarf der motorisierten Varianten (kWh/ha)

Variante	Bezeichnung	Treibstoff	gemessener Verbrauch [l/ha]	Energiebedarf [MJ * ha ⁻¹]	Energiebedarf [kWh/ha]
3	PC 165 M	Normal bleifrei	3,80	115,90	32,19
5	PC 165 M Zw	Normal bleifrei	4,25	129,63	36,01
6	PC 190 M	Normal bleifrei	3,49	106,45	29,57
7	PC 240 M	Normal bleifrei	2,84	86,62	24,06
8	S 240	Diesel	5,44	194,21	53,95
9	S 290	Diesel	8,74	312,02	86,67

Durch Multiplikation des Energiebedarfs in kWh * ha⁻¹ mit den EU-Grenzwerten errechnen sich die Werte für den maximalen Schadstoffausstoß der untersuchten Varianten für CO, HC, NO_x und Partikel. Tabelle 3-35 zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 3-35: Maximale Emissionen von CO, HC, NO_x und Partikeln der im Versuch eingesetzten Motoren (gm * ha⁻¹)

EU-Grenzwert nach ECOPOINT (2010)

			EU-Grenzwert (g * kW ⁻¹)			
			CO	HC	NO _x	Partikel
			6,5	1,3	9,2	0,85
Variante	Bezeichnung	Energiebedarf (kWh * ha ⁻¹)	maximale Emissionen (g * ha ⁻¹)			
3	PC 165 M	32,19	209,24	41,85	296,15	-
5	PC 165 M Zw	36,01	234,07	46,81	331,29	-
6	PC 190 M	29,57	192,21	38,44	272,04	-
7	PC 240 M	24,06	156,39	31,28	221,35	-
8	S 240	53,95	350,68	70,14	496,34	45,86
9	S 290	86,67	563,36	112,67	797,36	73,67

Für CO₂, CH₄ und N₂O geben EGGLESTONE et al. (2006) die in Tabelle 3-36 aufgeführten Werte an. Die entsprechenden Emissionswerte der im Versuch eingesetzten Motoren ergeben sich durch Multiplikation dieser mittleren Gehalte mit dem jeweiligen Treibstoff-Energiebedarf (s. Tabelle 3-37). Unter Berücksichtigung der im Versuch gemessenen Flächenleistungen bzw. der zur Mahd von 1 ha benötigten Arbeitszeit und der in Kapitel 3.1.6.5 zitierten Werte für den CH₄- und den N-Ausstoß pro Pferd und Stunde ergeben sich für die Pferdevarianten die in Tabelle 3-38 aufgeführten Werte für den CH₄- und den N-Ausstoß der Pferde je Hektar.

Tabelle 3-36: Werte für CO₂-, CH₄- und N₂O- Ausstoß von Benzin und Diesel (g * MJ⁻¹)

Treibstoff	effektiver CO ₂ - Emissionsfaktor (g * MJ ⁻¹)	CH ₄ -Ausstoß (g * MJ ⁻¹)	N ₂ O-Ausstoß (g * MJ ⁻¹)
Benzin	69,3	0,08	0,002
Diesel	74,1	0,00415	0,0286

Quelle: EGGLESTONE et al. (2006)

Tabelle 3-37: CO₂-, CH₄- und N₂O-Ausstoß der im Versuch eingesetzten Motoren (g * ha⁻¹)

Variante	Bezeichnung	Treibstoff	gemessener Verbrauch [l * ha ⁻¹]	Energie- bedarf [MJ * ha ⁻¹]	CO ₂ - Ausstoß (g * ha ⁻¹)	CH ₄ - Ausstoß (g * ha ⁻¹)	N ₂ O- Ausstoß (g * ha ⁻¹)
3	PC 165 M	Normal bleifrei	3,80	115,90	8.031,87	9,27	0,23
5	PC 165 M Zw	Normal bleifrei	4,25	129,63	8.983,36	10,37	0,26
6	PC 190 M	Normal bleifrei	3,49	106,45	7.376,99	8,52	0,21
7	PC 240 M	Normal bleifrei	2,84	86,62	6.002,77	6,93	0,17
8	S 240	Diesel	5,44	194,21	14.390,96	0,81	5,55
9	S 290	Diesel	8,74	312,02	23.120,68	1,29	8,92

Quelle: eigene Berechnung auf Basis von EGGLESTONE et al. (2006)

Tabelle 3-38: Gesamt-Methan (CH₄) und Gesamt-Stickstoff- (N) Ausstoß pro Hektar der Pferde für die untersuchten Varianten (g * ha⁻¹)

Variante	Bezeichnung	Flächenleistung (ha * h ⁻¹)	Arbeitszeit (h * ha ⁻¹)	CH ₄ -Ausstoß (g CH ₄ pro 2 Pferde und ha)	N-Ausstoß (g N pro 2 Pferde und ha)
1	GM 130 B	0,53	1,89	13,57	34,81
2	PC 165 B	0,69	1,45	10,41	26,71
3	PC 165 M	0,69	1,45	10,41	26,71
4	PC 165 B Zw	0,63	1,59	11,42	29,29
5	PC 165 M Zw	0,72	1,39	9,98	25,60
6	PC 190 M	0,78	1,28	9,19	23,58
7	PC 240 M	1,00	1,00	7,18	18,42

Quelle: eigene Berechnung auf Basis von EGGLESTONE et al. (2006)

Durch die Kombination der Werte für die Motoren und für die Pferde ergeben sich die Gesamt-Emissionen der untersuchten Varianten in Tabelle 3-39.

Tabelle 3-39: Gesamt-Emissionen der untersuchten Varianten (g * ha⁻¹)

Variante	Bezeichnung	Emissionen g * ha ⁻¹							
		CO	HC	NO _x	Partikel	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	N
1	GM 130 B	-	-	-	-	-	13,57	-	34,81
2	PC 165 B	-	-	-	-	-	10,41	-	26,71
3	PC 165 M	209,24	41,85	296,15	-	8.031,87	19,68	0,23	26,71
4	PC 165 B Zw	-	-	-	-	-	11,42	-	29,29
5	PC 165 M Zw	234,07	46,81	331,29	-	8.983,36	20,35	0,26	25,60
6	PC 190 M	192,21	38,44	272,04	-	7.376,99	17,71	0,21	23,58
7	PC 240 M	156,39	31,28	221,35	-	6.002,77	14,11	0,17	18,42
8	S 240	350,68	70,14	496,34	45,86	14.390,96	0,81	5,55	-
9	S 290	563,36	112,67	797,36	73,67	23.120,68	1,29	8,92	-

Quelle: eigene Berechnung auf Basis von EGGLESTONE et al. (2006) und ECOPOINT (2010)

Bei den Motor-Schadstoffen CO, HC und NO_x nimmt bei den Pferdevarianten mit motorgetriebener Zapfwelle die Menge mit zunehmender Arbeitsbreite ab. Variante 5 mit den montierten Zwillingrädern weist jeweils die höchsten Werte auf. Die Schleppervarianten weisen deutlich höhere Werte auf als die Pferdevarianten. Im Vergleich der Varianten 7 und 8 mit demselben Mähwerk erzeugt die Schleppervariante (V 8) Werte, die das 2,2-fache der Pferdevariante (V 7) betragen. Die Werte für die Schleppervariante mit dem Frontmähwerk (V 9) liegen noch einmal um das 1,6-fache höher als die Werte von Variante 8; dies gilt auch für die nur von Dieselmotoren gebildeten Partikel.

Auch bei den Werten für den CO₂-Ausstoß weisen die beiden Schleppervarianten deutlich höhere Werte auf als die Pferdevarianten. Variante 8 hat einen um das 2,4-fache höheren Wert als Variante 7, während der Wert für Variante 9 auch hier dem 1,6-fachen des Wertes von Variante 8 entspricht. Bei den Pferdevarianten nimmt wiederum der Emissionsausstoß mit zunehmender Arbeitsbreite ab, wobei Variante 5 die höchsten Werte aufweist.

Bei der Methanbildung (CH₄) schneiden die Schleppervarianten deutlich besser ab als die Pferdevarianten. Mit 0,81 g * ha⁻¹ (V 8) bzw. 1,29 g * ha⁻¹ (V 9) liegen sie um das 10- bis 25-fache unter den Werten der Pferdevarianten. Bei diesen weisen die Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle höhere Werte auf als die bodengetriebenen Varianten, der Wert nimmt mit zunehmender Arbeitsbreite ab, Variante 5 mit den Zwillingrädern hat mit 20,35 g * ha⁻¹ wiederum den höchsten Wert. Bei den bodengetriebenen Pferdevarianten schneidet der Grasmäher (V 1) mit 13,57 g * ha⁻¹ am schlechtesten ab, gefolgt von Variante 4 mit 11,42 g * ha⁻¹ und Variante 2 mit 10,41 g * ha⁻¹. Auch hier nimmt also mit zunehmender Arbeitsbreite der Schadstoffausstoß ab, die Montage der Zwillingräder führt zu einem erhöhten Wert.

3.2.1.7 Bodenbelastung (betretene bzw. befahrene Fläche)

a) Anzahl Schritte der Pferde

Tabelle 3-40 zeigt die Ergebnisse für die Anzahl der Schritte, die die beiden Pferde zusammen pro Parzelle absolviert haben. Die Variante hat nur im zweiten Versuchsjahr einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse. Der Vergleich der Varianten 3, 6 und 7 zeigt, dass die Arbeitsbreite nur bei dem 2,40 m breiten Mähwerk (V 7) einen Einfluss auf die Ergebnisse hat, der im zweiten Versuchsjahr sogar signifikant ist. Die beiden kleineren Mähwerke unterscheiden sich nicht.

Sowohl die Zwillingsräder (V 5), als auch der Bodenantrieb der Zapfwelle (V 2) führen zu einer höheren Anzahl Schritte. Die höchsten Werte erreicht folgerichtig Variante 4, die diese beiden Faktoren in Summe vereint (vgl. Abbildung 3-23).

Tabelle 3-40: Anzahl Schritte der Pferde je Parzelle (n)

LS Means; unterschiedliche Indices bezeichnen signifikante Unterschiede

		Versuchsjahr		
Variante	Bezeichnung	2000	2001	Gesamt
1	GM 130 B	3.716	-	3.568
2	PC 165 B	3.842	3.628 ^c	3.748
3	PC 165 M	-	3.409 ^a	3.561
4	PC 165 B Zw	4.060	-	3.908
5	PC 165 M Zw	3.828	-	3.675
6	PC 190 M	3.710	3.408 ^a	3.559
7	PC 240 M	3.849	3.478 ^b	3.663

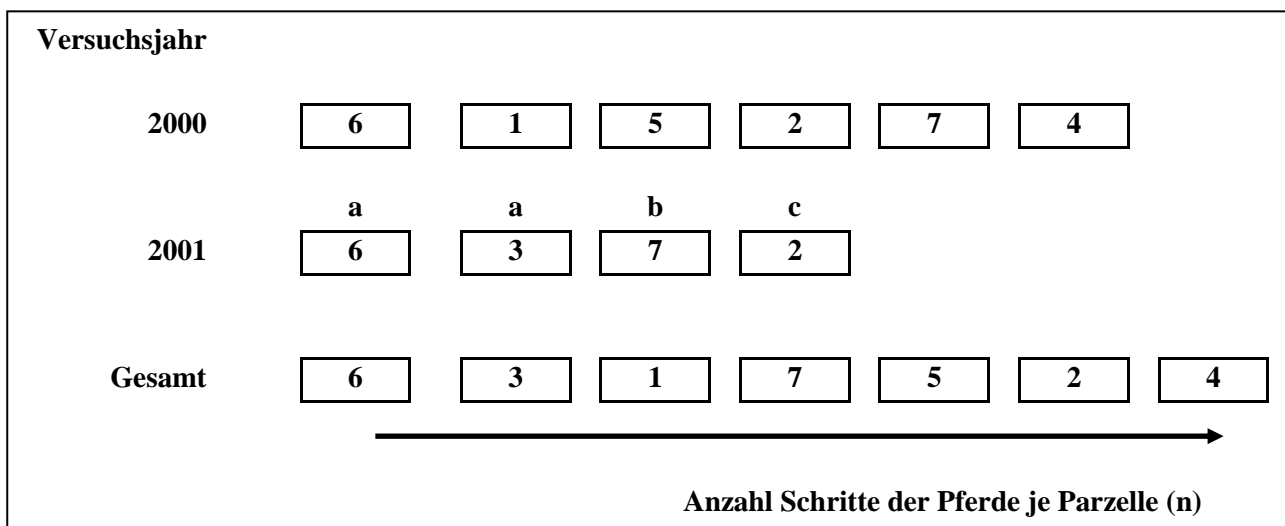


Abbildung 3-23: Anzahl Schritte der Pferde ja Parzelle (n), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede

b) Bodenbelastung insgesamt

Die Bodenbelastung insgesamt wird bei den Pferdevarianten bestimmt durch die Kombination aus der Anzahl der Schritte der Pferde mit der Fläche ihrer Hufe. Hinzu kommt die Fläche, die von den vier Reifen des Vorderwagens überrollt wird. Bei den Schleppervarianten ist die von den vier Reifen des Schleppers überrollte Fläche bestimmend für die Bodenbelastung. Tabelle 3-41 zeigt die Bereifung des Grasmähers, des Vorderwagens sowie des Schleppers sowie die daraus resultierenden Fahrspur-Breiten.

Die Hufflächen der Pferde im Detail zeigt

Tabelle A-9 im Anhang. Im Durchschnitt ergab sich pro Huf eine Fläche von 294,04 cm² in 2000 und 299,48 cm² in 2001. Für die Berechnung über beide Jahre hinweg wird der entsprechende Mittelwert 296,76 cm² verwendet. Tabelle 3-42 zeigt die Werte für die Bodenbelastung der untersuchten Varianten, Abbildung 3-24 die Variantenabfolge.

Tabelle 3-41: Bereifung und Breite der Fahrspur der eingesetzten Mähgeräte

	Grasmäher	Vorderwagen ohne Zwillingsräder	Vorderwagen mit Zwillingsrädern	Schlepper
Bezeichnung	Bautz GM 20	Pintow Power Cart	Pintow Power Cart	Fendt Farmer 309 C
Bereifung vorne	Eisenräder, Ø = 0,28 m	165 R 15	165 R 15	440/65 R 24
Spurbreite vorne	0,08 m	0,17 m	0,17 m	0,44 m
Bereifung hinten	Eisenräder, Ø = 0,82 m	6.00 - 16	6.00 - 16 + Zwillingsräder	540/65 R 34
Spurbreite hinten	0,11 m	0,16 m	0,22 m	0,54 m
Spurbreite gesamt (alle 4 Reifen)	0,38 m	0,64 m	0,76 m	1,96 m

Tabelle 3-42: Bodenbelastung (%-Anteil der betretenen und überrollten Fläche an der bearbeiteten Fläche)

LS Means; unterschiedliche Indices bezeichnen signifikante Unterschiede

Variante	Bezeichnung	Versuchsjahr		
		2000	2001	Gesamt
1	GM 130 B	41 ^b	-	41 ^b
2	PC 165 B	49 ^d	48 ^d	49 ^c
3	PC 165 M	-	48 ^c	48 ^c
4	PC 165 B Zw	57 ^f	-	56 ^d
5	PC 165 M Zw	56 ^e	-	56 ^d
6	PC 190 M	42 ^c	42 ^b	42 ^b
7	PC 240 M	33 ^a	33 ^a	33 ^a
8	S 240	85 ^h	82 ^e	82 ^f
9	S 290	68 ^g	-	67 ^e

Hinsichtlich der Bodenbelastung der untersuchten Varianten ergibt sich ein sehr einheitliches Bild zwischen den Versuchsjahren sowie über beide Versuchsjahre hinweg, die Unterschiede zwischen den untersuchten Varianten sind mit wenigen Ausnahmen signifikant. In allen Fällen weist die Pferdevariante mit dem 2,40 m Mähwerk (V 7) mit 33 % den geringsten Wert auf. Es folgen der Grasmäher mit 41 % und die Pferdevariante mit dem 1,90 m Mähwerk (V 6) mit 42 %. Die Pferdevarianten mit dem 1,65 m Mähwerk ohne Zwillingsbereifung (V 3 und V 2) weisen Werte von 48 % und 49 % auf, gefolgt von den beiden Varianten mit demselben Mähwerk mit Zwillingsbereifung (V 5 und V 4) mit 56 % bzw. 57 %. In beiden Fällen hat die Variante mit Bodenantrieb der Zapfwelle (V 2 bzw. V 4) einen geringfügig höheren Wert als die Variante mit Motorantrieb (V 3 bzw. V 5).

Die beiden Schleppervarianten liegen mit 67 % und 68 % (V 9) bzw. 82 % und 85 % (V 8) deutlich über den Pferdevarianten und unterscheiden sich ebenfalls signifikant voneinander. Der Vergleich von V 8 mit V 7 zeigt, dass die schleppergezogene Variante verglichen mit der pferdegezogenen Variante bei Verwendung desselben Mähwerks die 2,5-fache Bodenbelastung verursacht.

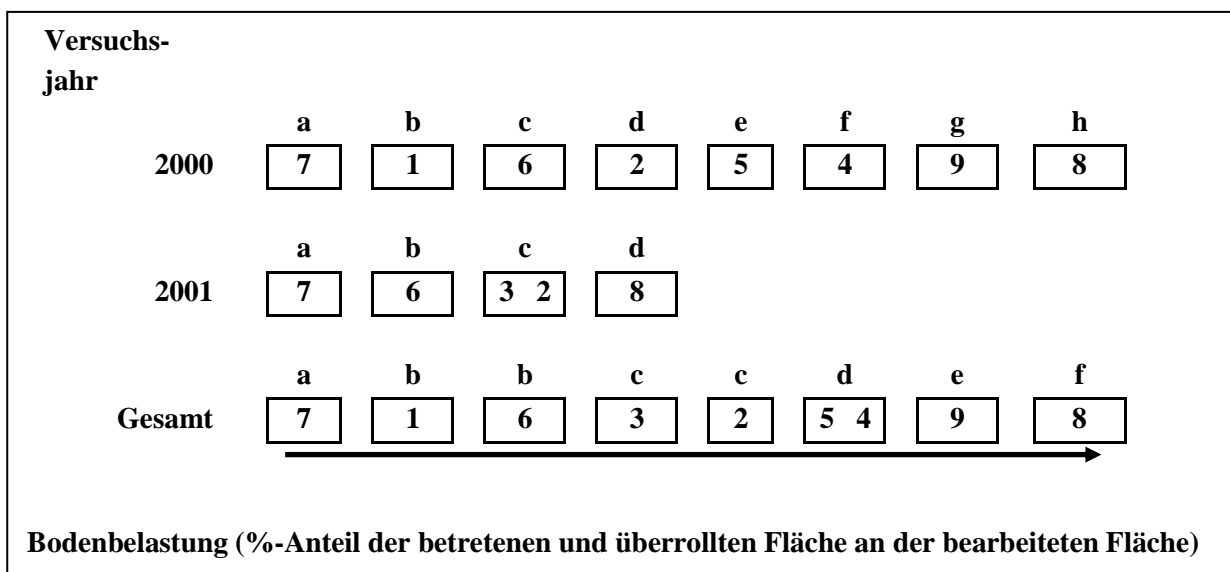


Abbildung 3-24: Bodenbelastung (%-Anteil der betretenen und überrollten Fläche an der bearbeiteten Fläche), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede

3.2.2 Physiologische Parameter der Pferde

3.2.2.1 Herzfrequenz

a) Ruhepuls

Der unmittelbar vor Beginn der Bearbeitung einer Parzelle gemessene Herzfrequenzwert gibt als Ruhepuls ein Maß für die Vorbelastung des Pferdes durch die bereits absolvierte Arbeit an. der Pferde Alphonse/Charlotte.

Tabelle 3-43 zeigt die Werte, bei denen sowohl innerhalb der beiden Versuchsjahre als auch über beide Versuchsjahre hinweg keine signifikanten Unterschiede festgestellt wurden. Dies gilt sowohl für den Vergleich zwischen den Pferden als auch für den Vergleich zwischen den Varianten.

Die Werte liegen alle zwischen 45 min^{-1} und 60 min^{-1} . Das Gros der Werte liegt dabei mit wenigen Ausnahmen im Bereich von 51 min^{-1} bis 58 min^{-1} . Tendenziell sind die Werte bei den Pferden Piroux/Dragonne etwas niedriger als die der Pferde Alphonse/Charlotte.

Tabelle 3-43: Ruhepuls (min^{-1})

LS Means; Pferde: A = Alphonse, Ch = Charlotte, P = Piroux, D = Dragonne

Variante	Bezeichnung	2000 A/Ch	2000 P/D	2001 A	2001 P	Gesamt A/Ch	Gesamt P/D
1	GM 130 B	60	49	-	-	59	51
2	PC 165 B	54	54	53	54	54	53
3	PC 165 M	-	-	53	51	54	49
4	PC 165 B Zw	57	58	-	-	56	60
5	PC 165 M Zw	53	48	-	-	52	51
6	PC 190 M	54	45	52	54	53	49
7	PC 240 M	54	47	49	52	51	49

b) Mittlere Herzfrequenz

Die Werte für die mittlere Herzfrequenz zeichnen ein recht einheitliches Bild. Die Unterschiede zwischen den Pferden Alphonse und Charlotte sowie zwischen den Pferden Piroux und Dragonne waren auch hier jeweils nicht signifikant, daher konnten Alphonse und Charlotte einerseits sowie Piroux und Dragonne andererseits jeweils zu einem Pferd zusammengefasst werden (s. Tabelle 3-44 und Abbildung 3-25).

Tabelle 3-44: Mittlere Herzfrequenz (min^{-1})

*LS Means; unterschiedliche Indices bezeichnen signifikante Unterschiede
Pferde: A = Alphonse, Ch = Charlotte, P = Piroux, D = Dragonne*

Variante	Bezeichnung	2000 A/Ch	2000 P/D	2001 A	2001 P	Gesamt A/Ch	Gesamt P/D
1	GM 130 B	98	100	-	-	93 ^a	92
2	PC 165 B	127	129	116 ^b	105 ^b	121 ^b	116
3	PC 165 M	-	-	93 ^a	89 ^a	98 ^a	96
4	PC 165 B Zw	134	128	-	-	128 ^b	120
5	PC 165 M Zw	108	105	-	-	103 ^a	97
6	PC 190 M	101	99	92 ^a	88 ^a	96 ^a	94
7	PC 240 M	106	104	95 ^a	91 ^a	101 ^a	97

In allen Fällen verursachen die Varianten mit der bodengetriebenen Zapfwelle (V 2 und V 4) die höchsten Werte, die mit 116 min^{-1} bis 134 min^{-1} deutlich über denen der Varianten mit der motorgetriebenen Zapfwelle (V3, V 5 - V 7) sowie dem Grasmäher (V 1) mit 92 min^{-1} bis 108 min^{-1} liegen. Diese Unterschiede sind im zweiten Versuchsjahr für beide Pferde sowie bei der Auswertung über beide Versuchsjahre für die Pferde Alphonse und Charlotte signifikant.

Die Varianten mit der motorgetriebenen Zapfwelle (V3, V 5 - V 7) und der Grasmäher (V 1) unterscheiden sich nur geringfügig voneinander. Die geringsten Werte weisen der Grasmäher (V 1) mit Werten von 92 min^{-1} bis 100 min^{-1} und das 1,90 m-Mähwerk (V 6) mit Werten von 88 min^{-1} bis 101 min^{-1} auf. Nahezu identische Werte wie V 6 weist das 1,65 m-Mähwerk (V 3) mit Werten von 89 min^{-1} bis 98 min^{-1} auf, gefolgt vom 2,40 m-Mähwerk (V 7) mit Werten von 91 min^{-1} bis 106 min^{-1} und schließlich dem 1,65 m-Mähwerk mit Zwillingrädern (V 5) mit Werten von 97 min^{-1} bis 108 min^{-1} .

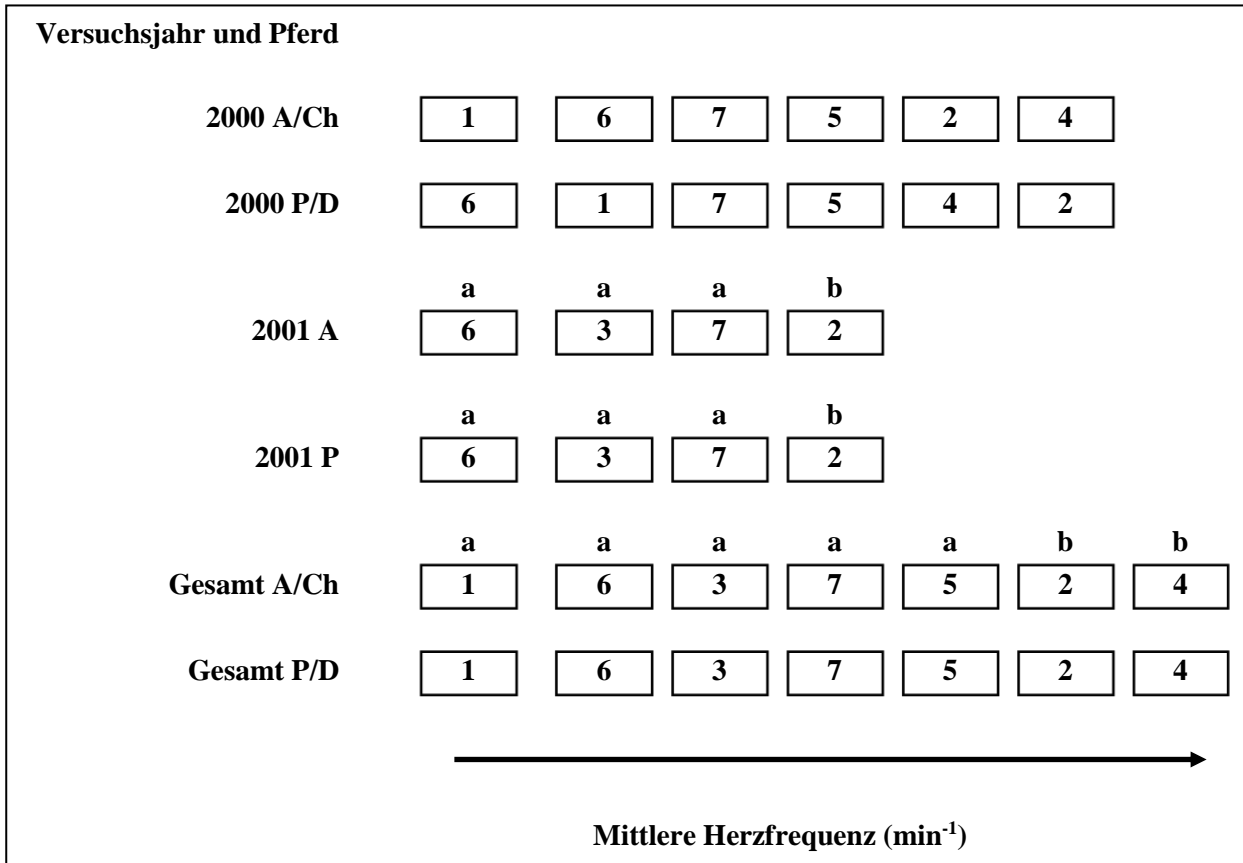


Abbildung 3-25: Mittlere Herzfrequenz (min^{-1}), Variantenabfolge (niedrigster \rightarrow höchster Wert)

unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede

Pferde: A = Alphonse, Ch = Charlotte, P = Piroux, D = Dragonne

c) Maximale Herzfrequenz

Die Werte für die maximale Herzfrequenz ergeben ein weniger einheitliches Bild als die mittleren Herzfrequenzen. Es bestehen deutlichere Unterschiede zwischen den Pferden, wobei die Pferde Alphonse und Charlotte sowie Piroux und Dragonne auch bei diesem Parameter jeweils zu einem Pferd zusammengefasst werden konnten (vgl. Tabelle 3-45 und Abbildung 3-26). Die geringsten Werte mit 100 min^{-1} bis 134 min^{-1} zeigt bei allen Pferden Variante 6. Beim Pferd Alphonse/Charlotte folgen die Varianten 7 und 5 mit Werten von 110 min^{-1} bis 148 min^{-1} , gefolgt von den Varianten 1 und 3 mit Werten von 112 min^{-1} bis 149 min^{-1} . Beim Pferd Piroux/Dragonne sind die Verhältnisse umgedreht, hier liegen die Varianten 1 und 3 mit Werten von 100 min^{-1} bis 135 min^{-1} vor den Varianten 5 und 7 mit Werten von 102 min^{-1} bis 138 min^{-1} .

Die Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle weisen mit 118 min⁻¹ bis 190 min⁻¹ (V 2) bzw. 143 min⁻¹ bis 183 min⁻¹ (V 4) die höchsten Werte auf. Im zweiten Versuchsjahr ist dieser Unterschied zwischen Variante 2 und den übrigen Varianten signifikant.

Tabelle 3-45: Maximale Herzfrequenz (min⁻¹)

*LS Means; unterschiedliche Indices bezeichnen signifikante Unterschiede
Pferde: A = Alphonse, Ch = Charlotte, P = Piroux, D = Dragonne*

Variante	Bezeichnung	2000 A/Ch	2000 P/D	2001 A	2001 P	Gesamt A/Ch	Gesamt P/D
1	GM 130 B	149	135	-	-	130	118
2	PC 165 B	190	160	135 ^b	118 ^b	161	138
3	PC 165 M	-	-	112 ^a	100 ^a	131	117
4	PC 165 B Zw	183	160	-	-	164	143
5	PC 165 M Zw	148	138	-	-	129	122
6	PC 190 M	134	127	110 ^a	100 ^a	122	114
7	PC 240 M	145	137	110 ^a	102 ^a	128	120

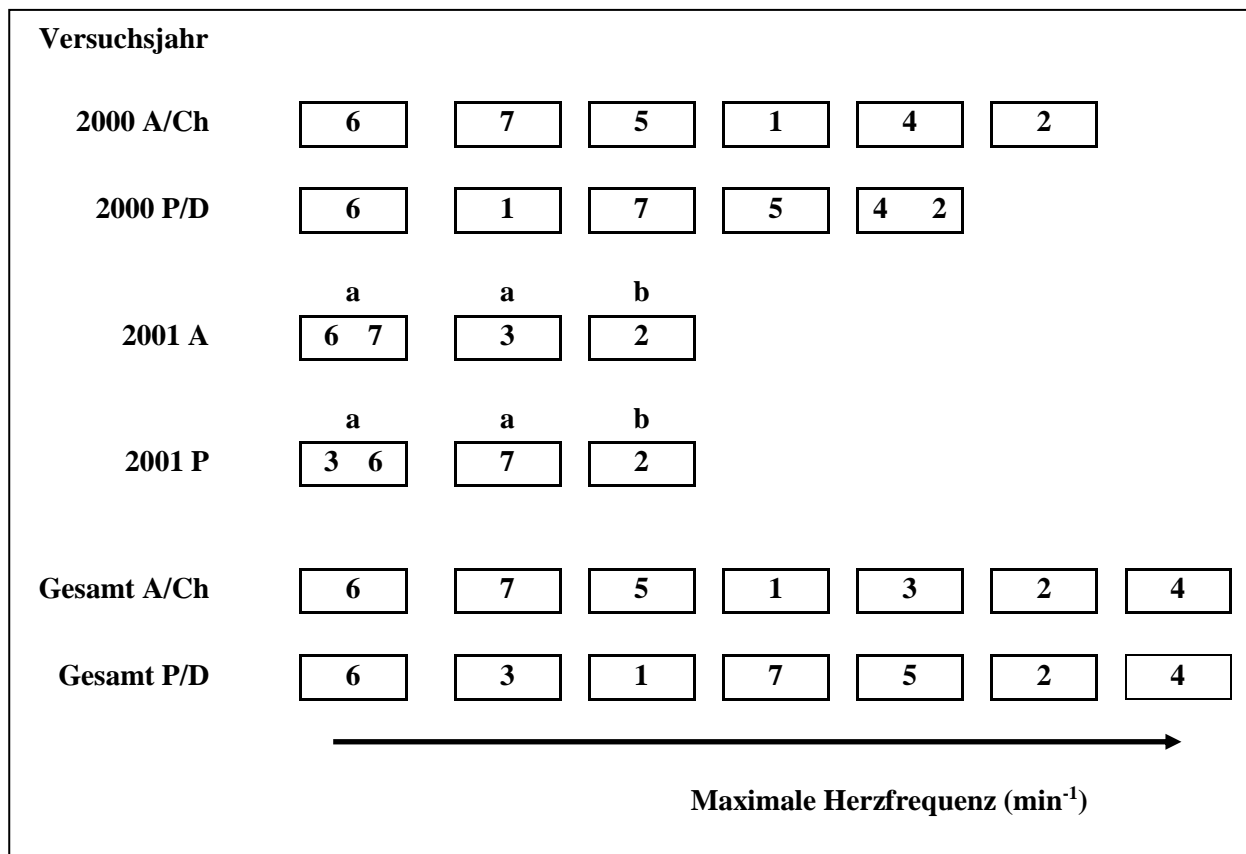


Abbildung 3-26: Maximale Herzfrequenz (min⁻¹), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

*unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede
Pferde: A = Alphonse, Ch = Charlotte, P = Piroux, D = Dragonne*

3.2.2.2 Atemfrequenz

Die Werte für die Veränderung der Atemfrequenz geben die Differenz zwischen der Atemfrequenz nach Beendigung der Parzelle und der Atemfrequenz vor Beginn der Parzelle an. Die Varianten mit der bodengetriebenen Zapfwelle weisen mit Werten von + 22 min⁻¹ bis + 73 min⁻¹ (V 2) und + 49 min⁻¹ bis + 70 min⁻¹ (V 4) die höchsten Werte auf, die sich im ersten Versuchsjahr bei beiden Pferden signifikant von den übrigen Varianten unterscheiden (s. Tabelle 3-46).

Tabelle 3-46: Veränderung der Atemfrequenz (min⁻¹)

LS Means; unterschiedliche Indices bezeichnen signifikante Unterschiede

Pferde: A = Alphonse, Ch = Charlotte, P = Piroux, D = Dragonne

Variante	Bezeichnung	2000	2000	2001	2001	Gesamt	Gesamt
		A/Ch	P/D	A	P	A/Ch	P/D
1	GM 130 B	25 ^a	26 ^a	-	-	8 ^a	15
2	PC 165 B	73 ^b	51 ^b	45 ^b	22	59 ^c	36
3	PC 165 M	-	-	11 ^a	3	28 ^b	13
4	PC 165 B Zw	70 ^b	59 ^b	-	-	53 ^c	49
5	PC 165 M Zw	39 ^a	27 ^a	-	-	22 ^{ab}	16
6	PC 190 M	42 ^a	21 ^a	3 ^a	0	23 ^{ab}	10
7	PC 240 M	46 ^a	18 ^a	10 ^a	5	28 ^b	12

Im zweiten Versuchsjahr sowie bei der Auswertung über beide Versuchsjahre ist dieser Unterschied beim Pferd Alphonse/Charlotte signifikant, beim Pferd Piroux/Dragonne nicht signifikant, aber gleichsinnig. Für die übrigen Varianten ergibt sich ein sehr uneinheitliches Bild, das keine für beide Pferde gültige Reihung über die einzelnen Versuchsjahre sowie die Auswertung über beide Jahre hinweg zulässt (vgl. Abbildung 3-27).

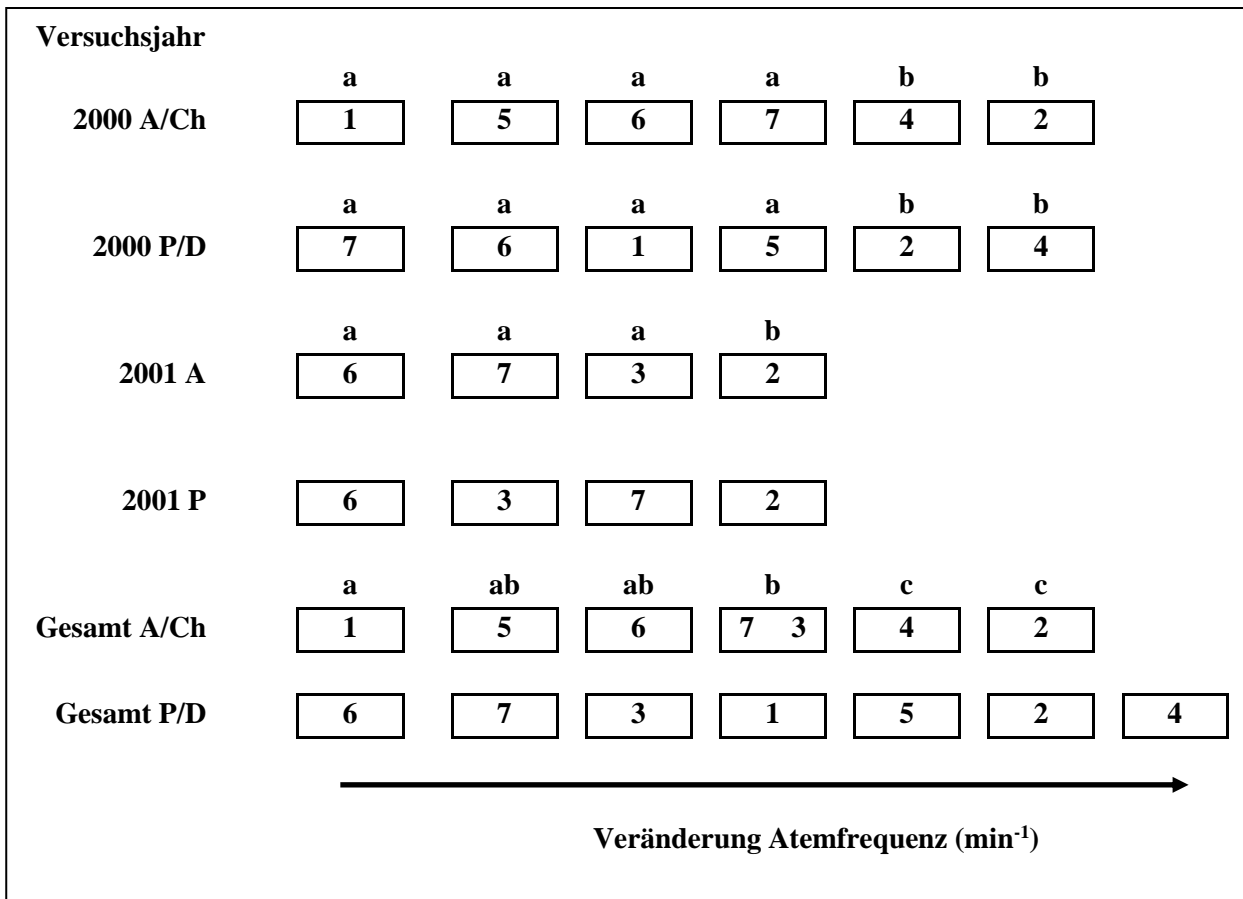


Abbildung 3-27: Veränderung der Atemfrequenz (min⁻¹), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede

Pferde: A = Alphonse, Ch = Charlotte, P = Piroux, D = Dragonne

3.2.2.3 Körpertemperatur

Die Werte für die Veränderung der Körpertemperatur geben die Differenz zwischen der Körpertemperatur nach Beendigung der Parzelle und der Körpertemperatur vor Beginn der Parzelle an. Durchgängig weisen die Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle (V 2 und V 4) die höchsten Werte auf, wobei Variante 4 mit den Zwillingenrädern noch einmal deutlich höhere Werte zeigt als Variante 2 (vgl. Tabelle 3-47). Beim Pferd Piroux im zweiten Versuchsjahr ist der Unterschied zwischen Variante 2 mit + 0,4 °C einerseits und Variante 3 bzw. Variante 6 und 7 (je + 0,1 °C) andererseits signifikant. Beim Pferd Alphonse hat Variante 2 mit + 0,3 °C ebenfalls einen deutlich höheren Wert als die übrigen Varianten mit + 0,1 °C, der Unterschied ist aber nicht signifikant.

Auch im ersten Versuchsjahr gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten, obwohl auch hier die Werte für Variante 4 (+ 1,0 °C bzw. + 0,7 °C) und Variante 2 (+ 0,6 °C bzw. + 0,4 °C) deutlich über den Werten für die übrigen Varianten (+/- 0,0 °C bis + 0,3 °C) liegen.

Bei der Gesamtauswertung über beide Versuchsjahre ist bei beiden Pferden der Unterschied zwischen Variante 4 mit + 1,0 °C bzw. + 0,7 °C und allen übrigen Varianten signifikant. Variante 2 hat zwar bei beiden Pferden mit + 0,4 °C den zweithöchsten Wert, unterscheidet sich beim Pferd Alphonse/Charlotte aber nicht signifikant

von den verbleibenden Varianten, während der Unterschied beim Pferd Piroux/Dragonne nur zu Variante 5 nicht signifikant, zu den übrigen Varianten aber signifikant ist.

Variante 5 weist mit Werten von + 0,2 °C bis + 0,3 °C stets den höchsten Wert der Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle auf, der Unterschied ist aber in keinem Fall signifikant. Für die verbleibenden Varianten 1 (+/- 0,0 °C bis + 0,2 °C), 3 (+ 0,1 °C bis + 0,2 °C), 6 (+ 0,1 °C) und 7 (+ 0,1 °C bis + 0,2 °C) lässt sich kein einheitliches Bild bzgl. der Variantenabfolge über alle Auswertungen zeichnen (vgl. Abbildung 3-28).

Tabelle 3-47: Veränderung der Körpertemperatur (°C)

LS Means; unterschiedliche Indices bezeichnen signifikante Unterschiede

Pferde: A = Alphonse, Ch = Charlotte, P = Piroux, D = Dragonne

Variante	Bezeichnung	2000	2000	2001	2001	Gesamt	Gesamt
		A/Ch	P/D	A	P	A/Ch	P/D
1	GM 130 B	0,2	0,0	-	-	0,2 ^a	0,0 ^a
2	PC 165 B	0,6	0,4	0,3	0,4 ^b	0,4 ^a	0,4 ^b
3	PC 165 M	-	-	0,1	0,1 ^a	0,2 ^a	0,1 ^a
4	PC 165 B Zw	1,0	0,7	-	-	1,0 ^b	0,7 ^c
5	PC 165 M Zw	0,3	0,2	-	-	0,3 ^a	0,2 ^{ab}
6	PC 190 M	0,1	0,1	0,1	0,1 ^a	0,1 ^a	0,1 ^a
7	PC 240 M	0,2	0,2	0,1	0,1 ^a	0,1 ^a	0,2 ^a

Versuchsjahr							
2000 A/Ch	6	7	1	5	2	4	
2000 P/D	1	6	7	5	2	4	
2001 A	7	3	6	2			
2001 P	a 3	a 6 7	b 2				
Gesamt A/Ch	a 6	a 7	a 3	a 1	a 5	a 2	b 4
Gesamt P/D	a 1	a 6	a 3	a 7	ab 5	b 2	c 4



 Veränderung Körpertemperatur (°C)

Abbildung 3-28: Veränderung der Körpertemperatur (°C), Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede

Pferde: A = Alphonse, Ch = Charlotte, P = Piroux, D = Dragonne

3.2.2.4 Schwitzen

Bei der Veränderung des Schwitzens der Pferde gibt es nur beim Pferd Piroux im zweiten Versuchsjahr einen signifikanten Unterschied zwischen der Variante 2 mit 7 Punkten einerseits und den Varianten 3 (3 Punkte) sowie 6 und 7 (je 4 Punkte) andererseits. Bei allen anderen Auswertungen sind keine signifikanten Unterschiede festzustellen (s. Tabelle 3-48).

Allgemein zeichnen sich die beiden Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle (V 2 und V 4) durch erhöhte Werte verglichen mit den Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle aus. Auffällig ist allerdings der mit 6 (2000) bzw. 5 Punkten (beide Jahre) für das Pferd Piroux/Dragonne relativ geringe Wert der Variante 4 mit bodengetriebener Zapfwelle und montierten Zwillingrädern. Für die übrigen Varianten lassen sich keine über alle Auswertungen gültigen Aussagen treffen (vgl. Abbildung 3-29).

Tabelle 3-48: Veränderung Schwitzen

*LS Means; unterschiedliche Indices bezeichnen signifikante Unterschied
Pferde: A = Alphonse, Ch = Charlotte, P = Piroux, D = Dragonne*

Variante	Bezeichnung	2000 A/Ch	2000 P/D	2001 A	2001 P	Gesamt A/Ch	Gesamt P/D
1	GM 130 B	5	4	-	-	4	3
2	PC 165 B	6	10	5	7 ^b	5	8
3	PC 165 M	-	-	3	3 ^a	4	4
4	PC 165 B Zw	8	6	-	-	7	5
5	PC 165 M Zw	5	7	-	-	4	6
6	PC 190 M	4	6	2	4 ^a	3	5
7	PC 240 M	4	7	2	4 ^a	3	6

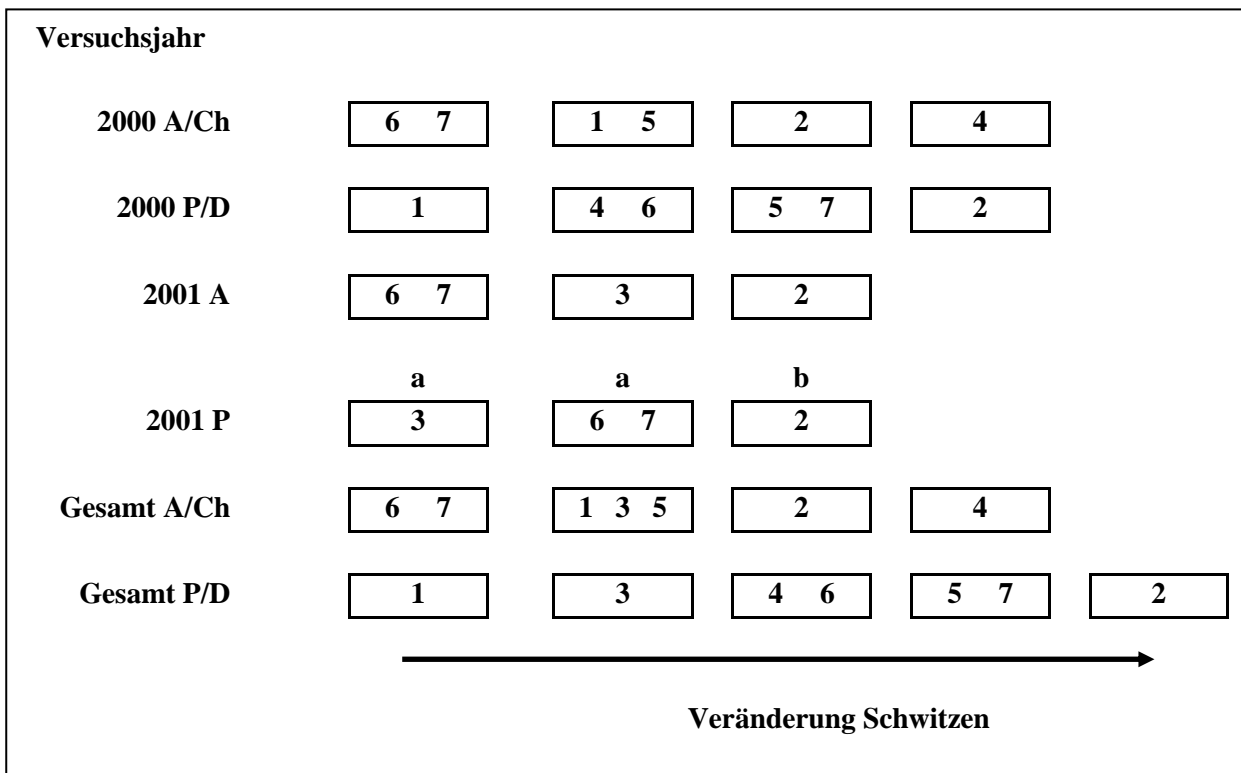


Abbildung 3-29: Veränderung Schwitzen, Variantenabfolge (niedrigster → höchster Wert)

*unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede
Pferde: A = Alphonse, Ch = Charlotte, P = Piroux, D = Dragonne*

3.3. Diskussion

Wenn die statistische Auswertung auch keine signifikanten topographischen Unterschiede zwischen den beiden Versuchsflächen des Parzellenversuchs ergibt, wäre für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse die Durchführung auf derselben Fläche in beiden Jahren wünschenswert gewesen. Eine geringere Anzahl untersuchter Varianten und damit eine geringere Zahl an notwendigen Parzellen hätte es zudem leichter gemacht, die ebenfalls statistisch nicht signifikanten topographischen Unterschiede innerhalb der Versuchsflächen zu vermeiden.

Die im Parzellenversuch erhobene Anzahl Parameter war deutlich zu groß. Der Arbeitsaufwand bei der praktischen Versuchsdurchführung war enorm hoch und personalintensiv, ebenso erschwerte die enorme Datenmenge den Fortgang der Auswertung.

Das Mähen mit dem Grasmäher war trotz seines technisch einwandfreien Zustandes aufgrund der Aufwuchsmenge nicht zu schaffen, andauerndes Verstopfen des Messerbalkens die Folge, und schließlich musste diese Variante abgebrochen werden, da die ständigen Unterbrechungen die Pferde sehr aufregten. Hier hätte die Eignung der Variante in Vorversuchen getestet werden sollen. Generell wäre die Konzentration auf weniger Varianten hilfreich gewesen, etwa auf die im zweiten Versuchsjahr durchgeführten.

Letztlich sind diese Fehler der Tatsache geschuldet, dass es keine aktuellen Arbeiten gab, auf denen aufgebaut werden konnte und keine aktuellen Erfahrungen hinsichtlich der Aufwändigkeit solcher Untersuchungen vorlagen. Denn die vorliegende Arbeit war zum Zeitpunkt der Entstehung Ende der 1990er Jahre ein Wiedereinstieg in die wissenschaftliche Untersuchung des Einsatzes von Arbeitspferden in der Landwirtschaft. Die existierenden Arbeiten aus den 1940er und 1950er Jahren und früher boten hierfür nur wenig Anhaltspunkte, da sie z.B. keine genauen Versuchsbeschreibungen enthalten. Auch die existierenden Arbeiten aus so genannten Entwicklungsländern waren nur bedingt hilfreich, da die Verhältnisse in diesen Ländern doch sehr verschieden von den hiesigen sind.

Trotz dieser Schwachpunkte liegen nun wissenschaftliche Ergebnisse zum Einsatz moderner pferdegezogener Technik in der Landwirtschaft vor, die Anhaltspunkte für weitere Untersuchungen auf diesem Feld liefern und die Notwendigkeit solcher Forschung belegen.

3.3.1 Zugkraftbedarf

Für den Einsatz eines pferdegezogenen Gerätes ist der Zugkraftbedarf die entscheidende Größe, da er über Art und Anzahl der notwendigen Pferde entscheidet. Anders ausgedrückt: Für den Landwirt ist der Zugkraftbedarf das entscheidende Kriterium, ob er ein bestimmtes Gerät mit den ihm zur Verfügung stehenden Pferden einsetzen kann.

Die verwendete Messtechnik zur Ermittlung des Zugkraftbedarfs des Grasmähers führt durch die Messfrequenz von 0,33 Hz im Gegensatz zu 1 Hz der am Vorderwagen verwendeten Technik zu einer nur begrenzten Vergleichbarkeit der Ergebnisse beider Systeme. Da der Zugkraftbedarf mit einer sehr hohen Frequenz variiert, wäre sowohl beim Vorderwagen als auch beim Grasmäher eine Messtechnik mit höherer Frequenz generell besser geeignet gewesen, um die „wahren“ Maximalwerte zu erfassen. Zum Vergleich: FANAC (1997) erreichte bei seinen Messungen zur Wirkung des von ihm entwickelten Zugdämpfungssystems *ZEP* eine Frequenz von 275 Hz und bezeichnet diese als „absolut notwendig, um den dynamischen Lastwechsel ... zu ermitteln.“ (ebd., S. 18). Eine solche Technik stand aber nicht zur Verfügung.

3.3.1.1 Durchschnittlicher Zugkraftbedarf

Der direkte Vergleich der Varianten 2, 6 und 7 in den Versuchsjahren 2000 und 2001 zeigt, dass die Werte für den durchschnittlichen Zugkraftbedarf im Jahr 2000 um ca. 20 % bis 25 % über den Werten von 2001 liegen. Ein Grund dafür dürften die topographischen Verhältnisse sein, denn alle drei Varianten weisen in 2000 eine um 3 % bis 4 % stärkere Steigung auf (vgl. Tabelle 3-5). Betrachtet man die Formel zur Berechnung des Zugkraftbedarfs ($Z = G * (r * \cos \alpha + \sin \alpha)$, mit Z = Zugkraftbedarf, G = Gewicht des Fahrzeugs, r = Reibungswiderstand und α = Steigungswinkel = \arctan Steigung s in %; WITHELM 1991), so wird deutlich, dass der Zugkraftbedarf mit der Steigung zunimmt, da $\sin \alpha$ größer wird.

Ein weiterer Grund für die höheren Zugkraftwerte dürfte im Aufwuchs zu suchen sein. Der Ertrag sowie der Grad der Lagerung der Vegetation im vorliegenden Versuch waren in 2000 höher, der Trockensubstanzgehalt geringer (vgl. Tabelle 3-8). HARRIGAN et al. (2002) konnten in Versuchen mit pferdegezogenen Grasmähern zeigen, dass ca. 47 % des Zugkraftbedarfs durch die Vegetation bedingt sind, während 30 % dem Rollwiderstand und 23 % der Mechanik des Mähers geschuldet sind. Wenn der Zustand der Vegetation für nahezu den halben Zugkraftbedarf verantwortlich ist, müssen die Zugkraftwerte im zweiten Versuchsjahr also deutlich geringer sein.

Für den Pintow Power Cart stellen die vorliegenden Ergebnisse die ersten in wissenschaftlichen Versuchen gewonnenen dar. Der Vergleich dieser Varianten (V 2 bis V 7) untereinander zeigt dabei drei wesentliche Gesetzmäßigkeiten auf:

1. bei gleichem Antrieb der Zapfwelle steigt der Zugkraftbedarf mit zunehmender Arbeitsbreite des Mähwerks,
2. der Bodenantrieb der Zapfwelle führt zu einem deutlich höheren Zugkraftbedarf verglichen mit demselben Mähwerk mit motorgetriebener Zapfwelle,
3. die Montage der Zwillingsreifen führt zu einem deutlich erhöhten Zugkraftbedarf

Die Zunahme des Zugkraftbedarfs bei steigender Arbeitsbreite für die Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle beträgt im Vergleich der Varianten 6 und 7 für die um 0,50 m größere Arbeitsbreite in allen drei Durchgängen (2000, 2001 und Gesamt) ca. 12 %. Im Vergleich der Varianten 3 und 6 (im Jahr 2001) beträgt die Zunahme des Zugkraftbedarfs für die um 0,25 m größere Arbeitsbreite ca. 7 % (vgl. Tabelle 3-15). Pro 0,10 m Arbeitsbreite beträgt die Zunahme also 2,4 % (V 6 zu V 7) bzw. 2,8 % (V 3 zu V 6). Pauschalierend kann für die Praxis hieraus die Faustregel abgeleitet werden, dass bei der betrachteten Mähtechnik der Zugkraftbedarf pro zusätzliche 0,10 m Arbeitsbreite um ca. 3 % steigt.

Dieser Wert lässt sich jedoch nicht auf andere Mähtechnik übertragen. Denn vergleicht man Variante 1 mit Variante 3, so beträgt die Zunahme des Zugkraftbedarfs für die um 0,35 m größere Arbeitsbreite in 2000 ca. 85 % und in der Auswertung über beide Jahre ca. 88 %. Umgerechnet ergibt sich je 0,10 m zusätzlicher Arbeitsbreite somit ein um ca. 25 % höherer Zugkraftbedarf.

Die Varianten mit Bodenantrieb der Zapfwelle (V 2 und V 4) erfordern eine deutlich höhere Zugkraft, als die Varianten mit gleicher Arbeitsbreite und Ausstattung, bei denen der Antrieb der Zapfwelle über den Aufbaumotor erfolgt (V 3 bzw. V 5). Bei allen vier Vergleichen (V 2 zu V 3 in 2001 und Gesamt, sowie V 4 zu V 5 in 2000 und Gesamt) beträgt diese Zunahme zwischen 90 % und 114 % des Zugkraftbedarfes mit Motorantrieb. Das heißt, bei derselben Arbeitsbreite hat die Variante mit Bodenantrieb des Mähwerks etwa den doppelten durchschnittlichen Zugkraftbedarf wie die Variante mit Motorantrieb der Zapfwelle. In beiden Ver-

suchsjahren wie auch in der Auswertung über beide Jahre hinweg unterscheiden sich die Varianten mit Bodenantrieb der Zapfwelle (V 2 und V 4) signifikant von allen anderen Varianten, sind untereinander aber nicht signifikant verschieden.

Das Anbringen der Zwillingsreifen führt zu einem erheblichen Anstieg des durchschnittlichen Zugkraftbedarfs. Vergleicht man Variante 2 und 4 miteinander, so beträgt dieser Anstieg 214 N (= 8,1 %) im Jahr 2000 bzw. 329 N (= 14,0 %) bei der Auswertung über beide Versuchsjahre hinweg. Beim Vergleich der Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle (V 3 zu V 5) sind es bei der Auswertung über beide Versuchsjahre 181 N (= 15,7 %). Hier lässt sich offensichtlich keine allgemein gültige Regel für die Höhe der Zunahme des Zugkraftbedarfs durch die Zwillingsreifen ableiten.

Variante 5 mit der kleinsten Arbeitsbreite der Doppelmesser-Varianten hat durch die Montage der Zwillingsreifen einen höheren Zugkraftbedarf als die Varianten 6 und 7 mit den größeren Arbeitsbreiten. In diesem Fall ist die Zunahme des Zugkraftbedarfs durch die Zwillingsräder also größer als die Zunahme des Zugkraftbedarfs durch die zunehmende Arbeitsbreite.

Die Einschätzung der gemessenen durchschnittlichen Zugkraftwerte durch den Vergleich mit Literaturwerten ist nur für den Grasmäher möglich, da es für den Vorderwagen keine Vergleichswerte gibt. Hierbei besteht die Schwierigkeit, dass in der älteren Literatur oft nur sehr unvollständige Angaben gemacht werden. Oft wird nicht einmal die Arbeitsbreite des untersuchten Grasmähers angegeben, ganz zu schweigen von Angaben über die äußeren Bedingungen des Versuchs. Auch die Technik, mit der die Werte gemessen wurden, ist eine völlig andere, was sich auf die Genauigkeit der Ergebnisse auswirken dürfte. Zudem hat schon KRÜGER (1947) darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse von Untersuchungen landwirtschaftlicher Feldarbeiten von derart vielen Faktoren abhängig sind, dass eine völlige Vergleichbarkeit der Ergebnisse kaum möglich ist. Daher können Angaben aus der Literatur zum Zugkraftbedarf nur als Anhalt zur Einschätzung der eigenen Ergebnisse gewertet werden.

RUSSEL (1925, zitiert in TÄNZER 1928) gibt für eine Mähmaschine mit einer Arbeitsbreite von 4' 6'' (= 1,37 m) einen durchschnittlichen Zugkraftbedarf von 1.495 N an (Anm.; alle in diesem Absatz genannten Werte in N wurden aus den in den zitierten Quellen in kg angegebenen Werten umgerechnet). Umgerechnet auf 1,30 m Arbeitsbreite sind dies 1.419 N, ein Wert, der nahezu identisch ist mit dem eigenen Ergebnis von 1.422 N im Jahr 2000. Auch die Ergebnisse von TEICHMANN (1928) passen gut zu den in der vorliegenden Arbeit ermittelten. Er gibt für nicht näher spezifizierte Grasmäher Werte zwischen 1.275 N und etwa 1.940 N mit einem Mittelwert über 5 Versuche von 1.722 N an. COLLINS & CAINE (1926) geben für einen 5' (= 1,52 m) Grasmäher Zugkraftbedarfswerte von 812 N bzw. 890 N an. Umgerechnet auf 1,30 m Arbeitsbreite sind dies 694 N bzw. 761 N, also deutlich geringere Werte. In ANONYMUS (1929, S. 210) findet sich eine Tabelle „nach Geheimrat Fischer“, in der für einen Grasmäher mit 1,32 m Arbeitsbreite ein mittlerer Zugkraftbedarf von 1.138 N angegeben wird. Im begleitenden Text wird von einer Zugkraft von 687 N bis 883 N gesprochen. BRUNNER (1942) gibt für einen Grasmäher mit 1,25 m Arbeitsbreite einen Zugkraftbedarf von 981 N - 1.668 N an. In einer der umfangreichsten Untersuchungen ihrer Art gibt KRÜGER (1947) für einen Grasmäher mit 1,30 m Arbeitsbreite einen durchschnittlichen Zugkraftbedarf von 814 N an. PETZOLD (1952) nennt für einen nicht näher spezifizierten Grasmäher auf trockenem Boden und gutem Grasbestand einen durchschnittlichen Zugkraftbedarf von 1.766 N, der gleiche Wert wurde auch von BERNDT (1968) ermittelt. FISCHER (1952) nennt bei gutem Grasbestand in der Ebene für einen ebenfalls nicht näher beschriebenen Grasmäher einen durchschnittlichen Zugkraftbedarf von 1.177 N. Dieser Wert korrespondiert mit SASIMOWSKI (1987), der für einen Grasmäher mit 18 Klingen (= 1,37 m) Werte von 1.187 N in Klee und 1.315 N in Gras angibt.

Tendenziell sind diese Literaturwerte geringer als die Ergebnisse im vorliegenden Versuch. Da die Erträge im Grünland in den letzten Jahrzehnten deutlich zugenommen haben, ist diese Tendenz erklärbar und das eigene

Ergebnis erscheint durchaus plausibel. Diese Annahme wird durch eine Untersuchung aus neuerer Zeit unterstützt. HARRIGAN et al. (2002) haben in den USA Mähversuche mit einem McCormick-Deering # 7-Grasmäher mit zwei unterschiedlichen Mähbalken, einem 5' (= 152,40 cm) und einem 6' (= 182,88 cm) langen Mähbalken, durchgeführt. Der Trockenmasse-Ertrag des Luzerne-Grasgemischs betrug ca. 61,8 dt/ha im ersten Schnitt. Der gemessene durchschnittliche Zugkraftbedarf für das 6' Mähwerk, mit dem dieser Schnitt durchgeführt wurde, betrug umgerechnet 1.682 N. Umgerechnet auf den im vorliegenden Versuch eingesetzten Mäher mit 1,30 m Arbeitsbreite wären dies etwa 1.202 N. Dieser Wert liegt um ca. 15 % unter dem im vorliegenden Versuch im Jahr 2000 gemessenen Wert von 1.422 N, bei etwa vergleichbaren Ertragsverhältnissen.

Allgemein gilt, dass ein Pferd in guter Kondition etwa 10 - 15 % der eigenen Körpermasse als Dauerzugkraft über den gesamten Arbeitstag schadlos erbringen kann, vorausgesetzt, dass notwendige Pausen eingehalten werden (z.B. COLLINS & CAINE 1926, RIJN 1929, GOE 1983, SASIMOWSKI 1987, HOFFMANN 1992, INNS 1996). In einem Gespann von zwei Pferden ist nach HERRMANN (1991) mit einem Zugkraftverlust von ca. 7 % zu rechnen, nach DUSEK (1963) sowie SASIMOWSKI (1987) mit 8 %, nach KRÜGER (1957) gar mit 10 % - 20 %. Bei den im Versuch eingesetzten Pferden mit einer Körpermasse von durchschnittlich 850 kg je Pferd, zusammen also 1.700 kg, kann demnach von einer möglichen Dauerzugleistung von etwa 158 kg bis 237 kg bzw. 1.551 N bis 2.326 N ausgegangen werden.

Die Ergebnisse des vorliegenden Versuchs zeigen, dass der Grasmäher (V 1) sowie die Vorderwagen-Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle (V 3 und V 5-7) mit Werten von 983 N bis 1.500 N unterhalb dieses Bereiches liegen. Die Belastung der Pferde ist bei diesen Varianten also als gering bis mittel anzusprechen. Die Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle (V 2 und V 4) hingegen liegen mit Ausnahme von V 2 im zweiten Versuchsjahr (2.111 N) mit Werten von 2.355 N bis 2.848 N sämtlich über diesem Bereich. Daraus muss gefolgert werden, dass die Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle für einen dauerhaften Betrieb mit zwei Pferden zu schwerzünftig sind. Hier wäre ein drittes gleichschweres Pferd notwendig; für diesen Dreispänner mit zusammen dann 2.550 kg Körpergewicht gälte unter Einrechnung von 15 % Gespannverlust (HERRMANN 1991) ein Dauerzugkraftbereich von 2.129 N bis 3.188 N. Damit wären die bodengetriebenen Vorderwagen-Varianten tierschutzgerecht zu nutzen.

3.3.1.2 Relativer Zugkraftbedarf

Bei der Nutzung von Zugtieren spielt die Effektivität des eingesetzten Gerätes eine größere Rolle, als dies beim Einsatz von Schleppern der Fall ist. Denn beim Zugtier kann die Leistung nur kurzfristig und nur bis zu einer bestimmten Grenze erhöht werden, während sich die Leistung von Schleppern durch die Ausstattung mit immer stärkeren Motoren unbegrenzt steigern lässt, zumindest theoretisch.

Hinsichtlich des Zugkraftbedarfes ist das Maß für die Effektivität der Zugkraftbedarf pro Meter Arbeitsbreite, im Folgenden „*relativer Zugkraftbedarf*“ genannt. Hierbei ergibt sich eine eindeutige Reihung der Vorderwagen-Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle (V 3, V 6 und V 7) insofern, als mit zunehmender Arbeitsbreite der relative durchschnittliche Zugkraftbedarf ab- und damit die Effektivität des Gerätes zunimmt (vgl. Tabelle 3-16). Die Varianten mit Motorantrieb der Zapfwelle sind, bezogen auf den Zugkraftbedarf, deutlich effektiver als die entsprechenden Varianten mit Bodenantrieb der Zapfwelle (V 2 zu V 3 sowie V 4 zu V 5). Auch der Anbau der Metall-Zwillingsräder setzt die Effektivität deutlich herab, wie der Vergleich der Varianten 2 zu 4 bzw. 3 zu 5 zeigt. Der Grasmäher ist deutlich effektiver als die Vorderwagenvarianten mit Bodenantrieb (V 2 und 4), wird andererseits jedoch von den Vorderwagenvarianten mit Motorantrieb deutlich übertroffen, selbst bei Anbau der Zwillingsräder (V 5).

Aus der Literatur, in der Angaben zur Arbeitsbreite des Grasmähers gemacht werden, ergeben sich für den relativen Zugkraftbedarf Werte von umgerechnet 534 N bzw. 586 N (COLLINS & CAINE 1926), 626 N (KRÜGER 1947), 862 N (ANONYMUS 1929), 919 N (HARRIGAN et al. 2002) 1.091 N (RUSSEL 1925, zit. in TÄNZER 1928).

Der im vorliegenden Versuch eingesetzte Grasmäher stimmt mit 965 N recht gut sowohl mit RUSSEL (1925, zit. in TÄNZER 1928), als auch mit HARRIGAN et al. (2002) überein. Die Vorderwagen-Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle bewegen sich mit 542 N bis 809 N im Bereich der übrigen Literaturwerte für Grasmäher, während die Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle mit 1.427 N bzw. 1.627 N deutlich über allen Referenzwerten aus der Literatur liegen.

3.3.1.3 Maximaler Zugkraftbedarf

Neben einem möglichst niedrigen durchschnittlichen Zugkraftbedarf, sowohl absolut, als auch relativ, spielen die tatsächlich auftretenden maximalen Zugkräfte eine bedeutende Rolle beim Einsatz von Zugtieren. Diese treten bei den untersuchten Mäharbeiten vornehmlich beim Anziehen auf, also bei der Überwindung des Anfangswiderstandes.

Pferde können zur Brechung von Zugkraftspitzen kurzzeitig sehr viel höhere als die angegebenen Dauerzugkräfte entwickeln. Allerdings beziehen sich diese Spitzenleistungen auf eine Zeitspanne von einigen wenigen Sekunden. Nach STEVENSON & WASSERSUG (1993) beträgt die theoretische Maximalleistung von Pferden 100 - 200 W pro Kilogramm Muskelmasse. Die zur Verrichtung mechanischer Arbeit einsetzbare Muskelmasse entspricht etwa 30 % der gesamten Körpermasse, bei einem Pferd mit 850 kg wie im vorliegenden Versuch also 255 kg. Daraus resultiert für ein solches Pferd eine theoretische Maximalleistung von 25.500 W oder 34,2 PS, da $746 \text{ W} = 1 \text{ PS} = 75 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$. In Zugkraft umgesetzt bedeutet dies für eine Sekunde eine Zugkraft von 25.163 N über einen Meter aufzubringen. Bei entsprechenden Zugkraftversuchen wurden meist Spitzenwerte von ca. 12 - 15 PS pro Pferd festgestellt, entsprechend einer Zugkraft von umgerechnet 8.829 N bis 11.036 N für einige wenige Sekunden (z.B. COLLINS & CAINE 1926). Pferde können aber kurzfristig sogar mehr Zugkraft leisten, als ihrer Körpermasse entspricht (ebd.), in der Regel liegt die Spitzenleistung jedoch in einem Bereich von etwa 30 % - 45 % (RIJN 1929) bzw. 60 % - 80 % (SASIMOWSKI 1987) der Körpermasse. Bezogen auf die im Versuch eingesetzten Mähwerke muss mit steigender Arbeitsbreite aufgrund des höheren Widerstandes, den die Vegetation dem längeren Messerbalken entgegensetzt, sowie durch das höhere Gewicht der Maschine der maximale Zugkraftbedarf zunehmen, bei ansonsten vergleichbaren Bedingungen. Bei den Varianten mit Bodenantrieb müssen die maximalen Zugkräfte größer sein als bei den vergleichbaren Varianten mit Motorantrieb, da nicht nur das gesamte Gerät aus dem Ruhezustand in Bewegung versetzt werden muss, sondern obendrein zusätzliche Energie für das in Gang setzen der Zapfwelle und der Messer benötigt wird. Ebenso müssen die Werte für die Varianten mit Zwillingrädern größer sein als die der entsprechenden Varianten ohne Zwillingräder, denn die erhöhte Traktion durch die Zwillingräder bedeutet einen zusätzlichen Zugkraftbedarf.

Grundsätzlich muss hinsichtlich der Erfassung von maximalen Zugkraftwerten berücksichtigt werden, dass die im vorliegenden Versuch angewandte Messtechnik mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet hat. Die Schwankungen im Zugkraftbedarf weisen jedoch eine weitaus höhere Frequenz auf. FANAC (1997, S. 18) hat in seinen Versuchen zur Dämpfung von Zugkraftspitzen eine Messtechnik mit einer Frequenz von „ca. 275 Lastmessungen pro Sekunde“ verwendet. Abbildung 3-30 aus dieser Veröffentlichung zeigt, in welchem Bereich die Zugkraftwerte innerhalb einer Sekunde oszillieren. Bei einer Messfrequenz von 1 Hz ist es daher allenfalls zufällig möglich, den wahren Maximalwert aufzuzeichnen. Die im vorliegenden Versuch gemessenen Werte sind daher nicht als absolut zu setzen, sondern geben einen ersten Eindruck der Verhältnisse wieder.

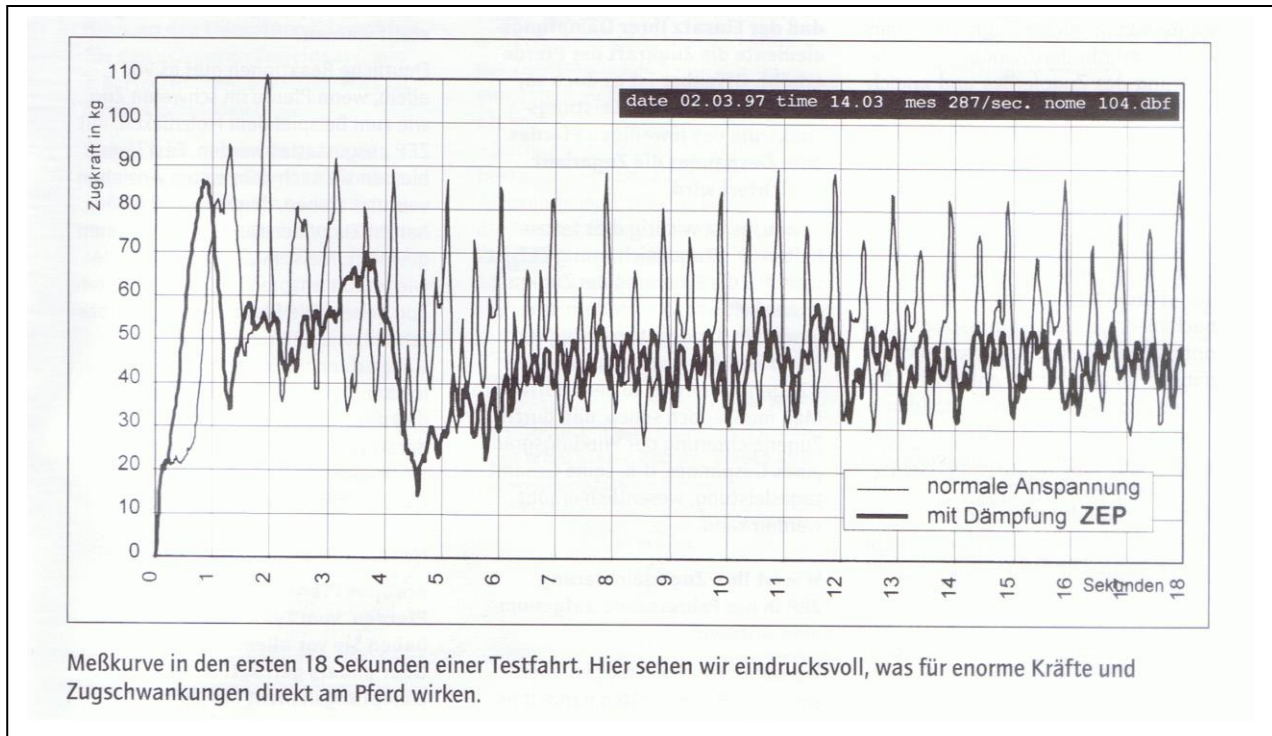


Abbildung 3-30: Messkurve einer Zugkraftmessung

Quelle: FANAC (1997)

Betrachtet man die Werte in Tabelle 3-17, so werden diese grundsätzlichen Überlegungen mit einer Ausnahme bestätigt. Die Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle weisen einen deutlich höheren Wert auf als die entsprechenden Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle (V 2 zu V 3 und V 4 zu V 5). Die bodengetriebene Variante mit Zwillingrädern hat einen größeren Wert als die entsprechende Variante ohne Zwillingräder (V 4 zu V 2). Gleiches gilt für die motorgetriebene Variante mit Zwillingrädern zur entsprechenden Variante ohne Zwillingräder (V 5 zu V 3).

Bei den motorgetriebenen Varianten ohne Zwillingräder hat Variante 7 mit der größten Arbeitsbreite erwartungsgemäß den höchsten maximalen Zugkraftbedarf. Allerdings hat Variante 3 einen höheren maximalen Zugkraftbedarf als die nächst größere Variante 6. Diese Abweichung von den theoretischen Überlegungen lässt sich weder mit der Vegetation, noch mit der Topographie erklären. Hier dürfte der erwähnte Einfluss der Messtechnik zum Tragen kommen, die zur Erfassung der maximalen Zugkraftwerte eine zu niedrige Frequenz besitzt.

Angaben zu maximalen Zugkraftwerten von Mähwerken finden sich in der Literatur noch seltener als solche zu durchschnittlichen Zugkraftwerten. Bei Werten aus älteren Untersuchungen ist ebenfalls Vorsicht geboten, da die jeweils verwendete Messtechnik für die Erfassung der wahren Maximalwerte ebenfalls zu unpräzise gewesen sein dürfte.

TEICHMANN (1928) führt Höchstzugkraftwerte von nicht näher definierten Grasmähern zwischen umgerechnet 3.512 N und 3.924 N an, mit einem Mittelwert aus fünf Versuchen von 3.704 N. PETZOLD (1952) gibt für einen ebenfalls nicht näher beschriebenen Grasmäher Spitzenwerte von umgerechnet 3.826 N an, BERNDT (1968), ebenfalls ohne nähere Beschreibung, umgerechnet 3.434 N als Mittelwert aus zahlreichen Versuchen.

Der im vorliegenden Versuch gemessene Wert für den Grasmäher liegt mit 2.046 N deutlich unter diesen Werten. Auch die Vorderwagen-Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle bleiben unter diesen Werten, lediglich V 5 mit den montierten Zwillingrädern reicht mit 3.571 N an diese Literaturwerte heran. Die Vorderwagen-Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle liegen mit 4.192 N (V 2) bzw. 4.536 N (V 4) jedoch deutlich über diesen Literaturwerten.

Grundsätzlich ist die Betrachtung des maximalen Zugkraftbedarfes eines Gerätes notwendig, da dieser Bedarf von den Tieren ja tatsächlich erbracht werden muss. Ein Gerät mit einem durchschnittlichen Zugkraftbedarf, der für ein bestimmtes Gespann im Bereich des Machbaren liegt, kann beim maximalen Zugkraftbedarf gegebenenfalls Werte aufweisen, die dieses Gespann möglicherweise gar nicht aufbringen kann. Die Folge: Das betreffende Gerät könnte trotz adäquaten mittleren Zugkraftbedarfs mit diesem Gespann nicht eingesetzt werden.

Dabei kommt es nicht nur auf die Höhe des maximalen Zugkraftbedarfes an, sondern auch auf die Häufigkeit seines Auftretens. Denn das Erbringen dieser Spitzenleistung führt bei den Pferden schnell zu Ermüdung, da der Stoffwechsel bei diesen hohen Leistungen vom aeroben in den anaeroben Bereich wechselt (z.B. MEYER & COENEN 2002). Dabei kann der Energiestoffwechsel des Pferdes bis auf das 100-fache des Ruhezustandes anwachsen (COLLINS & CAINE 1926). Selbst wenn der maximale Zugkraftbedarf in einem Bereich liegt, der von den betreffenden Tieren erbracht werden kann, können ungünstige Arbeitsbedingungen dazu führen, dass das Gespann überfordert wird: Kleine Flächen, die ein häufiges Wenden und wieder Anfahren erfordern, häufiges Verstopfen des Mähwerks etc. stellen limitierende Faktoren dar, die zur Erschöpfung des Gespanns führen. Um die Arbeit dennoch zufrieden stellend erledigen zu können, muss gegebenenfalls ein weiteres Pferd hinzugespannt werden.

Die Ergebnisse der Varianten 2 und 4 mit Werten zwischen 3.428 N und 5.185 N zeigen daher sehr deutlich, dass das Mähen mit Bodenantrieb für das betrachtete Gespann eine Überforderung darstellt, wenn diese Arbeit über eine längere Zeitspanne, also in der landwirtschaftlichen Praxis, durchgeführt werden soll.

3.3.1.4 Eignung der Zapfwelle als Antriebssystem bei pferdegezogenen Geräten

Vergleicht man den durchschnittlichen Zugkraftbedarf der Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle mit dem der entsprechenden Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle (V 2 zu V 3 und V 4 zu V 5, vgl. Tabelle 3-15), so wird deutlich, dass etwa 50 % des Gesamtzugkraftbedarfs der bodengetriebenen Varianten für den Antrieb der Zapfwelle notwendig sind. Anders ausgedrückt, durch den Bodenantrieb der Zapfwelle steigt der Gesamtzugkraftbedarf auf das Doppelte der Varianten mit Motorantrieb der Zapfwelle. HARRIGAN et al. (2002) haben für den von ihnen untersuchten Grasmäher gezeigt, dass die Mechanik lediglich 23 % des gesamten Zugkraftbedarfs beansprucht. Somit wird deutlich, dass das am Pintow Power Cart verwendete System zum Bodenantrieb der Zapfwelle deutlich ineffizienter ist als das direkte Antriebssystem mittels Kurbelstange bei dem Grasmäher.

Der Energiebedarf des Motors zum Antrieb der Zapfwelle bei Variante 3 und 5 beträgt jeweils ziemlich genau 100 % des Gesamtenergiebedarfs der Pferde bei den entsprechenden Varianten mit Bodenantrieb (V 2 und V 4, vgl. Tabelle 3-33). Vergleicht man den Gesamtenergiebedarf von V 3 zu V 2 bzw. V 5 zu V 4, so zeigt sich, dass die motorgetriebenen Varianten einen um 67 % höheren Gesamtenergiebedarf haben als die bodengetriebenen Varianten. Dieser Vergleich macht deutlich, dass der Motorantrieb der Zapfwelle noch ineffizienter ist als der Bodenantrieb und belegt, dass der Motor dem Pferd energetisch deutlich unterlegen ist.

Insgesamt zeigen diese Überlegungen sehr deutlich, dass der Antrieb des Mähwerkes mittels Zapfwelle am betrachteten Vorderwagen ein sehr ineffizientes und Energie verzehrendes System ist. Erfahrungen beim Einsatz eines auf Doppelmesser-Technik mit Kurbelstangenantrieb umgebauten Grasmähers in der Praxis haben mehrfach gezeigt, dass die Pferde solche Geräte mit einer Arbeitsbreite von 1,65 m ohne übermäßige Anstrengungen ziehen können (SCHROLL 2001, STRÜBER 2003, WIEDENMANN 2003). Auch die ersten Erfahrungen mit dem neuen Doppelmessermähwerk der Firma I&J aus den USA legen nahe, dass sogar der dort verwendete Mähbalken mit 2,30 m Arbeitsbreite mit zwei Pferden gearbeitet werden kann (SCHROLL 2012).

SCHMIT (2007) hat an seinem Power Cart nach einem Schaden an der Hinterachse den Getriebestrang der bodengetriebenen Zapfwelle zerlegt und den Energieverlust anhand der Konstruktion und mit Hilfe von Literaturwerten berechnet. Er kommt zu dem Ergebnis, das vom Laufrad des Vorderwagens bis zum Zapfwellenstummel etwa 18 % des Eingangsdrehmoments durch Reibung und Schlupf im Getriebestrang verloren gehen. Unter Einbeziehung des von ihm ebenfalls untersuchten Doppelmessermähwerks mit 1,65 m Arbeitsbreite steigt dieser Wert nach seinen Berechnungen auf ca. 25 %. Er kommt zu dem Schluss: „*For tractor farmers a lot of rotating parts on an implement, resulting in a low efficiency, means only a higher fuel consumption by the tractor engine. For draft horse farmers with a limited number of horses, this approach is simply unrealistic, at least in my mind.*“ (SCHMIT 2007, S. 30). Für die Konstrukteure moderner pferdegezogener Geräte erwächst hieraus der dringende Auftrag, für die unterschiedlichen Arbeiten Geräte mit direkten Antriebssystemen zu entwickeln.

Sollte der Markt für pferdegezogene Geräte weiter wachsen, dann wird es sich zukünftig für Gerätehersteller lohnen, für weitere landwirtschaftliche Arbeiten Geräte mit direktem Antriebssystem zu entwickeln. Derzeit ist die Nachfrage und somit die absetzbare Stückzahl hierfür noch zu gering, da die hohen Entwicklungskosten auf die wenigen abzusetzenden Geräte umgelegt werden müssten. Dadurch würde der Preis für das einzelne Gerät so hoch, dass die Geräte kaum abzusetzen wären. Gelänge es, für die Entwicklung derartiger Geräte Forschungsmittel einzuwerben, würde eine kostenneutrale bzw. –günstige Entwicklung verschiedener praxistauglicher Prototypen ermöglicht. Dies würde die entsprechende Nachfrage erzeugen, als notwendige Voraussetzung für zumindest kleine Serien preiswerter Geräte für den Pferdezug.

3.3.2 Arbeitsgeschwindigkeit und Arbeitsleistung

3.3.2.1 Arbeitsgeschwindigkeit

Bei der gemessenen Arbeitsgeschwindigkeit gibt es außer dem Unterschied zwischen den langsameren Pferde- und den schnelleren Schlepper-Varianten keine auffälligen Gesetzmäßigkeiten (vgl. Tabelle 3-18). Nur in Ansätzen ist zu erkennen, dass bei den Pferde-Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle die Arbeitsgeschwindigkeit mit zunehmender Arbeitsbreite abnimmt (V 3 zu V 6 zu V 7). Die Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle weisen eine etwas geringere Arbeitsgeschwindigkeit auf, als die entsprechenden Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle (V 2 zu V3 bzw. V 4 zu V 5), was durch den erhöhten Zugkraftbedarf erklärbar ist. Die Varianten mit Zwillingssreifen erzielen dagegen eine höhere Arbeitsgeschwindigkeit als die entsprechenden Varianten mit einfacher Bereifung (V 5 zu V 3 bzw. V 4 zu V 2). Hier würde man aufgrund des erhöhten Zugkraftbedarfs durch die Zwillingssäder zunächst einmal mit dem umgekehrten Verhältnis rechnen. Die wahrscheinlichste Erklärung für dieses Phänomen ist, dass die Pferde versucht haben, bei der kurzen Bearbeitungszeit der Parzellen den etwas erhöhten Zugkraftbedarf durch die Zwillingssäder durch mehr „Schwung“, sprich eine zügigere Gangart, wieder wettzumachen. Ein Verhalten, dass auch FISCHER (1952) beobachten konnte.

BUHLE (1923) weist darauf hin, dass die mögliche Geschwindigkeit bei hohem Zugkraftbedarf geringer ausfällt als bei niedrigem. Für schweren Zug komme als Ergebnis zahlreicher Untersuchungen keine höhere Geschwindigkeit als $3,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ in Betracht. Er betont die Bedeutung, die Pferde gerade im schweren Zug „... ganz ruhig ... und gleichmäßig, wenn auch mit Energie und Willenskraft vorwärts ...“ gehen zu lassen, um sie zu schonen. Denn „*Es ist nicht die Länge des Weges, welche das Pferd tötet, sondern die Geschwindigkeit (das Tempo), in der man ihn zurücklegt.*“ (BUHLE 1923, S. 38). FISCHER (1952, S. 20/21) hingegen belegt mit seinen Ergebnissen, dass in der Praxis in erster Linie die arbeitsbedingte Fahrweise die Geschwindigkeit bedingt. Seine Ergebnisse entsprächen „... in keiner Weise den herrschenden Anschauungen über die Beziehung *‘steigender Zugwiderstand - fallende Geschwindigkeit’*“. Auch PETZOLD (1952, S. 17) weist darauf hin, dass die Geschwindigkeit nicht nur vom Zugkraftbedarf abhängt, sondern so unterschiedliche Faktoren wie „... die Länge der Arbeitszeit, die Art der Arbeit, der Gespannführer, das Alter, das Gewicht und der Gesundheitszustand des Tieres und nicht zuletzt das Wetter ... einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Leistung aus(üben)“.

Insgesamt liegen die bei den Pferdevarianten mit $\pm 5,0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ($= 1,38 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$) gemessenen Geschwindigkeiten im oberen Bereich der Vergleichswerte für verschiedene Arbeitsverfahren aus der Literatur, die sich zwischen $2,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ und $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bewegen (z. B. ZWAGERMAN 1939, PETZOLD 1952, PAPENDIECK 1958). HARRIGAN et al. (2002) stellten bei ihren Mähversuchen mit verschiedenen Grasmähern eine durchschnittliche Geschwindigkeit von $3,1 \text{ mph}$ ($= 4,99 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) fest. FISCHER (1952) gibt für einen nicht näher beschriebenen Grasmäher als Mittelwert aus zahlreichen Versuchen an verschiedenen Standorten eine durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit von $0,9 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ ($= 3,24 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) an. TÄNZER (1928) zitiert RUSSEL (1925) mit $2,5 \text{ mph}$ ($= 4,02 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) für einen Grasmäher mit $1,37 \text{ m}$ Arbeitsbreite. KRÜGER (1947) verweist darauf, dass bei seinen Versuchen die Geschwindigkeit am Grasmäher in relativ weiten Bereichen schwankte, ohne konkrete Werte zu nennen.

Die im Vergleich zur Literatur höheren Geschwindigkeitswerte im vorliegenden Versuch dürften auch darauf zurückzuführen sein, dass bei der jeweils nur kurzen Bearbeitungszeit für die Parzellen bei den Pferden keine Ermüdungserscheinungen auftraten.

Die Geschwindigkeitswerte für die Schleppvarianten fallen eher zu niedrig aus, wenn man in Betracht zieht, dass der Hersteller der Doppelmessermäherwerke schreibt: „*Ein Tempolimit kennt das MÖRTL-Doppelmesser nicht. Was der Traktor und das Gelände hergeben, macht das Doppelmesser mit. So enorm hoch ist seine Schnittgeschwindigkeit.*“ (MÖRTL o. J., S. 3). Der DLG-Prüfbericht des verwendeten Mähwerks gibt Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Feldbeschaffenheit von $6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bis $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ und darüber als geeignet an (DLG 1987).

3.3.2.2 Arbeitsleistung

Die von den Pferden erbrachte Arbeitsleistung ergibt sich als Produkt aus der Arbeitsgeschwindigkeit und dem durchschnittlichen Zugkraftbedarf. Die Ergebnisse zeigen mit Werten von $1,6 \text{ kW}$ bis $1,8 \text{ kW}$ nur geringe Unterschiede zwischen den Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle und dem Grasmäher (vgl. Tabelle 3-19). Deutlich höhere Werte mit $3,2 \text{ kW}$ (V 2) bzw. $3,7 \text{ kW}$ (V 4) weisen die Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle auf. Hier macht sich der deutlich erhöhte Zugkraftbedarf bei gleicher Geschwindigkeit bemerkbar.

Literaturwerte zur von den Pferden erbrachten Leistung bei pferdegezogenen Mähwerken finden sich nur wenige, da in vielen Arbeiten nur die Geschwindigkeit oder nur der Zugkraftbedarf angegeben ist. Aus den Werten von RUSSEL (1925, zitiert in TÄNZER 1928) errechnet sich am Grasmäher mit $1,37 \text{ m}$ Arbeitsbreite eine Leistung von $1,67 \text{ kW}$, ein Wert, der sich mit dem des Grasmähers (V 1) in der vorliegenden Untersuchung

ziemlich deckt. FISCHER (1952) gibt für einen nicht näher bezeichneten Grasmäher Werte von 0,88 kW bis 1,39 kW an. HARRIGAN et al. (2002) ermittelten 2,34 kW für einen Grasmäher mit 1,83 m Arbeitsbreite.

Die Herstellerfirma der im Versuch eingesetzten Mähwerke gibt für die Doppelmessermähwerke Leistungsaufnahmen von 3,8 kW (1,65 m), 4,2 kW (1,90 m) und 5,3 kW (2,40 m) am Schwinghebelantrieb an, im Mittel 2,2 kW pro Meter Arbeitsbreite (MÖRTL o.J.). KTBL (1998) gibt für ein Balkenmäherwerk bei einer Arbeitgeschwindigkeit von $3,5 - 12 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ und einem Ertrag von 100 dt/ha einen Leistungsbedarf von 2 - 4 kW pro Meter Arbeitsbreite (m AB) an, bei einem Ertrag von 200 dt/ha sind es 4 - 8 kW/m AB.

Diese Angaben liegen deutlich über den ermittelten Werten, was umso mehr verwundert, als sie sich ja nur auf die zum Antrieb des Messers benötigte Leistung beziehen. Wird die Fortbewegung von Schlepper und Mähwerk mit einbezogen, entsteht nach DLG (1987) insgesamt ein Leistungsbedarf ab 20 kW für die Arbeitsbreiten 1,90 m und 2,40 m des untersuchten Doppelmessermähwerks. Die im Versuch ermittelten Zahlen lassen erhebliche Zweifel an der Gültigkeit der Angaben von KTBL und der Herstellerfirma Mörtl aufkommen. Zudem weisen sie darauf hin, dass die Pferdevarianten offensichtlich sehr viel effizienter arbeiten als die Schleppervarianten, und bestätigen damit die im vorhergehenden Kapitel getroffenen Aussagen.

Die erforderliche Schlepperleistung für das Scheibenmäherwerk wird vom Hersteller mit 59 kW angegeben, die Leistungsaufnahme des Mähwerks mit ca. 23 kW (= 7,93 kW pro Meter Arbeitsbreite). Betrachtet man den Unterschied zwischen diesem Mähwerk und den übrigen hinsichtlich der erzielten Flächenleistung (s.u.), so wird deutlich, dass die höhere Schlagkraft dieses Mähwerks mit einem hohen Mehraufwand an Energie erkauft wird. Die sehr schnell rotierenden Mähscheiben erfordern offensichtlich einen hohen Energieeinsatz.

3.3.3 Tatsächliche und relative Arbeitsbreite

Hinsichtlich der Arbeitsbreite haben die Versuche gezeigt, dass die tatsächlich erzielbare Arbeitsbreite geringer ist als die vom Hersteller angegebene theoretische Arbeitsbreite des Gerätes. Dieser Unterschied kommt dadurch zustande, dass es nicht bei jeder Arbeitsbahn gelingt, exakt an die vorhergehende anzuschließen, es kommt zu mehr oder weniger großen Überlappungen.

Bei den tatsächlich erreichten Arbeitsbreiten (vgl. Tabelle 3-20) sind die Unterschiede zwischen den eingesetzten Mähwerken signifikant, während es innerhalb der jeweiligen Mähwerksgrößen keine signifikanten Unterschiede gibt. Dieses Ergebnis wird durch die Berechnung der relativen Arbeitsbreiten bestätigt, die alle zwischen 88 % und 95 % liegen und bei denen keine signifikanten Unterschiede bestehen (vgl. Tabelle 3-21). Zwei Ergebnisse fallen dennoch auf: Zum einen die relativ geringen Werte für den Grasmäher (V 1) sowie für die Vorderwagen-Variante mit bodengetriebener Zapfwelle und angebauten Zwillingrädern (V 4); zum anderen der höhere Wert der Vorderwagen-Variante V 7 im Vergleich zur Schlepper-Variante V 8 mit demselben Mähwerk. Beim Grasmäher sowie bei V 4 dürfte die etwas geringere erzielte Arbeitsbreite u.a. an dem relativ hohen Anteil an Störungen liegen, die jedes Mal ein neues Anmähen erforderlich machten, was die Arbeitsgenauigkeit natürlich herabsetzt. Bei V 4 kommt sehr wahrscheinlich der extrem hohe Zugkraftbedarf hinzu, der den Gang der Pferde unstet und diese damit weniger lenkbar macht. Der durchgängig höhere Wert von V 7 zu V 8 zeigt, dass mit den Pferden genauer gearbeitet wurde als mit dem Schlepper. Diese Aussage wird auch durch die Ergebnisse der relativen Arbeitsbreite bestätigt, die mit Ausnahme von V 4 bei den Pferden geringfügig höher sind als bei den Schleppern.

3.3.4 Arbeitszeit pro Parzelle und Teilarbeitszeiten ab Feldrand

3.3.4.1 Arbeitszeit pro Parzelle

Bei der Arbeitszeit pro Parzelle (vgl. Tabelle 3-22) weisen die Schleppervarianten mit 390 sec. bis 435 sec. (= 6,5 min. bis 7,3 min.) im Gegensatz zu 584 sec. bis 695 sec. (= 9,7 min. bis 11,6 min.) bei den Pferdevarianten in allen Fällen signifikant geringere Werte auf. Hier wirkt sich die deutlich höhere Arbeitsgeschwindigkeit des Schleppers aus.

Bei den Pferdevarianten macht sich die deutlich erhöhte Störanfälligkeit der Variante 4 (s.u.) gegenüber den anderen Varianten dadurch bemerkbar, dass sie stets den höchsten Wert für die Arbeitszeit hat und sich bei der Auswertung über beide Jahre sogar signifikant von den übrigen Vorderwagen-Varianten unterscheidet. Bei den übrigen Varianten sind keine eindeutigen Zusammenhänge zu erkennen.

3.3.4.2 Teilarbeitszeiten ab Feldrand

Die Betrachtung der Teilarbeitszeiten lässt nur geringfügige und mit einer Ausnahme keine signifikanten Unterschiede zwischen den betrachteten Varianten erkennen. Der Anteil der Lastfahrt liegt bei allen Varianten zwischen 83 % und 86 % (vgl. Tabelle 3-23). Einzige Ausnahme ist Variante 4 mit bodengetriebener Zapfwelle und Zwillingsrädern, die mit 78 % darunter liegt. Der Grund ist die hohe Störanfälligkeit dieser Variante durch das erschwerte Anziehen, worauf auch der Höchstwert des maximalen Zugkraftbedarfs hinweist. Dadurch kam es mehrfach zur Verweigerung der Pferde am Ende eines Wendevorgangs, sie blieben stehen und es brauchte dann zwei oder drei Anläufe, bis die Arbeit fortgesetzt wurde. Der Anteil der Störungen ist mit 10 % bei dieser Variante mehr als doppelt so hoch wie bei den übrigen Varianten (0 % bis 5 %, vgl. Tabelle 3-25). Bei den Wendevorgängen gibt es zeitlich keine nennenswerten Unterschiede, lediglich die Schleppervariante mit dem Scheibenmäherwerk hat mit 19 % bis 20 % einen Wert, der deutlich über dem der übrigen Varianten mit 11 % bis 15 % liegt (vgl. Tabelle 3-24). Dies belegt die größere Wendigkeit der Pferde gegenüber dem Schlepper, die einen Vorteil der Pferdearbeit vor allem bei der Bewirtschaftung klein strukturierter Flächen darstellt.

Grundsätzlich muss bei jeder Feldarbeit ein gewisser Zeitanteil für das Wenden am Ende des Feldes sowie für Einstellarbeiten am Gerät, Betriebsstörungen und Pausen eingerechnet werden. Nach ANONYMUS (1929) kann die Summe dieser Faktoren bei der Arbeit mit Zugtieren im Mittel mit 40 % bis 45 % der Gesamtarbeitszeit angesetzt werden. KRÜGER (1947) zitiert DENCKER (1936) mit 40 %. Dieser Wert erscheint im Lichte der vorliegenden Versuchsergebnisse zunächst recht hoch, aber beim Parzellenversuch gab es keine Pausenzeiten, da die Bearbeitungszeit für die Parzellen so kurz war, dass Pausen nicht notwendig waren. Der Vergleich mit Werten aus älterer Literatur wird allgemein dadurch erschwert, dass die damaligen Untersuchungen nicht zwischen den einzelnen Teilarbeitszeiten unterscheiden, sondern von „*allgemeinem Leerlauf*“ (KRÜGER 1947, S. 20) oder ähnlichen Begriffen sprechen, die Wenden, Störungen, Einstellarbeiten am Gerät und Pausen einschließen.

BLUMENSTEIN (2008) fand für verschiedene Pferdearbeiten Werte von 0 % bis 40 % für notwendige Pausen für die Pferde, wobei die hohen Werte (23 %, 35 %, 38 % und 40 %) beim Grubbern und Eggen auftraten. HUMBERT (2003) stellte bei 18 untersuchten Arbeitsverfahren im Pferdezug auf verschiedenen Betrieben im Mittel 70 % Lastfahrt, 20 % Wendezeit und 10 % Störungen + Pausen fest.

Gemessen an den Literaturwerten sind die Werte für die Teilarbeit Lastfahrt recht hoch und für die Teilarbeiten Wenden und Störung recht niedrig. Dies in Zusammenhang mit der Tatsache, dass bei den vorliegenden Versuchsergebnissen für die jeweiligen Teilarbeitszeiten der untersuchten Varianten kaum Unterschiede bestehen, weist darauf hin, dass die Arbeitszeit jeweils zu kurz war, um die „wahren“ Anteile der Teilarbeitszeiten zu bestimmen. Dies ist einer der Gründe, warum zur Ergänzung des Parzellenversuchs die Flächenversuche auf verschiedenen Betrieben durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 4).

3.3.5 Flächenleistung

Die Flächenleistungen der untersuchten Varianten nehmen erwartungsgemäß mit zunehmender Arbeitsbreite zu (vgl. Tabelle 3-26). Die beiden großen pferdegezogenen Mähwerke (V 6 und V 7) unterscheiden sich signifikant vom Grasmäher, V 7 zudem auch von den 1,65 m-Mähwerken (V 2 bis V 5). Die Schlepper-Varianten weisen signifikant höhere Leistungen auf als alle Pferde-Varianten, der Scheibenmäher (V 9) hat eine signifikant höhere Flächenleistung als das schleppergezogene Doppelmessermähwerk (V 8).

Während sich die Zunahme der Flächenleistung vom Grasmäher zum 1,65 m-Doppelmessermähwerk im Bereich von 18 % bis 36 % bewegt, hat das 1,90 m Mähwerk schon eine um 43 % bis 49 % höhere Leistung als der Grasmäher. Das 2,40 m Mähwerk erreicht mit 1,00 ha /h eine um 90 % höhere Flächenleistung als der Grasmäher. Die moderne Arbeitspferdetechnik ist im Vergleich zu dem Grasmäher somit erheblich leistungsfähiger. Die Leistung des 2,40 m-Mähwerks im Pferdezug beträgt mit $1,00 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ etwa 66 % der Schlepperleistung mit demselben Mähwerk ($1,51 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$).

Die Flächenleistung ist nicht allein abhängig von Arbeitsbreite und -geschwindigkeit. Auch die Zeiten für Wendevorgänge, Pausen und Störungen müssen berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 2.2). Da bei den relativ kleinen Parzellen der Zeitanteil der Wendevorgänge am Parzellenende recht hoch war, liegt die Vermutung nahe, dass die Werte für die aus der Flächengröße der Parzellen und der benötigten Arbeitszeit pro Parzelle auf einen Hektar Fläche hochgerechnete Flächenleistung zu niedrig ausfallen. Zum Vergleich ist daher in Tabelle 3-49 die sich aus der erzielten Arbeitsgeschwindigkeit und der erzielten Arbeitsbreite ergebende rechnerische Flächenleistung den Ergebnissen über beide Versuchsjahre hinweg gegenüber gestellt.

Wie zu erwarten, ist die so errechnete Flächenleistung in allen Fällen höher als die im Parzellenversuch festgestellte. Die Abfolge der Varianten von der geringsten (V 1) zur größten Flächenleistung (V 9) ändert sich nur insofern, als bei der rechnerischen Flächenleistung die Varianten 3 und 5 den gleichen Wert ($0,78 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$) aufweisen, der geringfügig über dem Wert von V 2 ($0,77 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$) liegt. Bei den im Parzellenversuch gemessenen Flächenleistungen sind Variante 2 und 3 gleich ($0,69 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$), während V 5 mit $0,72 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ einen etwas höheren Wert aufweist.

Rundet man die Werte auf eine Nachkommastelle, so ist die rechnerische Flächenleistung bei den Varianten 1 - 8 jeweils um $0,1 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ höher als die im Parzellenversuch ermittelte. Bei Variante 9 beträgt dieser Unterschied jedoch $0,3 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$. Dies bestätigt die Ergebnisse hinsichtlich der Teilarbeitszeiten: zwischen den Wendevorgängen gibt es bei Variante 1-8 keine signifikanten Unterschiede, die Werte bewegen sich alle zwischen 11 % und 13 %. Variante 9 hat mit knapp 19 % einen signifikant höheren Wert. Durch diesen großen Einfluss der Teilarbeit *Wenden* bei Variante 9 steigt die rechnerische Flächenleistung stärker als bei den anderen Varianten, wenn die Wendevorgänge unberücksichtigt bleiben.

Andererseits ist bei der Ermittlung der Flächenleistung in einem Großparzellenversuch zu erwarten, dass die längere Arbeitszeit zu einer zunehmenden Ermüdung der Pferde führt, die das Arbeitstempo mit zunehmender Arbeitsdauer sinken und Pausen zur Regeneration der Pferde notwendig werden lässt. Zudem wird die Konzentration der Pferde mit zunehmender Arbeitszeit abnehmen, so dass genaues und zügiges Arbeiten schwieriger wird. Insgesamt dürften diese Faktoren die Flächenleistung mit zunehmender Arbeitsdauer senken. Um

diesen Fragen nachzugehen, wurden ergänzend zum Parzellenversuch die Flächenversuche durchgeführt (vgl. Kapitel 4).

Tabelle 3-49: Rechnerische Flächenleistung ($\text{ha} * \text{h}^{-1}$) der Auswertung über beide Versuchsjahre als Produkt aus erzielter Arbeitsgeschwindigkeit ($\text{km} * \text{h}^{-1}$; s. Tabelle 3-18) und tatsächlich erzielter Arbeitsbreite (m; s. Tabelle 3-20); zum Vergleich die ermittelte Flächenleistung aus dem Parzellenversuch

Variante	Bezeichnung	Versuchsjahr: Gesamt			
		erzielte Arbeitsgeschwindigkeit ($\text{km} * \text{h}^{-1}$)	erzielte Arbeitsbreite (m)	rechnerische Flächenleistung ($\text{ha} * \text{h}^{-1}$)	Flächenleistung Parzellenversuch ($\text{ha} * \text{h}^{-1}$)
1	GM 130 B	5,1	1,19	0,61	0,53
2	PC 165 B	4,9	1,57	0,77	0,69
3	PC 165 M	5,0	1,56	0,78	0,69
4	PC 165 B Zw	5,0	1,45	0,73	0,63
5	PC 165 M Zw	5,1	1,52	0,78	0,72
6	PC 190 M	4,9	1,80	0,88	0,78
7	PC 240 M	4,8	2,28	1,09	1,00
8	S 240	7,4	2,21	1,64	1,51
9	S 290	7,9	2,68	2,12	1,84

In der Literatur finden sich nur vereinzelt Werte zur Flächenleistung pferdegezogener Mähwerke. Für diese Zahlen gelten dieselben Einschränkungen wie bei den Zahlen zum Zugkraftbedarf, da auch hier in der Regel keine konkreten Angaben über die Versuchsanstellung und die äußeren Umstände gemacht werden.

KRÜGER (1947) hat für einen Grasmäher mit 1,30 m Arbeitsbreite Flächenleistungen zwischen $0,25 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ und $0,39 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$, im Mittel $0,34 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$, festgestellt. Dieser Wert liegt deutlich über den Angaben von BLOHM (1956), der für einen Grasmäher mit einer Arbeitsbreite von 5' (= 156,50 cm) eine Flächenleistung von $0,2 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ angibt. Dieser Wert findet sich auch bei REINHARDT (1930), jedoch ohne Angaben zur Arbeitsbreite des Mähwerks. KTBL (1963) gibt eine Flächenleistung von $0,35 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ für das Mähen mit dem Grasmäher an, ohne Angaben zur Arbeitsbreite zu machen. ANONYMUS (1929) gibt für einen Grasmäher mit 1,32 m Arbeitsbreite eine Leistung von 4 ha pro Tag an. Diese erscheint angesichts der übrigen Literaturangaben reichlich hoch, würde aber mit $0,4 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ bis $0,5 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ bei einer Arbeitszeit von 8 h - 10 h pro Tag mit dem Ergebnis im vorliegenden Versuch sowie den in TÄNZER (1928) zitierten Angaben von RUSSEL (1925) mit $0,46 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ für einen Grasmäher mit 1,37 m Arbeitsbreite übereinstimmen. HARRIGAN et al. (2002) geben für einen Grasmäher mit 1,83 m Arbeitsbreite eine Flächenleistung von $0,53 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ an.

Somit erscheint die im vorliegenden Versuch ermittelte Flächenleistung des Grasmähers (V 1) mit $0,53 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ bei 1,30 m Arbeitsbreite an der oberen Grenze des Machbaren zu liegen. Die pferdegezogenen Doppelmessermähwerke stellen im Vergleich mit den Literaturwerten somit eine noch deutlichere Leistungssteigerung dar als in Bezug auf die im vorliegenden Versuch ermittelte Flächenleistung des Grasmähers.

Bezüglich der Flächenleistung bei schleppergezogenen Mähwerken gibt es sehr unterschiedliche Angaben. RUHRSTICKSTOFF AG (1963) gibt für einen Schleppermähbalken mit einer Arbeitsbreite von 1,35 m an einem

12 PS-Schlepper eine Flächenleistung von $0,38 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ an. Für den gleichen Mähbalken mit 1,50 m Arbeitsbreite an einem 17 - 25 PS-Schlepper sind es $0,45 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$. Während KTBL (1963) noch $0,59 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ für den Schleppermähbalken angibt, ohne dabei nähere Angaben zu Arbeitsbreite und -geschwindigkeit zu machen, sind es in einer Ergänzungslieferung aus dem Jahre 1969 zu KTBL (1963) für das Mähen mit einem 1,50 m-Balken Flächenleistungen von $0,67 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ und $0,83 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ bei Arbeitsgeschwindigkeiten von $6 \text{ km} * \text{h}^{-1}$ resp. $8 \text{ km} * \text{h}^{-1}$. Bei einer Arbeitsbreite von 1,80 m werden die Werte $0,77 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von $6 \text{ km} * \text{h}^{-1}$ und $1,00 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ bei $8 \text{ km} * \text{h}^{-1}$ angegeben (ebd.).

KTBL (1996) gibt bei einer Parzellengröße von 1 ha für ein Fingerbalkenmähwerk mit 1,80 m Arbeitsbreite eine Flächenleistung von $0,53 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$, bei 2,10 m Arbeitsbreite von $0,63 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ an. Für Doppelmessermähwerke werden $0,71 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ bei 1,80 m Arbeitsbreite und $1,00 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ bei 2,40 m Arbeitsbreite angegeben.

In KTBL (1998) finden sich Angaben zu drei verschiedenen Balkenmähwerken, jeweils bezogen auf eine Parzellengröße von 1 ha. Demnach gilt für ein Balkenmähwerk mit einer Arbeitsbreite von 1,80 m eine Leistung von $0,63 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$, bei einer Arbeitsbreite von 2,10 m sind es $0,71 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ und bei einem Mähwerk mit 2,30 m Arbeitsbreite $0,83 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$.

DLG (1987, S. 4) nennt bei Geschwindigkeiten zwischen $6 \text{ km} * \text{h}^{-1}$ und $10 \text{ km} * \text{h}^{-1}$ als Flächenleistung für das 1,90 m Mähwerk $1,2 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$, für das 2,40 m Mähwerk $1,6 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$, „... bei sehr günstigen Verhältnissen auch darüber“.

KTBL (2009) führt nur noch Rotationsmähwerke auf und enthält keine Zahlen mehr für Doppelmessermähwerke. Für ein Rotationsmähwerk mit 2,80 m Arbeitsbreite wird eine Flächenleistung bei einer 2 ha großen Parzelle von $2,12 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ angegeben.

Insgesamt liegen diese Literaturwerte mit Ausnahme der Angaben aus DLG (1987) und aus KTBL (2009) deutlich unter den im Versuch ermittelten Werten für die Schleppermähwerke und zum Teil sogar unter den Werten für die pferdegezogenen Mähwerke. Da die Parzellengröße, wie im Methodenteil erwähnt, so gewählt wurde, dass sie mit den Aufnahmeverfahren des KTBL prinzipiell vergleichbar ist, erstaunt diese Abweichung, zumal die Literaturwerte selbst innerhalb der Publikationsreihe des KTBL zum Teil erhebliche Abweichungen zeigen (vgl. KTBL 1996 und 1998). Ein Erklärungsansatz für die im Vergleich zur Literatur höheren Flächenleistungen ist bei den Pferdevarianten die fehlende Ermüdung der Pferde aufgrund der relativ kleinen Parzellen und kurzen Arbeitszeiten. Beim Mähen größerer Flächen werden Arbeitsgeschwindigkeit und damit Flächenleistung vermutlich geringer ausfallen (vgl. Kapitel 4).

3.3.6 Treibstoffverbrauch, Energiebedarf und Emissionen

3.3.6.1 Treibstoffverbrauch

Die Werte der pferdegezogenen Varianten für den Treibstoffverbrauch pro Parzelle steigen mit zunehmender Arbeitsbreite leicht an, obwohl die Motorlaufzeit (= Arbeitszeit) pro Parzelle für alle Varianten nahezu gleich ist (vgl. Tabelle 3-27). Dies bedeutet: Je größer das Mähwerk, desto mehr Energie und damit Treibstoff ist notwendig, um die Messer anzutreiben. Variante 5 fällt aus diesem Schema heraus, sie hat mit $0,52 \text{ l/Parz.}$ bei der Auswertung über beide Jahre einen höheren Verbrauch als die übrigen Pferde-Varianten. Da die Arbeitszeit pro Parzelle sogar etwas geringer ist als die der übrigen Pferde-Varianten, ist dies nur auf eine irrtümlich höher eingestellte Drehzahl des Motors oder auf Fehler beim Messen des Verbrauchs zurückzuführen.

Die Schlepper-Variante mit dem 2,40 m Mähwerk (V 7) hat pro Parzelle einen Mehrverbrauch von 92 % gegenüber der Pferde-Variante mit demselben Mähwerk (V 7), 100 % gegenüber Variante 6 und 129 % gegenüber Variante 3. Der Verbrauch des Scheibenmähwerks wiederum beträgt 103 % des Verbrauchs von Variante 8. Neben dem zusätzlichen Treibstoff für die Fortbewegung der Schlepper-Varianten gegenüber den

Pferde-Varianten zeigt sich hier, dass das Scheibenmähwerk einen etwa doppelt so hohen Energiebedarf für den Messerantrieb hat wie das Doppelmessermähwerk.

Der Treibstoffverbrauch pro ha der Pferde-Varianten verhält sich konträr zum Verbrauch pro Parzelle, d.h. er nimmt mit zunehmender Mähwerksgröße ab (vgl. Tabelle 3-28). Der Grund hierfür ist, dass die benötigte Arbeitszeit pro Hektar mit zunehmender Arbeitsbreite abnimmt und die Flächenleistung steigt. Der Mehrverbrauch der kleineren Mähwerke pro Flächeneinheit ist somit durch die längere Motorlaufzeit bedingt. Der Zugewinn an Flächenleistung durch die größere Arbeitsbreite überkompensiert somit die durch die größere Arbeitsbreite bedingte Zunahme des Treibstoffverbrauchs.

Die Schlepper-Varianten haben trotz der deutlich höheren Flächenleistung gegenüber den Pferde-Varianten, d.h., trotz einer verringerten Motorlaufzeit pro Hektar, einen deutlichen höheren Treibstoffverbrauch. Variante 8 benötigt pro Hektar 92 % mehr Treibstoff als die Pferde-Variante 7 mit demselben Mähwerk. Gegenüber Variante 6 mit dem 1,90 m Mähwerk sind es immerhin noch 56 %, gegenüber Variante 3 mit dem 1,65 m Mähwerk 43 %. Der Mehrverbrauch des Scheibenmähwerts gegenüber dem schleppergezogenen Doppelmessermähwerk sinkt zwar von über 100 % pro Parzelle auf 61 % pro ha. Dennoch ist dieser Mehrverbrauch an Energie des Scheibenmähers gegenüber Variante 8 proportional deutlich höher als der Gewinn an Flächenleistung (+ 22 %). Mit anderen Worten, bezüglich des Treibstoffverbrauchs ist das Doppelmessermähwerk am Schlepper deutlich effizienter als das Scheibenmähwerk.

3.3.6.2 Energiebedarf

Bei Betrachtung der Ergebnisse hinsichtlich des Gesamtenergiebedarfs der untersuchten Varianten pro Hektar wird deutlich, dass der Grasmäher sowie die Vorderwagen-Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle (V 1, V 2 und V 4) den geringsten Energiebedarf haben (vgl. Tabelle 3-33). Die Vorderwagen-Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle haben, mit Ausnahme von V 5, einen geringeren Energiebedarf als die Schleppervarianten. Bei Variante 5 beruht dieser erhöhte Bedarf, wie bereits erwähnt, entweder auf Messfehlern oder einer zu hoch eingestellten Motordrehzahl. Der direkte Vergleich des 2,40 m Mähwerks im Pferde- (V 7) und Schlepperzug (V 8) zeigt, dass die Pferdevariante, trotz Motorantrieb der Zapfwelle, insgesamt 26 % weniger Energiebedarf hat als die Schleppervariante.

Das bedeutet, dass die Pferdearbeit energetisch deutlich effizienter als die Schlepperarbeit ist. Sie basiert zudem ausschließlich oder - bei Verwendung eines Hilfsmotors - zu 40 % auf erneuerbaren Energiequellen.

Die Feststellung der im Vergleich zum Schlepper höheren energetischen Effizienz der Pferde und des Ersatzes fossiler durch erneuerbare Energiequellen durch den Pferdeeinsatz deckt sich mit den Angaben der Literatur. CHIRGWIN (1995) untersucht die Produktion von 1 ha Mais und zeigt dass der Energiebedarf bei Einsatz von Zugtieren zu 54 % aus erneuerbaren und zu 46 % aus fossilen Energiequellen gedeckt wird, während bei Schleppereinsatz 99,9 % der Energie aus fossilen Energiequellen stammt. Zudem beträgt bei diesem Vergleich die Gesamtmenge der benötigten Energie bei der Zugtiervariante nur 15 % der Energiemenge bei Traktoreinsatz, obwohl der Ertrag bei 28 % des Ertrages der Schleppervariante liegt. Die Energieeffizienz der Zugtiervariante (= Verhältnis Output zu Input) beträgt 3,7, im Gegensatz zu 2,0 bei Schleppereinsatz. Allerdings benötigt die Zugtiervariante die zehnfache Arbeitszeit.

JACKSON & BENDER (1982) haben den Energiebedarf eines landwirtschaftlichen Betriebes mit Arbeitspferden verglichen mit dem Energiebedarf desselben Betriebes, wenn er mit durch Bioethanol betriebenen Schleppern bewirtschaftet würde, und belegen die höhere energetische Effizienz der Pferde. DEGREIF (2000) zeigt anhand empirischer Zahlen aus einem 150 ha großen Grünlandbetrieb, dass durch den ausschließlichen Einsatz von Arbeitspferden in Kombination mit Vorderwagen mit Boden- und solchen mit Motorantrieb der Zapfwelle über 90 % der Dieselmenge eingespart werden, die für dieselbe Bewirtschaftung mittels Schlepper notwendig

wäre. Würden die Arbeiten alle mit Biodiesel betriebenen Schleppern erledigt, so wäre die doppelte Fläche zur Erzeugung des Treibstoffs notwendig, verglichen mit der Futterfläche für die benötigten Pferde sowie der Fläche für die Erzeugung des Biodiesels für die Hilfsmotoren auf den Vorderwagen (ebd.).

JANSÉN (2000) fand in seinem Vergleich von Schlepper- zu Pferdenutzung in der schwedischen Landwirtschaft heraus, dass die beiden Systeme sich hinsichtlich der insgesamt benötigten Energiemenge nicht deutlich unterscheiden. Aber er betont als wesentlichen Unterschied, dass bei Pferdenutzung 60 % der benötigten Energie aus erneuerbaren Quellen stammen, bei Schleppernutzung nur 9 %. Zudem ist das Schleppersystem im Vergleich zum Pferdesystem zu einem weitaus höheren Anteil (28 % vs. 5 %) abhängig von externen Energieinputs (Dünger, Pestizide, Maschinen etc.), deren Energieeffizienz im Vergleich zur der Zeit, als alle Arbeiten ausschließlich mit Pferden verrichtet wurden, um 85 % abgenommen hat. JANSÉN (2000) hebt als wichtigen Aspekt hervor, dass die Umweltwirkung des Pferdes ausschließlich positiv, die des Traktors jedoch ausschließlich negativ ist, und kommt zu dem Schluss, dass der Einsatz von Arbeitspferden heute eine wertvolle Alternative für ein ökologisch-ökonomisches System auf lokaler Basis ist.

Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit Werten aus der älteren Literatur ist erst nach einigen Umrechnungen möglich. Damals wurde die von den Pferden geleistete Energie meist in PS-Stunden (PSh) und Kilogramm-Metern (kgm) gemessen. Bei dieser Betrachtungsweise fehlen der Energiebetrag für die Eigenfortbewegung der Pferde sowie der Erhaltungsenergiebedarf. Um diese fehlenden Energiebeträge zu berechnen, müssten die Körpermassen der in den älteren Untersuchungen jeweils verwendeten Pferde bekannt sein. Diese Angaben fehlen jedoch oft. Daher kann der Vergleich mit diesen Untersuchungen nur anhand der Zugkraftenergie geschehen.

KRÜGER (1947) z.B. gibt für einen Grasmäher mit 1,30 m Arbeitsbreite an, dass pro Hektar 2,3 PSh zu leisten sind. 1 PSh entspricht der Leistung von einem PS über die Dauer einer Stunde. Da $1 \text{ PS} = 75 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$, gilt: $1 \text{ PSh} = 75 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot 3.600 \text{ sec.} = 270.000 \text{ kgm}$. 1 kgm entspricht einer Energie von ca. 9,8 J, oder, andersherum ausgedrückt, $1 \text{ J} = 0,102 \text{ kgm} (= 1 \text{ Nm})$. Daraus folgt: $270.000 \text{ kgm} : 0,102 \text{ kgm} \cdot \text{J}^{-1} = 2,65 \text{ MJ}$. D.h. 1 PSh entspricht einem Energiebedarf von 2,65 MJ. Somit hat der von KRÜGER (1947) untersuchte Grasmäher einen Energiebedarf von $2,36 \text{ PSh} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 2,65 \text{ MJ} \cdot \text{PSh}^{-1} = 6,25 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1}$. Dies ist der Energie-Wert für die geleistete Zugarbeit. Da die Pferde mit einer Energieeffizienz von ca. 30 % arbeiten, entsprechen diese $6,25 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ nur 30 % der tatsächlich von den Pferden verbrauchten Netto-Energie. Diese beläuft sich demnach auf $20,83 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ ($6,25 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 30 \%^{-1}$). Rechnet man diese Netto-Energie in verdauliche Energie (DE) um, so erhält man $34,20 \text{ MJ DE} \cdot \text{ha}^{-1}$ ($20,83 \text{ MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 0,7^{-1} \cdot 0,87^{-1}$; vgl. Kap. 3.1.6.5). Dieser Wert von KRÜGER (1947) liegt ca. 36 % unter dem des Grasmähers im vorliegenden Versuch ($53,85 \text{ MJ DE} \cdot \text{ha}^{-1}$), erklärbar vor allem durch den deutlich geringeren mittleren Zugkraftbedarf (814 N vs. 1.255 N).

Rechnet man die sich in der Literatur findenden Angaben auf eine Arbeitsbreite von 1,30 m um, dann ergibt sich bei RUSSEL (1925, zitiert in TÄNZER 1928) ein Energiebedarf von $29,87 \text{ MJ DE} \cdot \text{ha}^{-1}$ bei einem höheren Zugkraftbedarf (1.419 N), aber deutlich geringerer Geschwindigkeit ($4,02 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). HARRIGAN et al. (2002) kommen auf einen Energiebedarf von $61,94 \text{ MJ DE} \cdot \text{ha}^{-1}$ bei einem Zugkraftbedarf von 1.202 N und einer Geschwindigkeit von $4,99 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Zur Einordnung des berechneten Energieverbrauchs der Pferde wird dieser nach einer weiteren Methode berechnet. MEYER & COENEN (2002) geben in ihrem Standardwerk „Pferdefütterung“ für den Erhaltungsstoffwechsel von Pferden eine Energiemenge pro Tag von 0,6 MJ verdauliche Energie pro kg metabolische Körpermasse ($\text{kg KM}^{0,75}$) an. Dieser Wert gilt im Bereich der thermoneutralen Zone, d.h. solange die Pferde ihren Wärmehaushalt nicht durch Variierung des Energiestoffwechsels regulieren müssen. Bei den im Versuch eingesetzten Pferden mit je 850 kg Körpermasse sind dies $94,45 \text{ MJ}$ pro Pferd und Tag bzw. $3,94 \text{ MJ}$ pro Pferd und Stunde.

Für die Eigenbewegung geben MEYER & COENEN (2002) einen Energiebedarf im schnellen Schritt (= 5 - 6 km * h⁻¹) von 0,18 MJ verdaulicher Energie pro 100 kg Körpermasse und Kilometer an. Im vorliegenden Versuch wären dies pro Pferd (850 kg KM) und Parzelle (= 0,705 km Wegstrecke) 1,08 MJ. Für die untersuchten Varianten ergäben sich pro Hektar und Pferd somit 12,00 MJ * ha⁻¹ (V 1), 9,00 MJ * ha⁻¹ (V 2 – V 5), 8,31 MJ * ha⁻¹ (V 6) und 6,35 MJ * ha⁻¹ (V 7) (s. Tabelle 3-50).

Für die Zugarbeit von Pferden geben MEYER & COENEN (2002) für Arbeiten in der Land- und Forstwirtschaft einen zusätzlichen Energiebedarf von 50 - 100 % des Erhaltungsenergiebedarfs an. Legt man die nach den gleichen Autoren errechneten 94,45 MJ Erhaltungsenergiebedarf zu Grunde, ergäbe dies eine Menge von 47,23 MJ bis 94,45 MJ pro Tag oder 1,97 MJ bis 3,94 MJ pro Stunde.

Fasst man diese Energiebeträge zusammen, ergeben sich die in Tabelle 3-50 dargestellten Werte für die untersuchten Varianten. Dabei wurden für die leichten Zugarbeiten (V 1, 3, 5, 6, und 7) 1,97 MJ * h⁻¹ und für die schweren Zugarbeiten (V 2 und 4) 3,94 MJ * h⁻¹ für die Zugarbeit kalkuliert.

Tabelle 3-50: Energiebedarf der untersuchten Varianten nach Werten von MEYER & COENEN (2002) (MJ DE * ha⁻¹)

Variante	Bezeichnung	Arbeitszeit (h/ha)	Ø Zugkraftbedarf (N)	Energiebedarf (MJ DE * ha ⁻¹) für			
				Erhaltung	Eigenbewegung	Zugarbeit	Gesamt
1	GM 130 B	1,89	1.255	14,89	24,00	7,45	46,34
2	PC 165 B	1,45	2.355	11,43	18,00	11,43	40,86
3	PC 165 M	1,45	1.154	11,43	18,00	5,71	35,14
4	PC 165 B Zw	1,59	2.684	12,53	18,00	12,53	43,06
5	PC 165 M Zw	1,39	1.335	10,95	18,00	5,48	34,43
6	PC 190 M	1,28	1.157	10,09	16,62	5,04	31,75
7	PC 240 M	1,00	1.300	7,88	12,70	3,94	24,52

Beim Vergleich dieser Ergebnisse mit denen des vorliegenden Versuchs fällt auf, dass die Werte für den Erhaltungs- sowie für den Zusatzenergiebedarf für die Eigenbewegung bei MEYER & COENEN (2002) nur geringfügig niedriger sind als im vorliegenden Versuch (vgl. Tabelle 3-). Die Werte für den Zusatzenergiebedarf für die Zugarbeit fallen dagegen um ein Vielfaches geringer aus. Es scheint, dass die Annahme, für die zu leistende Arbeit 50 % - 100 % des Erhaltungsenergiebedarfs in Ansatz zu bringen, falsch ist. Der Wert liegt nach den vorliegenden Ergebnissen zwischen 287 % (V 6) und 580 % (V 4). Würde man diese hohen Werte anhand der für die verschiedenen Varianten ermittelten Flächenleistungen auf einen 8-Stunden-Arbeitstag hochrechnen, so kämen Energiebedarfe dabei heraus, die nicht mehr durch Futteraufnahme zu decken wären. In der Literatur wird der Zusatzenergiebedarf für die zu leistende Arbeit bei Zugtieren meist mit Werten bis zum 1,8-fachen Erhaltungsenergiebedarf angegeben, bei großen Zugpferden, die den ganzen Tag über arbeiten, kann der Wert bis zum 2,4-fachen betragen (BRODY 1945, LAWRENCE & STIBBARDS 1990, PEARSON & DIJKMAN 1994, PEARSON & LAWRENCE 1997).

Um zu praxisrelevanten und nachvollziehbaren Aussagen zu kommen, ist daher eine andere Herangehensweise notwendig. Zum einen kann ein Pferd nicht beliebig viel fressen und dadurch beliebig viel Energie aufnehmen, um diese dann in Form von Arbeit wieder abzugeben. Zum anderen muss der Erhaltungsenergiebedarf für die Stunden des Tages, in denen keine Arbeit geleistet wird, auf die geleisteten Arbeitsstunden umgelegt werden.

Denn das Pferd verbraucht - im Gegensatz zum Schlepper - auch dann Energie, wenn es nicht arbeitet. Die geleistete Arbeit macht beim Pferd eine gewisse Regenerationszeit notwendig, und die Futterraufnahme beansprucht Zeit, die erheblich länger ist als der Tankvorgang beim Schlepper. Diese Regenerationszeit ist notwendige Voraussetzung für die Arbeitsleistung des Pferdes, daher muss der Erhaltungsenergiebedarf für diese Nicht-Arbeitsstunden auf die geleisteten Arbeitsstunden umgelegt werden.

Somit muss in umgekehrter Weise gerechnet werden: Ausgehend von einer Futterrationsration mit maximalem Energiegehalt, die das betreffende Pferd pro Tag aufnehmen kann, kann durch Subtraktion des Erhaltungsenergiebedarfs die für die Arbeit pro Tag maximal zur Verfügung stehende Energiemenge berechnet werden. Unter Bezug auf die für die jeweilige Arbeit notwendige Zusatzenergie je Hektar (für Eigenbewegung + Zugkraftaufbringung) kann dann die maximal bearbeitbare Fläche pro Tag berechnet werden.

Eine mögliche tägliche Futterrationsration für ein 850 kg Kaltblutpferd wie in den vorliegenden Versuchen eingesetzt, könnte bei schwerer Arbeit aus 15 kg Heu plus 8 kg Hafer bestehen. MEYER & COENEN (2002) geben als Energiegehalte von grasreichem Wiesenheu aus dem ersten Schnitt 9,4 MJ * kg⁻¹ und für Hafer 11,5 MJ * kg⁻¹ an. Die Futterrationsration würde demnach 233 MJ verdauliche Energie beinhalten, ein Wert, der sich in dieser Größenordnung auch in der Literatur wieder findet (z.B. NEUSCHULZ 1956). Von diesem Wert muss der Erhaltungsenergiebedarf von 112,34 MJ pro Tag abgezogen werden, sodass dem einzelnen Pferd 120,66 MJ verdauliche Energie pro Tag für die Erbringung der Arbeit zur Verfügung stehen. Für den untersuchten Zweispänner ist es die doppelte Menge, also 241,32 MJ. Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich für die untersuchten Varianten die in Tabelle 3-5052 dargestellten bearbeitbaren Flächen pro Tag.

Tabelle 3-51: Energiebedarf der untersuchten Varianten nach eigenen Berechnungen im Vergleich zu Werten nach MEYER & COENEN (2002) (MJ DE * ha⁻¹)

geringfügige Abweichungen von den Werten in Tabelle 3-33 im Ergebnisteil beruhen auf Rundungsfehlern

		Energiebedarf (MJ DE * ha ⁻¹)							
		Erhaltung		Lokomotion		Zugkraft		Gesamt	
Variante	Bezeichnung	eigene Berechnung	MEYER & COENEN 2002	eigene Berechnung	MEYER & COENEN 2002	eigene Berechnung	MEYER & COENEN 2002	eigene Berechnung	MEYER & COENEN 2002
1	GM 130 B	17,69	14,89	34,99	24,00	53,85	7,45	106,53	46,34
2	PC 165 B	13,57	11,43	26,24	18,00	75,76	11,43	115,57	40,86
3	PC 165 M	13,57	11,43	26,24	18,00	37,11	5,71	76,92	35,14
4	PC 165 B Zw	14,89	12,53	26,24	18,00	86,31	12,53	127,44	43,06
5	PC 165 M Zw	13,01	10,95	26,24	18,00	42,96	5,48	82,21	34,43
6	PC 190 M	11,98	10,09	24,22	16,62	34,37	5,04	70,57	31,75
7	PC 240 M	9,36	7,88	18,52	12,70	29,51	3,94	57,39	24,52

iese Darstellung bestätigt noch einmal deutlich die bisher gefundenen Ergebnisse. Die Vorderwagen-Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle sind durch den hohen Energiebedarf in ihrer Leistungsfähigkeit sehr limitiert. Lediglich 2,15 ha (V 4) bzw. 2,37 ha (V 2) können pro Tag bearbeitet werden, dafür wird eine Arbeitszeit von

3,4 h benötigt. Bei den Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle steigt die bearbeitbare Fläche mit zunehmender Arbeitsbreite von 3,81 ha (V 3) über 4,13 ha (V 6) auf 5,03 ha pro Tag (V 7). Der Arbeitszeitbedarf für diese Flächen verhält sich gegenläufig und sinkt von 5,53 h (V 3) über 5,29 h (V 6) auf 5,03 h (V 7). D. h. mit dem größeren Mähwerk kann in kürzerer Zeit eine größere Fläche bearbeitet werden.

Tabelle 3-52: Bearbeitbare Fläche pro Tag (ha * d⁻¹) und dafür notwendige Arbeitszeit (h) für die untersuchten Varianten

Berechnung anhand zur Verfügung stehender Energie (s. Text)

Variante	Bezeichnung	verfügbare Energie für Arbeit (MJ DE * d ⁻¹)	Zusatzenergiebedarf ZEP für Arbeitserbringung (MJ DE * d ⁻¹)	maximal bearbeitbare Fläche (ha * d ⁻¹)	ermittelte Flächenleistung (ha * h ⁻¹)	Zeitbedarf für maximal bearbeitbare Fläche (h)
1	GM 130 B	241,32	88,84	2,72	0,53	5,14
2	PC 165 B	241,32	102,00	2,37	0,69	3,43
3	PC 165 M	241,32	63,35	3,81	0,69	5,53
4	PC 165 B Zw	241,32	112,55	2,15	0,63	3,40
5	PC 165 M Zw	241,32	69,20	3,49	0,72	4,85
6	PC 190 M	241,32	58,59	4,13	0,78	5,29
7	PC 240 M	241,32	48,03	5,03	1,00	5,03

Für den Vergleich mit dem Schlepper zeigt Tabelle 3-53 den Gesamtenergiebedarf GEP je Hektar der Pferdevarianten unter Einschluss des Erhaltungsenergiebedarfs EEP der Nicht-Arbeitszeit. Hierzu wird die Arbeitszeit für die pro Tag maximal bearbeitbare Fläche von den 24 Stunden des Tages abgezogen, dadurch ergibt sich die Dauer der Nicht-Arbeitszeit. Multipliziert man diese mit dem Erhaltungsenergiebedarf EEP von 9,36 MJ*h⁻¹ für beide Pferde zusammen (vgl. Kapitel 3.2.1.6), dann ergibt sich der Erhaltungsenergiebedarf EEP pro Tag für die Nicht-Arbeitszeit. Addiert man diesen wiederum zum Gesamtenergiebedarf GEP für die Arbeitszeit, so ergibt sich der Gesamtenergiebedarf GEP pro Tag. Wird dieser umgerechnet auf die pro Tag maximal bearbeitbare Fläche, so ergibt sich der Gesamtenergiebedarf GEP pro Hektar unter Einschluss der Nicht-Arbeitszeit (s. Tabelle 3-53, letzte Spalte).

Um die Pferde- und die Schleppervarianten direkt miteinander vergleichen zu können, werden die Ergebnisse aus Tabelle 3-53 dem Gesamtenergiebedarf der Schleppervarianten gegenübergestellt (vgl. Tabelle 3-33). Die Ergebnisse zeigt Tabelle 3-54.

Wird mit reiner Pferdekraft gearbeitet, so ist dies bei Beschränkung auf die von den Pferden maximal pro Tag bearbeitbare Fläche energetisch selbst dann noch günstiger (V 1) bzw. nahezu gleichwertig (V 2 und V 4) zur Bearbeitung derselben Fläche mit dem Schlepper, wenn man den Erhaltungsenergiebedarf der Pferde außerhalb der Arbeitszeit auf die bearbeitete Fläche mit aufschlägt. Auch die Pferdevariante mit dem 2,40 m Mähwerk (V 7) schneidet bei dieser Betrachtungsweise energetisch besser ab als die Schleppervariante mit demselben Mähwerk. Die Pferdevariante mit dem 1,90 m Mähwerk (V 6) benötigt nur geringfügig mehr Energie als Variante 8, während Variante 3 und Variante 5 demgegenüber deutlich schlechter zu bewerten sind und sich dem mit Abstand höchsten Energiebedarf nähern, den die Schleppervariante mit dem Scheibenmähwerk (V 9) benötigt.

Tabelle 3-53: Gesamtenergiebedarf GEP der Pferdevarianten unter Einschluss des Erhaltungsenergiebedarfs EEP der Nicht-Arbeitszeit bei maximal pro Tag zu bearbeitender Fläche (MJ * ha⁻¹)

*EEP pro Tag = 224,68 MJ * d⁻¹ ± 9,36 MJ * h⁻¹; für beide Pferde zusammen
(vgl. Kapitel 3.2.1.6)*

*EG für ha_{max} = EG Variante pro Hektar (vgl. Tabelle 3-33) * ha_{max}*

Variante	1	2	3	4	5	6	7
Bezeichnung	GM 130 B	PC 165 B	PC 165 M	PC 165 B Zw	PC 165 M Zw	PC 190 M	PC 240 M
Maximal bearbeitbare Fläche Pferde (ha _{max} * d ⁻¹)	2,72	2,37	3,81	2,15	3,49	4,13	5,03
Zeitbedarf für ha _{max} * d ⁻¹ (h)	5,14	3,43	5,53	3,40	4,85	5,29	5,03
Resultierende Nicht-Arbeitszeit (h * d ⁻¹)	18,86	20,57	18,47	20,60	19,15	18,71	18,97
Gesamtenergiebedarf EG für ha _{max} (MJ)	289,76	273,90	734,64	274,00	739,32	731,09	724,37
Erhaltungsenergiebedarf EEP Nicht-Arbeitszeit (MJ)	176,53	192,54	172,88	192,82	179,24	175,13	177,56
Gesamtenergiebedarf EG für ha _{max} inkl. EEP Nicht-Arbeitszeit (MJ)	466,29	466,44	907,52	466,82	918,56	906,22	901,93
Gesamtenergiebedarf EG inkl. EEP Nicht-Arbeitszeit (MJ * ha ⁻¹)	171,43	196,81	238,19	217,13	263,20	219,42	179,31

Tabelle 3-54: Gesamtenergiebedarf GEP der Pferde- und der Schleppervarianten unter Einschluss des Erhaltungsenergiebedarfs EEP der Pferde für die Nicht-Arbeitszeit (MJ * ha⁻¹)

Pferdevarianten: vgl. Tabelle 3-53, letzte Zeile

Schleppervarianten: vgl. Tabelle 3-33

Variante	Bezeichnung	Gesamtenergiebedarf EG (MJ * ha ⁻¹)
1	GM 130 B	171,43
2	PC 165 B	196,81
3	PC 165 M	238,19
4	PC 165 B Zw	217,13
5	PC 165 M Zw	263,20
6	PC 190 M	219,42
7	PC 240 M	179,31
8	S 240	194,21
9	S 290	312,02

Durch diese Art der Berechnung wird aber auch deutlich, dass generell der alleinige Vergleich der Flächenleistung zwischen Pferd und Schlepper nicht ausreichend ist, da die einem Pferd pro Tag zur Verfügung stehende Energiemenge limitiert ist, während ein Schlepper theoretisch 24 h pro Tag arbeiten kann, lediglich unterbrochen von kurzen Tankstopps. Somit wird die mögliche Tagesleistung beim Schlepper immer deutlich über der mit Pferden erzielbaren liegen. Um beim Leistungsvergleich Pferd-Schlepper in einem konkreten Fall zu praxisrelevanten Antworten zu gelangen, muss daher immer auch die insgesamt zu leistende Arbeit berücksichtigt werden.

Ergänzend sei daran erinnert, dass auch der arbeitende Mensch sowohl hinsichtlich der für die Arbeit zur Verfügung stehenden Energiemenge, als auch in Bezug auf die Notwendigkeit von Pausen und Regenerationsphasen dem Pferd sehr ähnelt. Dies wird bei der Schlepperarbeit gerne übergangen, die Arbeitszeit richtet sich hier nach der Menge der zu verrichtenden Arbeit bzw. daran aus, dass der teure Schlepper möglichst wenig still stehen soll, damit er sich besser rentiert. So gesehen kann Pferdearbeit zu einem insgesamt für den Menschen zuträglicheren Arbeitsprozess führen, denn sie zwingt den Menschen, die Verrichtung seiner Arbeit den Bedürfnissen des Pferdes und damit seinen eigenen Bedürfnissen anzupassen.

3.3.6.3 Emissionen

Auch bei den Emissionen müssen pferdeseitig die Emissionen während der Nicht-Arbeitszeit berücksichtigt und auf die pro Tag maximal bearbeitbare Fläche umgerechnet werden. Für die Stickstoff-Emissionen der Pferde ergeben sich die Werte durch die Umrechnung der Tagesemission des Zweispanners von 442,08 g N ($9,21 \text{ g} * \text{Pferd}^{-1} * \text{h}^{-1} * 24 \text{ h} * 2 \text{ Pferde}$; vgl. Kapitel 3.1.6.5) auf die pro Tag maximal bearbeitbare Fläche. Die Methan-Emissionen der Pferde errechnen sich entsprechend aus der Tages-Methan-Menge des Zweispanners von 172,32 g CH₄ ($3,59 \text{ g CH}_4 * \text{Pferd}^{-1} * \text{h}^{-1} * 24 \text{ h} * 2 \text{ Pferde}$; vgl. Kapitel 3.1.6.5). Hier müssen bei den Varianten mit Aufbaumotor (V 3 Und V 5 bis 7) noch die CH₄-Emissionen des Aufbaumotors addiert werden (vgl. Tabelle 3-37).

Tabelle 3-55 zeigt die so berechneten Gesamt-Emissionswerte aller Varianten unter Einschluss der CH₄- und der N-Emissionen der Pferde während der Nicht-Arbeitszeit.

Während beim CH₄-Ausstoß die beiden Schleppevarianten natürlich nach wie vor die mit Abstand geringsten Werte aufweisen, da sich hier ja nichts ändert, ergibt sich unter den pferdegezogenen Varianten eine Reihung, die sich von Tabelle 3-39 etwas unterscheidet. Während in Tabelle 3-39 beim CH₄-Ausstoß die Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle durchweg höhere Werte aufwiesen, da bei ihnen zum CH₄-Ausstoß der Pferde noch der des Motors hinzu kommt, kehrt sich die Reihenfolge bei Einbeziehung des CH₄-Ausstoßes während der Nicht-Arbeitszeit um. Da der CH₄-Ausstoß der Pferde in Arbeit und in Ruhe gleich hoch ist, sinkt der Ausstoß je Hektar, je größer die pro Tag bearbeitbare Fläche ist. Den geringsten Wert weist daher jeweils Variante 7 auf, gefolgt von Variante 6, Variante 3 und Variante 5. Dann folgen die Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle, Variante 1, dann Variante 2 und schließlich Variante 4.

Auch der N-Ausstoß der Pferde unterscheidet sich nicht in Arbeit und in Ruhe. Da hier aber keine Emissionen des Motors hinzukommen, bestimmt lediglich die Größe der bearbeitbaren Fläche die Reihung der Varianten: je größer diese Fläche, desto geringer die N-Emissionen pro Hektar. Die Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle haben auch bei dieser Betrachtung die geringeren Werte, in der Reihung tauschen gegenüber Tabelle 3-39 lediglich die Varianten 3 und 5 ihre Plätze: bei reiner Betrachtung der Arbeitszeit führt die höhere Flächenleistung von Variante 5 zu einem geringeren N-Ausstoß (vgl. Tabelle 3-39); nimmt man die Emissionen während der Nicht-Arbeitszeit mit hinzu, so wirkt sich die aufgrund des höheren Zugkraftbedarfs niedrigere pro Tag bearbeitbare Fläche von Variante 5 aus und führt zu einem höheren Wert gegenüber Variante 3. Der gleiche Grund führt bei den Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle dazu, dass sich die Reihenfolge

gegenüber Tabelle 3-39 auch hier ändert. Variante 1 hat jetzt den geringsten Emissions-Wert, gefolgt von Variante 2 und Variante 4, während bei Betrachtung ohne Nicht-Arbeitszeit Variante 1 aufgrund der geringeren Flächenleistung einen höheren Emissionswert hat als Variante 2 und 4, deren Reihenfolge bleibt. Die Ergebnisse des Parzellenversuchs zeigen, dass die Pferdevarianten mit Ausnahme von Methan bei allen Schadstoffen erheblich besser abschneiden als die Schleppervarianten (vgl. Tabelle 3-55). Der Einsatz von Arbeitspferden ist somit eine Möglichkeit, aktiven Klimaschutz zu betreiben. FAROOQUEE et al. (2008) zeigen in ihrer Untersuchung am Beispiel der Himalaya-Region auf, dass der Einsatz von Tragtieren anstelle von Motorfahrzeugen in nennenswerter Weise helfen kann, CO₂ einzusparen, und dass die Tragtiere sich somit in Einklang mit dem Kyoto-Protokoll zum Klimaschutz befinden. Gleiches gilt auch für den Einsatz von Zugtieren anstelle von Schleppern, wie die vorliegenden Ergebnisse zeigen.

Tabelle 3-55: Gesamt-Methan (CH₄)- und Gesamt-Stickstoff (N)-Emissionen der Pferde- und der Schleppervarianten unter Einschluss der CH₄- und N-Emissionen der Pferde während der Nicht-Arbeitszeit (g * ha⁻¹)

CH₄: Gesamt-Tagesemission Pferde = 172,32 g (3,59 g CH₄ * Pferd⁻¹ * h⁻¹ * 24 h * 2 Pferde)
 N: Gesamt-Tagesemission Pferde = 442,08 g (9,21 g N * Pferd⁻¹ * h⁻¹ * 24 h * 2 Pferde)

Variante	Bezeichnung	Maximal bearbeitbare Fläche Pferde (ha _{max} * d ⁻¹)	CH ₄ -Gesamtemission Pferde einschließlich Nicht-Arbeitszeit bei ha _{max} * d ⁻¹ (g * ha ⁻¹)	CH ₄ -Emissionen Motor (g * ha ⁻¹)	CH ₄ -Gesamtemission Variante (g * ha ⁻¹)	N-Gesamtemission Pferde einschließlich Nicht-Arbeitszeit bei ha _{max} * d ⁻¹ (g * ha ⁻¹)
1	GM 130 B	2,72	63,35	-	63,35	162,53
2	PC 165 B	2,37	72,71	-	72,71	186,53
3	PC 165 M	3,81	45,23	9,27	54,50	116,03
4	PC 165 B Zw	2,15	80,15	-	80,15	205,62
5	PC 165 M Zw	3,49	49,38	10,37	59,75	126,67
6	PC 190 M	4,13	41,72	8,52	50,24	107,04
7	PC 240 M	5,03	34,26	6,93	41,19	87,89
8	S 240	-	-	0,81	0,81	-
9	S 290	-	-	1,29	1,29	-

Quelle: eigene Berechnung auf Basis von EGGLESTONE et al. (2006)

Die vorgenommene Berechnung der Emissionen kann allerdings nur ein erster Hinweis auf die tatsächlichen Verhältnisse sein. Um genauere Werte zu erhalten, müssten die tatsächlich produzierten Mengen im Versuch gemessen werden, was vor allem bei Feldversuchen mit Zugtieren sehr schwierig ist (LAWRENCE & PEARSON 1989, CLAR 1991, LAWRENCE et al. 1991).

3.3.7 Bodenbelastung

Vergleicht man zunächst die Anzahl Schritte der Pferde bei den untersuchten Varianten (s. Tabelle 3-40), so wird deutlich, dass sowohl der Bodenantrieb verglichen mit dem Motorantrieb der Zapfwelle (V 2 vs. V 3 und V 4 vs. V 5) als auch in einem geringeren Maße die Montage der Zwillingsräder (V 3 vs. V 5) zu einer erhöhten Schrittzahl führen. Dies dürfte durch den erhöhten Zugkraftbedarf bedingt sein, ein bekanntes Phänomen: auch wenn wir Menschen eine schwere Last ziehen oder schieben sollen, machen wir automatisch kleinere Schritte als wenn wir ohne diese oder mit einer deutlich geringeren Last dieselbe Strecke beschreiten müssten.

Die jeweils höhere Anzahl Schritte führt in den drei betrachteten Fällen zu einer höheren Bodenbelastung der Varianten (s. Tabelle 3-42). Allerdings ist dabei der Effekt der Zwillingsräder (V 3 vs. V 5) größer als der Effekt des Boden- gegenüber dem Motorantrieb der Zapfwelle (V2 vs. V3 sowie V 4 vs. V 5). Hier macht sich die durch die Zwillingsreifen um 12 cm größere Spurbreite der Hinterräder des Vorderwagens bemerkbar (vgl. Tabelle 3-41).

Erwartungsgemäß nimmt die Bodenbelastung der Vorderwagen-Varianten mit zunehmender Arbeitsbreite ab, die Unterschiede zwischen den Mähwerksgrößen sind sowohl bei der Auswertung der Einzeljahre, als auch bei der Auswertung über beide Versuchsjahre hinweg signifikant. Der Grasmäher mit 1,30 m Arbeitsbreite erreicht aufgrund der deutlich geringeren Spurbreite Werte, die nahe denen des 1,90 m-Mähwerks (V 6) liegen. Die Schleppervarianten verursachen aufgrund der verglichen mit allen Pferdevarianten deutlich höheren Spurbreite eine größere Bodenbelastung. Das Scheibenmähwerk (V 9) verursacht dabei aufgrund der größeren Arbeitsbreite eine geringere Bodenbelastung als das Doppelmesser-Mähwerk (V 8). Sowohl die Unterschiede zwischen Schlepper- und Pferdevarianten, als auch die Unterschiede zwischen den beiden Schleppervarianten sind signifikant. Der Vergleich zwischen Variante 7 und Variante 8 zeigt, dass die Bodenbelastung der Pferdevariante bei 40 % derjenigen der Schleppervariante mit demselben Mähwerk liegt.

Die Ergebnisse weisen auf das große Potenzial hin, dass der Arbeitspferdeeinsatz für den Schutz des Bodens vor Verdichtung bietet. Der wesentlich geringere Anteil der betretenen und überrollten Fläche (Fahrspurflächenanteil; WYSS 1999) bei den Pferdevarianten im Gegensatz zu den Schleppervarianten zeigt, im Verbund mit den aus der Literatur bekannten Tatsachen, dass vor allem der Schutz des Bodens vor Verdichtungen ein gewichtiges Argument für den Einsatz von Arbeitspferden im Ökologischen Landbau und darüber hinaus darstellt.

WYSS (1999) wie auch CEBALLOS et al. (2000) zeigen, dass der Fahrspurflächenanteil bei Pferde- anstelle von Schlepperarbeit wesentlich geringer ist, selbst dann, wenn die Arbeitsbreite beim Schlepper deutlich größer ist.

JACKSON (1977) konnte bei vergleichenden Untersuchungen in den USA zeigen, dass Böden, die von Anfang an ausschließlich von Amish-Bauern bewirtschaftet und somit noch nie von schweren Maschinen befahren wurden, den konventionell bewirtschafteten Böden in jeder Hinsicht (Struktur, Wasser- und Gashaushalt, Nährstoffe, Humusgehalt etc.) überlegen waren, selbst wenn letztere mittels konservierender Bodenbearbeitung („no-till“) bewirtschaftet wurden.

MORDHORST (2009) hat den Nachweis geführt, dass selbst Schleppertechnik, die in Bezug auf das Gewicht mit den Arbeitspferden vergleichbar bzw. sogar leichter ist, den Boden schädigt, während die Bewirtschaftung mit den schwereren Arbeitspferden keine Schäden am Boden verursacht. Im Gegenteil, bereits nach dreijähriger Bewirtschaftung mit Pferden zeigten sich im Boden erste Verbesserungen, begann der Boden zu regenerieren, obwohl er vorher jahrzehntelang nur mit Schleppern bewirtschaftet wurde, die ein geringeres Gewicht hatten als das nun verwendete Arbeitspferdegespann. Vor allem im Unterboden war die positive, Gefüge schonende Wirkung der Pferde gegenüber dem Schlepper messbar. Verantwortlich für die negativen Auswirkungen des Schleppers auf den Boden scheinen vor allem Schlupf und Motorvibrationen zu sein. Spätestens mit dieser

Untersuchung ist der Nachweis erbracht, dass beim Vergleich Schlepper - Pferd der in der Regel höhere Kontaktflächendruck des Pferdehufs verglichen mit dem Schlepperreifen keine Rolle spielt, selbst dann nicht, wenn das Gesamtgewicht der Pferde das des Schleppers übertrifft.

Auch wenn im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine konkreten Messungen zur Bodenverdichtung gemacht werden konnten, können mit Hilfe der Literatur und einigen bekannten Parametern der untersuchten Varianten die unterschiedlichen Verdichtungswirkungen von Pferdehuf und Schlepperrad auf einen Boden mit bekannten Eigenschaften zu berechnet werden. Dazu betrachtet man, ausgehend vom Kontaktflächendruck an der Bodenoberfläche, das Druckfortpflanzungsverhalten in den einzelnen Bodenhorizonten bis zum mineralischen Unterboden. Dieses Druckfortpflanzungsverhalten kann mit nachfolgender Formel berechnet werden (DVWK 1995):

$$\delta_z = \delta_0 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{r}{z} \right)^2 + 1 \right]^{v_k}}} \right)$$

Hierbei bedeuten:

- δ_z = Druck in der Tiefe z (kPa)
- δ_0 = Kontaktflächendruck an der Oberfläche (kPa)
- r = Radius der Lastfläche, berechnet als Äquivalentradius eines Kreises (cm)
- z = Bodentiefe (cm)
- v_k = Konzentrationsfaktor

Der Konzentrationsfaktor v_k ist ein Maß für die Druckfortpflanzung im Boden. Je höher der Wert von v_k , desto instabiler ist der betreffende Bodenhorizont, der dem Druck an seiner Oberfläche dadurch weniger entgegenzusetzen und ihn weniger stark horizontal auffangen kann. Die Verdichtung reicht dadurch in einem enger um die Lotrechte begrenzten Bodenvolumen bis in eine größere Bodentiefe hinab. Je kleiner der Wert von v_k ist, desto mehr von dem Druck an der Oberfläche wird horizontal im betreffenden Bodenhorizont verteilt und desto geringer ist daher der Druck an der Oberfläche des unterhalb folgenden Bodenhorizonts. Der Konzentrationsfaktor ist abhängig von der Bodenart, der Vorbelastung (= Vorverdichtung), dem Feuchtegehalt des Bodens, dem Äquivalentdurchmesser der Lastfläche und dem Kontaktflächendruck (DVWK 1995).

Für die in der vorliegenden Arbeit eingesetzten Pferde und den Schlepper ergeben sich aus den bekannten Daten (vgl. Tabelle 3-3 und Tabelle3-41) für r und δ_0 folgende Werte:

Tabelle 3-56: Radius der Lastfläche (r) sowie Kontaktflächendruck an der Bodenoberfläche (δ_0) der in den Versuchen eingesetzten Pferde und des Schleppers

$1 \text{ kg} \cong 9,81 \text{ N}; 1 \text{ kPa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$

	Masse je Huf bzw. Rad		Lastfläche		r	δ_0
	kg	N	cm ²	m ²	cm	kPa
Pferd	283,33	2.779,47	297,00	0,0297	9,72	93,58
Schlepper vorne	1.125,00	11.036,25	1.293,75	0,129375	20,29	85,30
Schlepper hinten	1.125,00	11.036,25	1.911,00	0,1911	24,66	57,75

Hierbei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass sich die Masse der Pferde im Schritt gleichmäßig auf drei Hufe und die Masse des Schleppers gleichmäßig auf alle vier Räder verteilt.

Die unterschiedliche Auswirkung von Schlepper und Pferd auf die Verdichtung des Bodens soll hier anhand einer Parabraunerde aus Löß mit den folgenden Eigenschaften berechnet werden (DVWK 1995):

Tabelle 3-57: Parameter einer Parabraunerde aus Löß

- Horizonte:*
- Ap = durch Bodenbearbeitung geprägter mineralischer Oberboden*
 - Al = lessivierter (durch Auswaschung an Ton verarmter) mineralischer Oberboden*
 - Bt = mit Ton (durch Einwaschung aus Al-Horizont) angereicherter mineralischer Unterboden*
 - Cv = schwach verwitterter mineralischer Unterboden*
- Bodenarten:* *Ul = lehmiger Schluff, Lu = schluffiger Lehm*

Horizont	Ap	Al	Bt	Cv
Tiefe (cm)	0 - 30	30 - 50	50 - 80	> 80
Mächtigkeit z (cm)	30	20	30	-
Bodenart	Ul	Ul	Lu	Ul
Vorbelastung Pv (kPa)	55	20	100	60
Konzentrationsfaktor vk	5,0	4,1	3,3	4,1

Quelle: DVWK 1995

Berechnet man anhand dieser Werte das Druckfortpflanzungsverhalten bei Schlepper und Pferd in den oberen drei Horizonten des Bodens, so ergibt sich folgendes Bild:

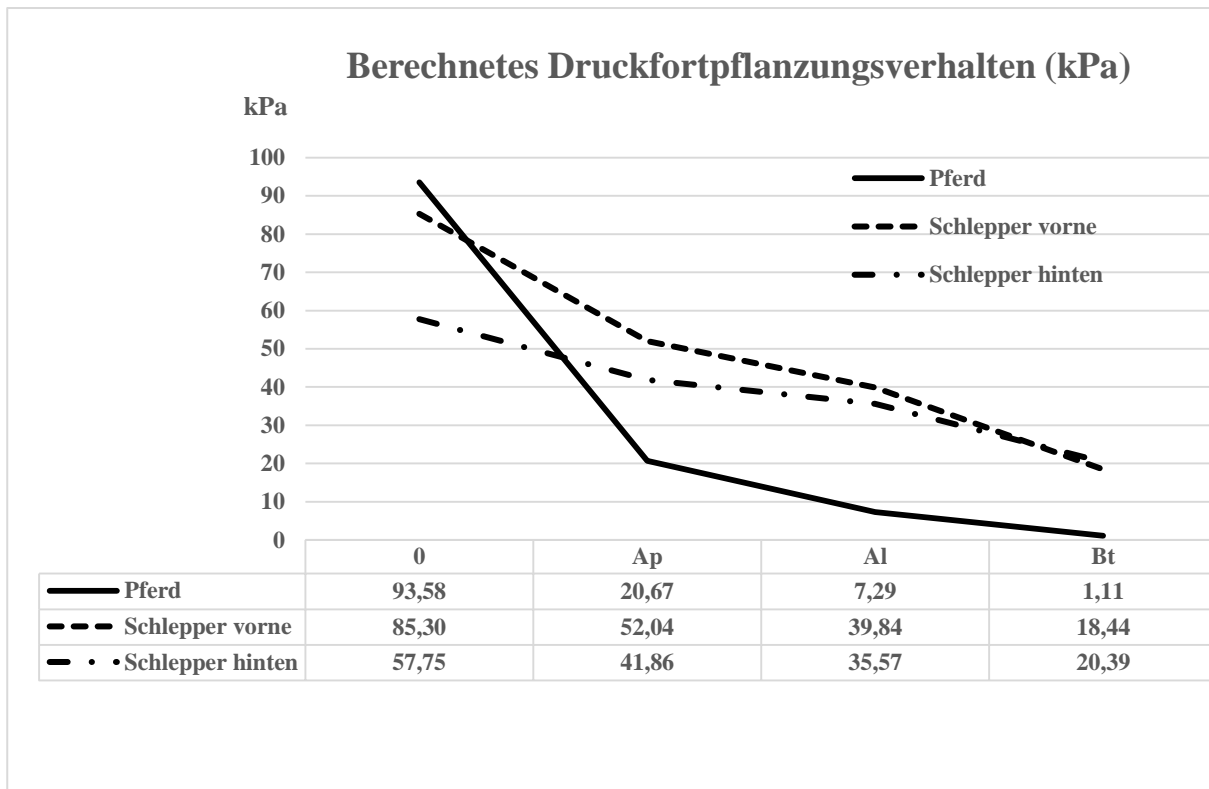


Abbildung 3-31: Berechnetes Druckfortpflanzungsverhalten für Schlepper und Pferd in einer Parabraunerde aus Löß (kPa)

Quelle: DVWK 1995 und eigene Berechnungen

Abbildung 3-32 zeigt, dass der Kontaktflächendruck der Pferdehufe größer ist als der unter den Vorder- wie auch unter den Hinterreifen des Schleppers. Bereits im Ap-Horizont wird dieser Druck deutlich schneller abgebaut als die Drucke unter den Schlepperreifen, so dass bereits in einer Bodentiefe von 30 cm, am Ende des Ap-Horizontes, der Druck unter den Pferdehufen nicht einmal mehr halb so stark ist, wie unter den Schlepperreifen. An der unteren Grenze des Al-Horizontes in 50 cm Bodentiefe ist der Druck unter dem Pferdehuf bereits zu über 92 % abgebaut und an der unteren Grenze des Bt-Horizontes in 80 cm Bodentiefe kaum noch messbar. Der Kontaktflächendruck der Vorderreifen des Schleppers ist deutlich höher als der der Hinterreifen. Der Druck wird in den ersten beiden Horizonten geringfügig schneller abgebaut als der der Hinterreifen, so dass die Druckkurven sich im Verlaufe des Al-Horizontes treffen. Insgesamt zeigen die flacheren Verlaufskurven einen deutlich geringeren Druckabbau unter den Schlepperreifen, vor allem im Ap- Horizont. Während der Druck unter dem Pferdehuf an der unteren Grenze des Bt-Horizonts nahezu abgebaut ist, liegt er bei den Schlepperreifen immer noch bei ca. 20 kPa und damit bei 23 % (Vorderreifen) bzw. 35 % (Hinterreifen) des Kontaktflächendruckes an der Bodenoberfläche.

Die Auswirkungen dieser Drucke auf die Verdichtung des Bodens lässt sich aus dem Quotienten der Vorbelastung des betreffenden Horizonts und des Drucks an seiner Oberfläche ableiten (DVWK 1995). Ist der Druck an der Horizontoberfläche größer als die Vorbelastung ($P_v / \delta_0 < 1$), kommt es zu einer weiteren Verdichtung des Horizonts. Ist die Vorbelastung größer als der Druck an der Horizontoberfläche ($P_v / \delta_0 > 1$), ist der Boden stabil und wird nicht weiter verdichtet. „Bei einem Quotienten kleiner als 0,8 ist der Boden als instabil einzustufen“ (DVWK 1995, S. 11). Tabelle 3-58 zeigt die Ergebnisse für das hier betrachtete Beispiel.

Tabelle 3-58: Quotient aus Vorbelastung (Pv) des jeweiligen Horizontes und dem Druck an seiner Oberfläche (δ_0)

P_v/δ_0	Horizont			
	Ap	Al	Bt	Cv
Pferd	0,59	0,97	13,72	54,05
Schlepper vorne	0,64	0,38	2,51	3,25
Schlepper hinten	0,95	0,48	2,81	2,94

$P_v/\delta_0 > 1,5$:	sehr stabil, elastische Verformung
$P_v/\delta_0 = 1,2 - 1,5$:	stabil
$P_v/\delta_0 = 0,8 - 1,2$:	labil
$P_v/\delta_0 < 0,8$:	instabil, zusätzliche plastische Verformung

Quelle: DVWK 1995; eigene Berechnungen

Die Farbgebung der Tabelle zeigt, dass unter den Pferdehufen lediglich im Ap-Horizont eine deutliche Verdichtung stattfindet, während die weiteren Horizonte nur geringfügig (Al) bzw. gar nicht negativ beeinflusst werden. Die Werte für den Bt- und Cv-Horizont sind – verglichen mit dem Schlepper - sehr hoch, der Unterboden wird durch den Druck der Pferdehufe nicht tangiert.

Unter den Schlepperreifen werden sowohl der Ap- als auch der Al-Horizont beeinträchtigt. Während die Vorderreifen beide Horizonte deutlich verdichten, wird der Ap-Horizont von den Hinterreifen nur geringfügig negativ beeinflusst. Im Al-Horizont ist neben der Verdichtung durch die Vorderreifen eine ebenfalls verdichtende Wirkung durch die Hinterreifen zu konstatieren, die deutlich stärker ausfällt als die Verdichtung der Pferdehufe im Oberboden. Die Werte für den Bt- und den Cv-Horizont liegen nur geringfügig über dem Grenzwert zur Verformung, d.h., bei geringfügig instabileren Bodenverhältnissen ist auch der Unterboden verdichtungsgefährdet.

Die Ergebnisse dieser Betrachtung zeigen, dass Verdichtung unter den Pferdehufen lediglich im oberen Bodenbereich stattfindet, in dem natürliche (Schwellung, Schrumpfung, Kryoturbation, Wirkung der Pflanzenwurzeln) und bewirtschaftungsbedingte (Pflug, Grubber etc.) Faktoren die Verdichtungen leicht wieder aufbrechen können. Unter den Schlepperreifen reichen die Verdichtungen deutlich tiefer in Bereiche, in denen die Regeneration der Verdichtung deutlich länger dauert bzw. – zumindest in menschlichen Zeiträumen gedacht – zumindest teilweise irreversibel ist.

Der wesentliche Aspekt bei der Betrachtung der Auswirkungen von Pferd und Schlepper auf den Boden ist also der Unterschied zwischen der flächenhaften und tief in den Boden reichenden Verdichtung durch den Schlepper im Gegensatz zu den punktuellen, sich auf den Oberboden beschränkenden Verdichtungen durch das Pferd. Die punktuellen Verdichtungen durch die Pferdehufe sind „... schlicht zu klein ...“, um einen ökologisch spürbaren Schaden darzustellen.“ (SCHACK-KIRCHNER et al. 1993, S. 120; vgl. auch WALKER 1994). Hinzu kommen beim Schlepper als wesentliche Faktoren der Schlupf der Räder, der eine horizontale Verschiebung der Bodenpartikel bedingt und dadurch das Porensystem des Bodens zerschneidet, sowie die Gefüge destabilisierende Wirkung der Vibrationen des Schleppers, die bei anhaltender Maschinenarbeit zudem die Regeneration des Bodens durch natürliche Prozesse verhindern (HAKANSSON et al. 1987, ABEELS 1994, WIERMANN et al. 1999, WIERMANN et al. 2000, MORDHORST 2009).

Boden ist ein nicht vermehrbares Gut und die Grundlage der landwirtschaftlichen Produktion und der Ernährung der Menschheit. Das Thema Bodenverdichtung ist somit eines der dringendsten Probleme der Landwirtschaft (u.a. HAMZA & ANDERSON 2005).

Bereits BOLLING & SÖHNE (1982) haben nachgewiesen, dass die Theorie, höhere Maschinengewichte durch breitere Reifen abzufangen und dadurch Schäden im Boden zu vermeiden, nicht aufgeht. Vor allem die Verdichtungen im Unterboden sind durch die Maschinengewichte bedingt und lassen sich durch die Reifenbreite kaum beeinflussen. Die technischen Versuche, Bodenschäden trotz hoher Maschinengewichte zu vermeiden, dürfen als gescheitert betrachtet werden (z.B. EHLERS 2000, PLOEG et al. 2006). Auch wenn ökologische Bewirtschaftung und konservierende Bodenbearbeitung das Ausmaß von Verdichtungen durch schwere Maschinen mildern können (u.a. EHLERS et al. 2000, WIERMANN et al. 2000), führt letztlich doch kein Weg daran vorbei, die Radlasten deutlich zu verringern, eine Forderung, die von Seiten der Wissenschaft schon lange erhoben (u.a. HAKANSSON et al. 1987; vgl. auch WEBER 2003), von der Praxis jedoch weitgehend ignoriert wird.

Die Folgen der massiven Bodenverdichtungen in der Landwirtschaft betreffen nicht nur diese selber, u.a. durch ein schwächeres Pflanzenwachstum und geringere Erträge (z.B. GAULTNEY et al. 1982, GAMEDA et al. 1985), einen dadurch bedingten höheren Dünger- und Pestizidaufwand sowie eine stärkere Erosionsgefährdung des Oberbodens (z.B. YOUNG & VOORHEES 1982), um nur einige Effekte zu nennen. Durch die direkten wie die indirekten Folgen der Bodenverdichtung auf landwirtschaftlichen Flächen ist die gesamte Gesellschaft auf vielfältige Art und Weise betroffen (EHLERS 2000). Die negativen Auswirkungen reichen bis hin zu vermehrt auftretenden Hochwassern und den daraus resultierenden Schäden sowie einer Beförderung des Klimawandels (PLOEG et al. 1999 u. 2006).

Gegenwärtig besteht – analog zu den Entwicklungen in der konventionellen Landwirtschaft - auch im Ökologischen Landbau die Tendenz zu immer größeren Betrieben und damit einhergehend zunehmenden Maschinengewichten. Der Einsatz von Arbeitspferden stellt eine realistische Möglichkeit dar, den Boden *wirklich* vor Verdichtung zu bewahren und die Bodenfruchtbarkeit langfristig zu sichern, ja zu steigern. Dies wird durch die Literatur vielfach bestätigt (z.B. WEBER 1987, SCHACK-KIRCHNER et al. 1993, WALKER 1994, HAMPL 1998, WYSS 1999, FLEISCHER & SÜB 2002, VOBRINK 2005, MORDHORST 2009). Der Einsatz von Einachsmähern zur Bodenschonung kann aufgrund der begrenzten Flächenleistung nur auf sehr kleinen Flächen als Alternative in Betracht gezogen werden.

3.3.8 Physiologische Parameter Pferde

Erhöhte Werte bei den untersuchten physiologischen Parametern (Herzfrequenz, Atemfrequenz, Körpertemperatur und Schwitzverhalten) weisen allgemein auf eine größere Anstrengung der Pferde zur Verrichtung der Arbeit hin (u.a. GEHRING 1939, BRUNNER 1942, KRÜGER 1957, HOFFMANN 1992). Der Vergleich von Ergebnissen verschiedener Untersuchungen ist jedoch bei allen hier untersuchten Parametern nur bedingt möglich, da die äußeren Bedingungen (Witterung, Bodenbeschaffenheit, Umgebungseinflüsse, Charakter und Temperament der Pferde, Persönlichkeit des Fuhrmanns etc.) einen hohen Einfluss auf die konkrete Ausprägung der Parameter haben (z.B. KRÜGER 1957, EHRLEIN et al. 1973). Nach KRÜGER (1957) hat letztlich nur der Parameter Herzfrequenz einen gewissen Aussagewert für den Vergleich von Ergebnissen unterschiedlicher Untersuchungen. Nach MEYER (2010a) ist der Parameter Schwitzverhalten völlig ungeeignet zur Beurteilung der Belastung des Pferdes durch die geleistete Arbeit, denn „Die Menge des Schweißes, die nach außen abgegeben wird, richtet sich nach der Zahl der vorhandenen Primärhaarfollikel ..., diese ist für die meisten Rassen nicht bekannt oder falsch gezählt.“. Somit können Vergleiche der in der vorliegenden Untersuchung gefundenen Ergebnisse hinsichtlich der physiologischen Parameter mit anderen Untersuchungen nur erste Anhaltspunkte geben.

Beim Vergleich der untersuchten Varianten untereinander lassen sich nur insofern klare Unterschiede erkennen, als sich die bodengetriebenen Vorderwagen-Varianten durch deutlich höhere Werte gegenüber den übrigen Varianten auszeichnen. Verantwortlich dafür dürfte der erhöhte Zugkraftbedarf der Varianten 2 und 4 und die damit einhergehende größere Arbeitsleistung der Pferde sein. Die Unterschiede zwischen den motorgetriebenen Vorderwagen-Varianten sind so gering, dass eine detaillierte Analyse wenig sinnvoll ist (vgl. Tabelle 3-44 bis Tabelle 3-48).

3.3.8.1 Herzfrequenz

Die Herzfrequenz des Pferdes steigt bei Arbeitsbelastung, um mehr Blut durch den Körper zu pumpen und die Muskeln mit Sauerstoff zu versorgen. Der Ruhepuls liegt beim Pferd im Bereich von etwa 28 - 45 min⁻¹ (BUHLE 1923, HOFFMANN 1992), bei Kaltblütern in der Regel etwas höher als bei Warmblütern (HINTZ et al. 1989). Unter Belastung kann die Herzfrequenz auf das 6- bis 8-fache ansteigen (HOFFMANN 1992). Die Zunahme der Herzfrequenz ist dabei vor allem abhängig von der Arbeitsintensität; dabei besteht eine lineare Abhängigkeit der Herzfrequenz sowohl zur Geschwindigkeit des Pferdes (EHRLEIN et al. 1973) als auch zur geleisteten Zugkraft (GOTTLIEB et al. 1988). Zudem spielen die Thermoregulation des Organismus und der Trainingszustand sowie die Zugwilligkeit des Pferdes eine Rolle (GEHRING 1939, BRUNNER 1942, EHRLEIN et al. 1970, 1973, SCHULZ 2000). Die Aussage von BRUNNER (1942), dass auch die Höhe der Ruhfrequenz die Zunahme der Herzfrequenz unter Belastung beeinflusst, konnte von anderen Autoren nicht bestätigt werden (z.B. EHRLEIN et al. 1970, THOMAS et al. 1983). Die höchsten bei Pferden gemessenen Herzfrequenzwerte liegen im Bereich von 210 - 250 min⁻¹ (ART et al. 1996, HARBIG 2006). Die Höhe der maximalen Herzfrequenz eines Pferdes ist dabei unabhängig vom Trainingszustand (SCHULZ 2000).

HOFFMANN (1992) fand bei Kaltblutpferden mit Körpermassen von 750 kg bis 960 kg Ruhfrequenzen von 33 min⁻¹ bis 49 min⁻¹ und zitiert Werte weiterer Autoren zwischen 22 min⁻¹ und 65 min⁻¹. Bei der Arbeit im Wald (Holzrücken) ergaben sich Mittelwerte im Bereich von 61 min⁻¹ bis 100 min⁻¹. Die Maximalwerte lagen bei 106 min⁻¹ bis 167 min⁻¹. Als Mittelwert über alle Versuchstage und -pferde ergab sich ein Ruhepuls von 41 min⁻¹ sowie eine mittlerer Herzfrequenz von 85 min⁻¹, was einer mittleren Zunahme von 44 min⁻¹ (= 107 %) entspricht (HOFFMANN 1992).

SCHULZ (2000) untersuchte die Belastung von Kutschpferden unterschiedlicher Rassen beim Einsatz vor Planwagen. Die Ruheherzfrequenzen lagen bei den untersuchten Kaltblutpferden im Mittel zwischen 37 min⁻¹ und 43 min⁻¹, bei Werten von 32 min⁻¹ bis 51 min⁻¹. Unmittelbar nach unterschiedlich langen Fahrten mit durchschnittlichen Zugkraftwerten zwischen 540 N und 750 N wiesen 97 % aller untersuchten Pferde verschiedener Rassen Herzfrequenzen zwischen 40 min⁻¹ und 120 min⁻¹ auf, 90 % der Pferde hatten Herzfrequenzen um 100 min⁻¹.

Bei den chilenischen Zugpferden in der Untersuchung von PÉREZ et al. (1996) stieg die Herzfrequenz von 40 min⁻¹ in Ruhe beim Pflügen auf Werte um 118 min⁻¹. Die geleistete Zugkraft lag im Mittel bei 905 N, was 16,9 % des Körpergewichts der untersuchten Pferde entsprach, die durchschnittliche Geschwindigkeit lag bei 3,3 km * h⁻¹.

Diese Ergebnisse stimmen recht gut mit denen der vorliegenden Untersuchung überein. Die Ruhfrequenzen sind mit Werten zwischen 45 min⁻¹ und 60 min⁻¹ gegenüber den meisten Literaturwerten leicht erhöht (vgl. der Pferde Alphonse/Charlotte).

Tabelle 3-43), was darauf zurück zu führen ist, dass die Pferde durch das Mähen der jeweils vorhergehenden Parzellen bereits Arbeit geleistet hatten, während die Werte bei den übrigen Autoren vor Beginn der Tagesarbeit gemessen wurden. Auch die Werte für die mittlere Herzfrequenz (vgl. Tabelle 3-44) liegen bei den motorgetriebenen Vorderwagen-Varianten und dem Grasmäher mit 88 min⁻¹ bis 108 min⁻¹ in einem vergleichbaren Bereich, verglichen mit PÉREZ et al. (1996) sogar etwas darunter. Die bodengetriebenen Vorderwagen-Varianten übertreffen mit mittleren Herzfrequenzen zwischen 105 min⁻¹ und 134 min⁻¹ die Werte der übrigen Autoren und liegen im Bereich der bei HOFFMANN (1992) gemessenen Maximalwerte. Ein weiterer Hinweis darauf, dass der Bodenantrieb für einen Zweispänner eine Überforderung darstellt.

BRUNNER (1942) stellte bei unterschiedlichen Versuchen zur Arbeitsleistung Schweizer Pferde eine mittlere Zunahme der Herzfrequenz durch die Arbeit von 23 min⁻¹ fest (\cong 61 % der Ruhefrequenz). Die Ruhefrequenz der insgesamt 100 geprüften Pferde betrug im Mittel 38 min⁻¹, die Herzfrequenz unmittelbar nach Abschluss der Arbeit 61 min⁻¹. Allerdings gab es große Differenzen je nach Trainingszustand der untersuchten Gruppen; bei den am wenigsten trainierten Pferden stieg die Herzfrequenz um 65 %, während sie bei den am besten trainierten Pferden nur um 48 % zunahm. Diese Werte liegen deutlich unter denen der vorliegenden Untersuchung. Allerdings ist der Stichprobenumfang bei BRUNNER (1942) mit 100 Pferden deutlich größer, sodass die Ergebnisse nicht direkt miteinander verglichen werden können.

HARBIG (2006) untersuchte Hochleistungsvielseitigkeitspferde und stellte mittlere Herzfrequenzen im Training von ca. 170 min⁻¹ und in der Prüfung von ca. 200 min⁻¹ fest. EHRLEIN et al. (1970) maßen bei jungen Hannoveraner Hengsten, die in einer Zeit von 6,5 min. bis 8,8 min. eine Strecke von 3000 m im Galopp zurücklegten, mit steigender Geschwindigkeit steigende mittlere Herzfrequenzen von 127 min⁻¹ bis 149 min⁻¹. Diese Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Werte von BRUNNER (1942), HOFFMANN (1992), PÉREZ et al. (1996) und SCHULZ (2000) wie auch die der eigenen Untersuchung noch deutlich unter den bei Sportpferden üblichen Werten liegen.

Betrachtet man die prozentuale Zunahme von Ruhefrequenz zu mittlerer Herzfrequenz (vgl. Tabelle 3-59), so zeigt sich auch hier, dass die motorgetriebenen Varianten und der Grasmäher gut mit den Werten von HOFFMANN (1992; 107 %) übereinstimmen bzw. zum Teil deutlich geringere Zunahmen aufweisen. Letztere sind durch die höheren Ruhefrequenzwerte bei vergleichbaren mittleren Herzfrequenzwerten erklärbar, was dem Befund von EHRLEIN et al. (1970) entspricht, nachdem die Höhe der Ruheherzfrequenz keinen Einfluss auf die Höhe der mittleren Herzfrequenz hat. In den Untersuchungen von SCHULZ (2000; 150 %) und PÉREZ et al. (1996; 195 %) sind die Zunahmen deutlich höher.

Tabelle 3-59: Zunahme der Herzfrequenz von Ruhefrequenz zu mittlerer Herzfrequenz (%)

LS Means; Pferde: A = Alphonse, Ch = Charlotte, P = Piroux, D = Dragonne

Variante	Bezeichnung	2000 A/Ch	2000 P/D	2001 A	2001 P	Gesamt A/Ch	Gesamt P/D
1	GM 130 B	63	104	-	-	58	80
2	PC 165 B	135	139	119	94	124	119
3	PC 165 M	-	-	76	75	81	96
4	PC 165 B Zw	135	121	-	-	129	100
5	PC 165 M Zw	104	119	-	-	98	90
6	PC 190 M	87	120	77	63	81	92
7	PC 240 M	96	121	94	75	98	98

Die bodengetriebenen Vorderwagen-Varianten weisen mit Zunahmen von 94 % bis 139 % fast ausnahmslos eine höhere prozentuale Zunahme der Herzfrequenzen auf als die von HOFFMANN (1992) gemessenen 107 %. Die gemessenen Werte für die maximalen Herzfrequenzen liegen mit 92 min⁻¹ bis 149 min⁻¹ für die motorge-triebenen Varianten und den Grasmäher ebenfalls in einem mit HOFFMANN (1992) vergleichbaren Bereich, während die Werte für die bodengetriebenen Vorderwagen-Varianten mit 118 min⁻¹ bis 190 min⁻¹ zum Teil darüber hinaus reichen (vgl. Tabelle 3-45). ART et al. (1996) stellten bei Versuchen auf einem Laufband mit Kaltblutpferden (Ardenner) mit einer Körpermasse von durchschnittlich 738 kg maximale Herzfrequenzen von 179 min⁻¹ bis 216 min⁻¹, im Mittel 198 min⁻¹ fest. Dies zeigt, dass die in der vorliegenden Untersuchung ge-messenen Werte dennoch in einem akzeptablen Bereich liegen.

3.3.8.2 Atemfrequenz

Durch Arbeitsbelastung erhöhen sich bei Pferden ebenfalls die Atemfrequenz sowie das Atemvolumen. Beides dient einer vermehrten Sauerstoffzufuhr, die für die Arbeit der Muskeln notwendig ist. Zudem dient die Erhöhung der Atemfrequenz auch der Wärmeabfuhr aus dem Körper und ist daher - ebenso wie die Veränderung von Herzfrequenz und Körpertemperatur durch die Arbeit - witterungsabhängig (BRUNNER 1942, KRÜGER 1957). In Ruhe haben Pferde eine Atemfrequenz von etwa 8 - 18 min⁻¹, unter Belastung kann diese auf Werte von über 130 min⁻¹ steigen (WITT 2004).

ART et al. (1996) verzeichneten bei den untersuchten Ardennern auf dem Laufband eine Ruheatemfrequenz von 14 min⁻¹. Unter Belastung stieg die Atemfrequenz im Mittel um 87 min⁻¹, bei einer Bandbreite von 81 min⁻¹ bis 107 min⁻¹. SCHULZ (2000) stellte Ruheatemfrequenzen von 8 min⁻¹ - 17 min⁻¹ fest, durch die Arbeit stiegen die Werte im Mittel auf 39 min⁻¹ - 73 min⁻¹, im Extremfall auf 140 min⁻¹ an. Die Atemfrequenz der Pferde bei PÉREZ et al. stieg beim Pflügen von 25 min⁻¹ in Ruhe auf Werte zwischen 98 min⁻¹ und 102 min⁻¹ an.

Die Ruheatemfrequenz der Pferde in der vorliegenden Untersuchung liegt bei Werten von 21 min⁻¹ bis 43 min⁻¹ im Mittel bei 28 min⁻¹ und damit deutlich höher als die in der Literatur angegebenen Werte (vgl. Tabelle 3-60). Der Grund dürfte darin liegen, dass die Pferde nicht aus einem tatsächlichen Ruhe-zustand in die jeweiligen Parzellen gingen, sondern vorher jeweils schon Arbeit verrichtet hatten. Deutliche Unterschiede zwischen den Varianten sind jedoch nicht zu erkennen.

Tabelle 3-60: Ruheatemfrequenz (min⁻¹)

arithmetische Mittelwerte; Pferde: A = Alphonse, Ch = Charlotte, P = Piroux, D = Dragonne

Variante	Bezeichnung	2000	2000	2001	2001	Gesamt	Gesamt
		A/Ch	P/D	A	P	A/Ch	P/D
1	GM 130 B	33	25	-	-	33	25
2	PC 165 B	43	21	26	22	32	25
3	PC 165 M	-	-	33	30	33	30
4	PC 165 B Zw	27	26	-	-	27	26
5	PC 165 M Zw	35	27	-	-	35	27
6	PC 190 M	29	21	33	30	31	26
7	PC 240 M	28	25	25	27	26	26

Die Zunahme der Atemfrequenzen mit Werten zwischen 8 min⁻¹ und 73 min⁻¹, im Mittel 27 min⁻¹ (vgl. Tabelle 3-46), liegt trotz der höheren Ruhfrequenzen unterhalb der Werte der übrigen Autoren. Vermutlich, weil die

Dauer der Arbeitsbelastung im vorliegenden Fall deutlich geringer war. Die Werte der bodengetriebenen Vorderwagen-Varianten liegen mehr als doppelt so hoch wie die Werte der übrigen Varianten und unterscheiden sich signifikant von diesen.

3.3.8.3 Körpertemperatur

Da bei der Arbeit nur 25 % - 35 % der in der Muskulatur freigesetzten Energie in Bewegung umgesetzt, der Rest aber in Wärme umgewandelt wird, erwärmt sich der Körper des Pferdes durch den erhöhten Energieumsatz auf eine Temperatur von kurzfristig bis zu 42 °C (MEYER & COENEN 2002, ENGELHARDT 2010). Diese Körpererwärmung ist neben der Arbeitsintensität auch von den Witterungsverhältnissen abhängig (BRUNNER 1942, KRÜGER 1957). Ebenso spielt der Trainingszustand des Pferdes eine Rolle: Je besser die Kondition des Pferdes ist, desto geringer ist bei gegebener Arbeitsbelastung und gegebenen Witterungsverhältnissen die Erhöhung der Körpertemperatur (BRUNNER 1942, ART et al. 1996, MEYER & COENEN 2002).

Bei den Schweizer Arbeitspferden in der Untersuchung von BRUNNER (1942) stieg die Körpertemperatur im Mittel von 37,70 °C vor Arbeitsbeginn um 1,26 °C auf 38,96 °C bei Arbeitsabschluss. Ebenso wie bei der Herzfrequenz war die Zunahme umso größer, je weniger trainiert die Pferde waren: Die Spannweite betrug 1,00 °C (= 2,65 %, bezogen auf den Ruhewert) bis 1,38 °C (= 3,66 %). Bei den Untersuchungen von ART et al. (1996) betrug die Körpertemperatur in Ruhe im Mittel 37,7 °C. Durch die Arbeit auf dem Laufband trat eine durchschnittliche Erhöhung der Körpertemperatur um 2,3 °C (= 6,1 %) auf 40,0 °C auf. Die Werte nach Belastung schwankten dabei je nach Pferd zwischen 39,5 °C und 40,7 °C. Beim Pflügen erhöhte sich die Körpertemperatur der Pferde in der Untersuchung von PÉREZ et al. (1996) im Mittel von 37,74 °C um 1,54 °C (= 4,1 %) auf 39,28 °C.

Bei den Pferden in der vorliegenden Untersuchung lag die Körpertemperatur vor Beginn der Parzellen im Mittel bei 38,1 °C, mit Werten von 37,8 °C bis 38,4 °C (vgl. Tabelle 3-61). Auch hier dürfte der Grund der im Vergleich zur Literatur etwas höheren Werte darin liegen, dass die Pferde zum Zeitpunkt der Messungen jeweils bereits Arbeit verrichtet hatten. Deutliche Unterschiede zwischen den Varianten oder zwischen den Pferden liegen nicht vor, ebenso sind keine Witterungseinflüsse erkennbar.

Tabelle 3-61: Körpertemperatur vor Parzellenbeginn (°C)

arithmetische Mittelwerte; Pferde: A = Alphonse, Ch = Charlotte, P = Piroux, D = Dragonne

Variante	Bezeichnung	2000	2000	2001	2001	Gesamt	Gesamt
		A/Ch	P/D	A	P	A/Ch	P/D
1	GM 130 B	38,0	38,1	-	-	38,0	38,1
2	PC 165 B	38,4	38,0	38,0	37,9	38,1	38,0
3	PC 165 M	-	-	38,0	38,0	38,0	38,0
4	PC 165 B Zw	37,9	37,8	-	-	37,9	37,8
5	PC 165 M Zw	38,2	38,0	-	-	38,2	38,0
6	PC 190 M	38,4	38,1	38,1	38,0	38,3	38,1
7	PC 240 M	38,4	38,1	38,0	38,1	38,2	38,1

Verglichen mit den zitierten Werten aus der Literatur sind die Erhöhungen der Körpertemperatur durch die Arbeit mit im Mittel 0,3 °C und Werten von 0,0 °C bis 1,0 °C eher gering (vgl. Tabelle 3-47). Die relativ kurze

Dauer der Arbeitsphasen von maximal 11,6 Minuten pro Parzelle dürfte hierfür verantwortlich sein. Auch bei diesem Parameter zeigen die bodengetriebenen Varianten die höchsten Werte. Die Variante mit den zusätzlich montierten Zwillingrädern (V 4) unterscheidet sich signifikant von allen anderen Varianten, auch von der bodengetriebenen Variante ohne Zwillingräder (V 2). Bei Letzterer ist der Unterschied zu den motorgetriebenen Varianten nur z.T. signifikant.

3.3.8.4 Schwitzen

Schweißdrüsen finden sich beim Pferd über den ganzen Körper verteilt, mit größter Dichte an Schulter, Hals und Unterbauch (MEYER & COENEN 2002, MEYER 2010b). Pferdeschweiß enthält neben 97 % - 99 % Wasser viele Elektrolyte sowie Proteine und Glykoproteine mit antibakterieller und antimikrobieller Wirkung (YASUI et al. 2006, 2007). Da die Schweißbildung auch bei ständigem Wasserentzug zwar verringert, aber nicht eingestellt wird, ist die physische Belastbarkeit von Hauspferden begrenzt (MEYER 2010b). Die Flüssigkeitsverluste durch Schwitzen können erheblich sein und bei lang anhaltender Belastung zu einem Verlust von bis zu 10 % des Körpergewichts führen. Daher muss Pferden bei längerer schwerer Arbeit Gelegenheit zur Wasseraufnahme gegeben werden (ENGELHARDT 2010).

Bei Wildequiden reicht zur Thermoregulation in der Regel die Wärmeabgabe über die Atmung und das subepidermale Blutkapillarsystem aus. Starkes Schwitzen wie bei Hauspferden tritt bei ihnen nicht auf, zumal sie „nie über längere Zeit unter hoher Belastung laufen“ (MEYER 2010b: 41). Starkes Schwitzen zur Thermoregulation ist demnach als ein „domestikationsbedingt sekundäres Phänomen einzustufen“; die z.T. erheblichen abgesonderten Schweißmengen sind ein Ergebnis der „Zucht auf Hochleistung“, sie werden sowohl durch eine hohe Arbeitsleistung, als auch durch Stress hervorgerufen (ebd.), und sind abhängig von der Anzahl der vorhandenen Schweißdrüsen (MEYER 2010a). Grundsätzlich gilt, je größer die erbrachte Arbeitsleistung, desto mehr erwärmt sich der Körper und desto mehr Schweiß wird gebildet, um den Körper durch die entstehende Verdunstungskälte zu kühlen. Die Witterungs- und Umgebungsverhältnisse spielen hierbei ebenso eine Rolle wie der Trainingszustand und die Fütterung des Pferdes (BRUNNER 1942, ART et al. 1996, MCCUTCHEON & GEOR 2000, MEYER & COENEN 2002, ENGELHARDT 2010, MEYER 2010b).

Insgesamt wird anhand der Angaben in der Literatur deutlich, dass die Intensität des Schwitzens als Maß für die Schwere geleisteter Arbeit nicht als Vergleichsmaßstab zwischen verschiedenen Pferden geeignet ist. Bei Betrachtung verschiedener Arbeiten ein und desselben Pferdes ist eine Vergleichbarkeit nur gegeben, wenn die Umweltbedingungen gleich sind.

Die meisten Untersuchungen mit Angaben zum Schwitzverhalten von arbeitenden Pferden geben die Schweißbildung in Form von genauen Maßzahlen wie $\text{ml} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ oder Liter an (z.B. KINGSTON et al. 1997, GEOR & MCCUTCHEON 1998, MCCUTCHEON & GEOR 2000). Andere Autoren erwähnen lediglich die Tatsache, dass die Pferde schwitzen, ohne ein Maß für die Stärke der Schweißsekretion anzugeben (z.B. PÉREZ et al. 1996, SCHULZ 2000). Angaben, die einen Vergleich mit den vorliegenden Ergebnissen ermöglicht hätten, konnten nicht gefunden werden.

Bei den vorliegenden Untersuchungen zeigt sich bei allen Varianten eine Zunahme des Schwitzens der Pferde durch die geleistete Arbeit (vgl. Tabelle 3-48). Insgesamt weisen die Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle gegenüber den motorgetriebenen Varianten leicht erhöhte Werte auf, hervorgerufen durch die deutlich höheren Zugkraftwerte und die dadurch bedingte höhere Arbeitsleistung der Pferde. Signifikante Unterschiede gibt es aber nur für das Pferd Piroux im Jahr 2001 zwischen der Variante mit Bodenantrieb (V 2) einerseits und den motorgetriebenen Varianten andererseits.

Die im Ergebnisteil angesprochenen relativ geringen Werte für die Variante 4 bei Piroux/Dragonne in 2000 und in der Auswertung über beide Jahre fallen aus dem Rahmen und belegen, dass das Schwitzverhalten als diskretes Merkmal für den Vergleich unterschiedlicher Arbeiten wenig tauglich ist.

4. Untersuchungen zum Leistungspotential moderner pferdegezogener Technik auf Praxisbetrieben - Flächenversuche

Um die im Parzellenversuch gewonnenen Ergebnisse unter Praxisbedingungen zu überprüfen, wurden auf drei verschiedenen Betrieben Mähversuche unternommen, die im Folgenden als „Flächenversuche“ bezeichnet werden.

4.1 Material und Methoden

Die Flächenversuche fanden auf drei verschiedenen Betrieben und zu unterschiedlichen Zeitpunkten statt. Auf allen Betrieben wurde mit dem in Kapitel 3 beschriebenen Pintow Power Cart sowie mit einem der beiden großen Doppelmessermähwerke mit 1,90 m bzw. 2,40 m Arbeitsbreite gemäht. Der Vorderwagen wurde dabei von den Pferden des jeweiligen Betriebs gezogen (vgl. Tabelle 4-1).

Bei den Versuchen Nr. 1 - 9 kam das Doppelmessermähwerk mit 1,90 m Arbeitsbreite und motorgetriebener Zapfwelle zum Einsatz, bei Versuch Nr. 10 das gleiche Mähwerk, allerdings mit bodengetriebener Zapfwelle und im dreispännigen Zug. In den Versuchen Nr. 11 und 12 schließlich wurde mit dem 2,40 m breiten Mähwerk und motorgetriebener Zapfwelle gearbeitet.

4.1.1 Standorte und eingesetzte Pferde

a) Überlingen

Die mit „Überlingen“ gekennzeichneten Versuche wurden auf drei Flächen des 1973 ausgewiesenen Naturschutzgebietes (NSG) „Radolfzeller Aachried“ in Singen-Überlingen am Ried, Landkreis Konstanz, in Baden-Württemberg durchgeführt (s. Abbildung 4-1). Die Versuche fanden vom 16. bis zum 19. Oktober 2000 statt. Das am westlichen Bodensee, dem „Untersee“ gelegene Gebiet, umfasst den Flusslauf der Radolfzeller Aach sowie angrenzende Auwaldreste, ausgedehnte Schilfröhrichte, Großseggenriede und Pfeifengraswiesen. In den Randbereichen finden sich sowohl Grünland als auch Ackerflächen (WELTIN 2002). Das Aachried enthält zahlreiche Lebensraumtypen nach Anhang I der FFH-Richtlinie mit zahlreichen seltenen Tier- und Pflanzenarten (STEGMAIER 2005).

Seit 1995 werden auf einer zunehmend größeren Fläche des NSG zum Mähen, Wenden, Schwaden und Abfahren der Rundballen ausschließlich Pferde des Pferdehofs Weltin in Singen-Überlingen am Ried eingesetzt. Bis zum Jahr 2002 kam dabei ausschließlich alte pferdegezogene Technik zum Einsatz: ein Grasmäher, ein Gabelheuwender und eine Heuma, sowie zum Abtransport der Rundballen ein selbstgebauter Rückewagen. Der Einsatz der Pferde im NSG wurde bereits mehrfach wissenschaftlich untersucht und ist in der Literatur gut dokumentiert (z.B. DEGEN 2001, WELTIN 2002, HEROLD et al. 2009).

Bei den in den Versuchen gemähten, durchweg ebenen Flächen handelt es sich um Schilfwiesen auf kalk- und basenreichen mineralischen Anmoorböden (STEGMAIER 2005). Die Vegetation, die aus unterschiedlichen Süß- und Sauergräsern sowie einem hohen Anteil Schilf (*Phragmites australis*) besteht, erreichte zum Mahdzeitpunkt eine Höhe von 0,11 m bis 1,70 m, im Mittel zwischen 0,90 m und 1,30 m. Die Schilfpflanzen hatten eine Höhe von bis zu 2,00 m.

Bei den Versuchen standen die Flächen z.T. unter Wasser, so dass das Mähwerk bis zu ca. 10 cm unter der Wasseroberfläche lief. Der Boden war demgemäß sehr feucht bis nass, die Räder des Vorderwagens ebenso

wie die Pferdehufe sanken teilweise einige Zentimeter tief ein. Da die verschiedenen Flächen in diesem Gebiet in wechselndem Modus jedes Jahr bis in den Spätherbst hinein gemäht werden, war diese Situation nicht untypisch und Pferden und Fuhrmann vertraut.

Tabelle 4-1: Standort und Zeitpunkt der Flächenversuche, eingesetzte Mähtechnik und Pferde

* Rassekürzel: AR = Ardenner Kaltblut, RhD = Rheinisch-Deutsches Kaltblut, SD = Süddeutsches Kaltblut, SK = Schleswiger Kaltblut, SW = Schwarzwälder Kaltblut

Versuch Nr.	Datum	Standort (Fläche) (vgl. Abb. 4-1 bis 4-3)	Mähwerk, Antrieb der Zapfwelle	Pferde (Rasse)*
1	18.10.2000, vormittags	Überlingen 2	1,90 m, Motor	Delia (SD), Doro (SW)
2	18.10.2000, nachmittags	Überlingen 2	1,90 m, Motor	Delia (SD), Doro (SW)
3	21.05.2001, vormittags	Frankenhausen 1 („Unter der Straße“)	1,90 m, Motor	Alphonse (AR), Piroux (AR)
4	21.05.2001, nachmittags	Frankenhausen 1 („Unter der Straße“)	1,90 m, Motor	Alphonse (AR), Piroux (AR)
5	03.07.2001	Frankenhausen 2 („Hasenloch c und d“)	1,90 m, Motor	Alphonse (AR), Piroux (AR)
6	28.09.2001	Frankenhausen 3 („Totenhof“)	1,90 m, Motor	Alphonse (AR), Piroux (AR)
7	16.05.2002	Lemgo 1 („Gantengabel“)	1,90 m, Motor	Eddy (RhD x SK), Rico (RhD)
8	17.06.2002	Lemgo 2 („Hoffläche 1“)	1,90 m, Motor	Eddy (RhD x SK), Ernesto (RhD), Asilva (RhD)
9	17.06.2002	Lemgo 3 („Hoffläche 2“)	1,90 m, Motor	Eddy (RhD x SK), Ernesto (RhD), Asilva (RhD)
10	19.10.2000, nachmittags	Überlingen 3	1,90 m, Boden	Max (SW), Doro (SW), Dolex (SW)
11	16.10.2000	Überlingen 1	2,40 m, Motor	Delia (SD), Doro (SW)
12	19.10.2000, vormittags	Überlingen 2	2,40 m, Motor	Max (SW), Doro (SW)

Die eingesetzten Pferde gehören der Rasse „Schwarzwälder Kaltblut“ bzw. „Süddeutsches Kaltblut“ an. Zum Einsatz kamen in wechselnder Anspannung die Schwarzwälder-Kaltblut Wallache „Max“ (10 Jahre), „Doro“ (7 Jahre) und „Dolex“ (9 Jahre) sowie die Süddeutsche Kaltblut-Stute „Delia“ (9 Jahre). Alle vier Pferde wurden auf dem Betrieb Weltin gezüchtet und ausgebildet und werden regelmäßig nicht nur zu den Arbeiten im Naturschutzgebiet, sondern auch zu Grünland- und Ackerarbeiten auf dem Betrieb sowie vor dem

Planwagen im Tourismusbereich eingesetzt. Der Trainingszustand der Pferde zum Versuchszeitpunkt war durch die regelmäßige und umfangreiche Arbeit sehr gut.

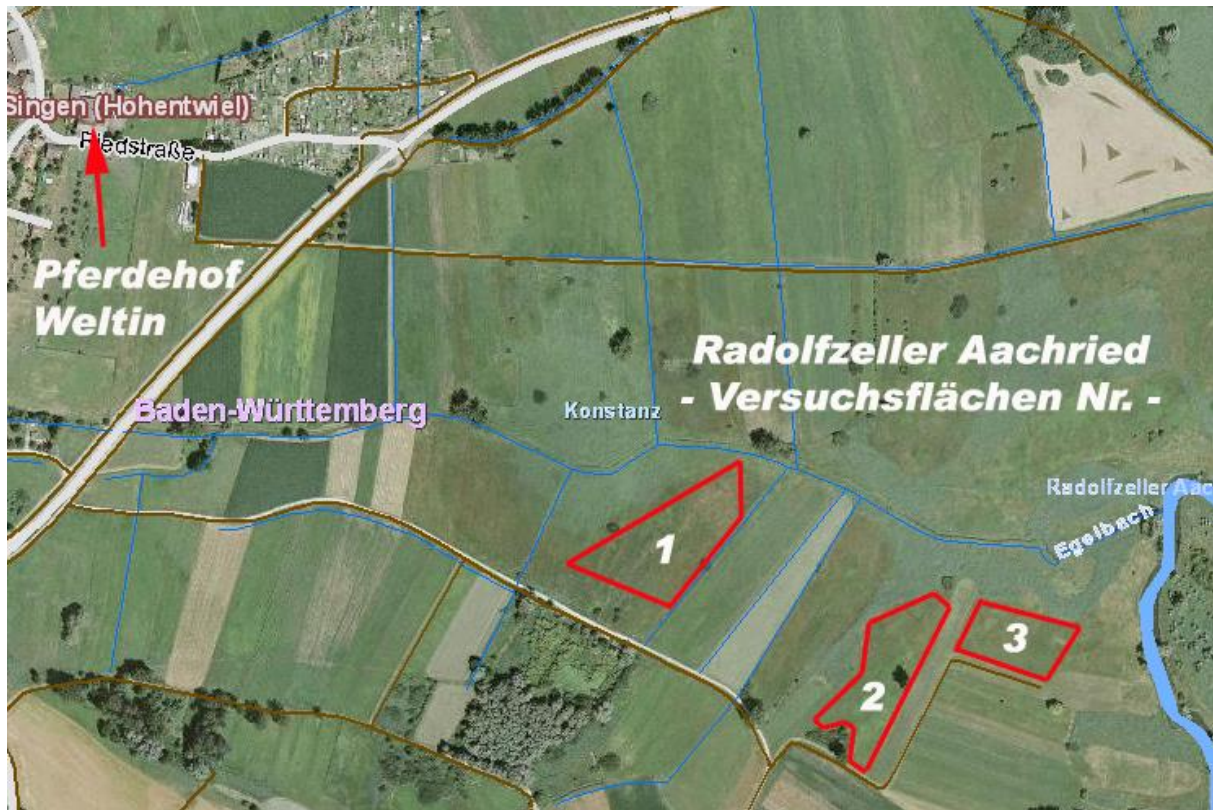


Abbildung 4-1: Lage des Pferdehofs Weltin in Singen-Überlingen am Ried sowie der Versuchsfelder im Radolfzeller Aachried

Versuchszeitpunkte: Fläche Nr. 1: 16.10.00,
Fläche Nr. 2: 18.10.00 und 19.10.00 vormittags,
Fläche Nr. 3: 19.10.00 nachmittags;

Bildquelle: http://www.geodatenzentrum.de/dienste/dop_viewer_geoview.htm

b) Frankenhausen

Die mit „Frankenhausen“ gekennzeichneten Versuche fanden im Jahr 2001 auf drei verschiedenen Flächen der in Kapitel 3 beschriebenen Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen statt (s. Abbildung 4-2): auf dem Schlag „Unter der Straße“ (21.05.01), auf dem Schlag „Hasenloch c und d“ (03.07.01) und auf dem Schlag „Totenhof“ (28.09.01). Zur Orientierung sind in Abbildung 4-2 ergänzend die beiden Standorte des Parzellenversuchs „Obere Kiebitzbreite“ und „Auf dem Brand“ angegeben (vgl. Kapitel 3).

Die in den Versuchen gemähten Flächen sind alle drei nahezu eben, die Vegetation bestand zum Mahdzeitpunkt aus einem angesäten Klee-grasgemenge, wie in Kapitel 3 beschrieben. Die Vegetationshöhe lag jeweils etwa im Bereich von 0,30 m bis 0,70 m.

Vorderwagen und Mähwerk wurden von den in Kapitel 3 beschriebenen Ardenner-Wallachen „Alphonse“ und „Piroux“ gezogen.

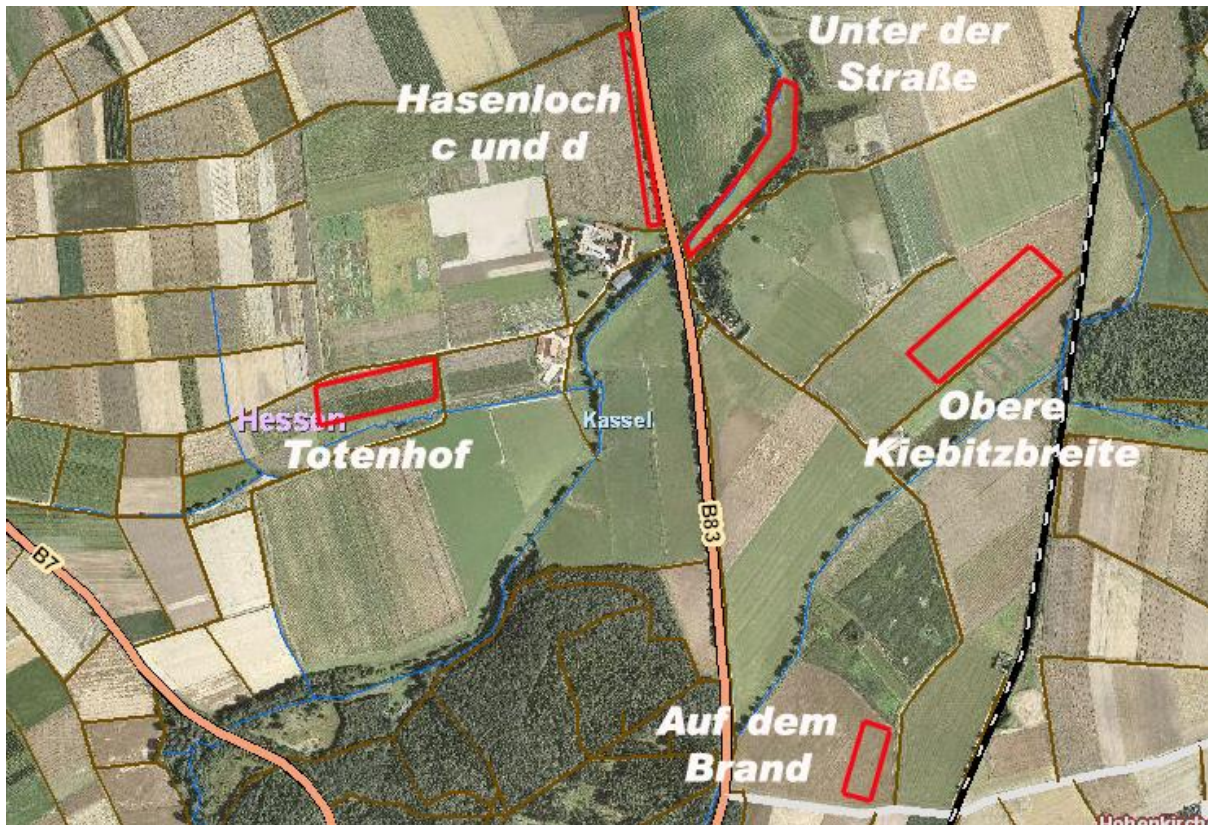


Abbildung 4-2: Lage der Versuchflächen der Flächenversuche („Totenhof“, „Hasenloch c und d“, „Unter der Straße“) sowie des Parzellenversuchs („Obere Kiebitzbreite“, „Auf dem Brand“) auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen

Bildquelle: http://www.geodatenzentrum.de/dienste/dop_viewer_geoview.htm

c) Lemgo

Die mit „Lemgo“ gekennzeichneten Versuche wurden auf dem Bioland-Betrieb Hasenbreite in Lemgo, Nordrhein-Westfalen, durchgeführt. Am 16. Mai 2002 wurde der Schlag „Gantengabel“ in einigen Kilometern Entfernung vom Hof zur Silagewerbung sowie am 17. Juni 2002 zwei Schläge („Hoffläche 1“ und „Hoffläche 2“) in unmittelbarer Hofnähe zur Heuwerbung gemäht (s. Abbildung 4-1).

Bei den drei Flächen handelt es sich um Mähwiesen. Die Vegetationshöhe lag im Mai 2002 im Bereich von etwa 0,50 m, im Juni im Bereich von 0,50 m bis ca. 1,00 m. Während der Schlag „Gantengabel“ nahezu eben ist, sind die beiden Hofflächen leicht nach Süden geneigt.

Zum Einsatz kamen in wechselnder Anspannung die Wallache „Ernesto“ (4 Jahre) und „Eddy“ (11 Jahre) sowie die Stute „Asilva“ (16 Jahre) (vgl. Tabelle 4-1). Eddy ist eine Kreuzung aus „Rheinisch-Deutschem“ und „Schleswiger Kaltblut“, die beiden anderen Pferde gehören zur Rasse „Rheinisch-Deutsches Kaltblut“; alle drei wurden auf dem Betrieb Hasenbreite ausgebildet und werden dort regelmäßig für land- und forstwirtschaftliche Arbeiten eingesetzt. Durch die regelmäßige Arbeit waren die Pferde zum Versuchszeitpunkt in einem sehr guten Trainingszustand.



Abbildung 4-3: Lage der Versuchsflächen auf dem Biolandbetrieb Hasenbreite, Lemgo

Bildquelle: http://www.geodatenzentrum.de/dienste/dop_viewer_geoview.htm

4.1.2 Erfasste Parameter

Bei den Flächenversuchen wurden die folgenden Parameter mit den in Kapitel 3 beschriebenen Methoden erfasst (s. Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Bei den Flächenversuchen erfasste Parameter

Parameter
durchschnittlicher Zugkraftbedarf
maximaler Zugkraftbedarf
durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit
Arbeitszeit und Teilarbeitszeiten
Flächenleistung
durchschnittliche Herzfrequenz
maximale Herzfrequenz

Um einen direkten Vergleich der Ergebnisse mit denen des Parzellenversuchs zu ermöglichen, werden der durchschnittliche und der maximale Zugkraftbedarf zunächst für die Teilarbeit Lastfahrt berechnet. Zusätzlich werden beide Parameter auch für die Gesamtheit der Teilbereiche Lastfahrt und Wenden berechnet, um eine realistischere Vorstellung der tatsächlichen Belastung der Pferde bei der Arbeit zu vermitteln.

Auch bei der Berechnung der Anteile der Teilarbeitszeiten an der Gesamtarbeitszeit werden die Teilarbeiten Lastfahrt und Wenden zunächst separat betrachtet und dann zusammengefasst. Bei der Berechnung der Flächenleistung wird zunächst die tatsächlich benötigte Gesamtarbeitszeit herangezogen. Ergänzend wird die Flächenleistung unter Auslassung der Teilarbeitszeiten Pause und Störungen berechnet, da diese Größen zufällig bzw. stark abhängig sind von den Pferden und der Einstellung des Fuhrmanns. Zudem reicht die geringe Anzahl der durchgeführten Versuche wohl kaum aus, um variantenspezifische Anteile der Teilarbeitszeiten Pause und Störung zu ermitteln.

Bei den Versuchen Nr. 10-12 kann der Ruhepuls als Referenzwert für die mittleren und maximalen Herzfrequenzen nicht angegeben werden, da die Herzfrequenzmesser nicht von Anfang an fehlerfrei gearbeitet haben.

4.1.3 Statistische Methoden bei der Auswertung der Ergebnisse

Zur statistischen Auswertung wurden für die einzelnen Parameter die arithmetischen Mittelwerte sowie die Standardabweichung berechnet. Um einen Vergleich mit den Ergebnissen des Parzellenversuchs zu erleichtern, wurden für die beiden Mähwerke mit motorgetriebener Zapfwelle aus den Messwerten der einzelnen Versuche jeweils der arithmetische Mittelwert sowie die Standardabweichung für die verschiedenen Standorte berechnet. Für das Mähwerk mit 1,90 m Arbeitsbreite wurden ergänzend Mittelwert und Standardabweichung über die drei betrachteten Standorte berechnet.

Varianzanalysen konnten nicht gerechnet werden, da bei Durchführung der Versuche aus personellen Gründen keine ausreichenden die Standorte charakterisierenden Daten aufgenommen werden konnten.

4.2 Ergebnisse

In den folgenden Ergebnistabellen werden aus Platzgründen nur noch die Spalten „Versuch Nr.“, „Standort“ und „Mähwerk, Antrieb der Zapfwelle“ aufgeführt. Die Angaben zu Versuchszeitpunkt und eingesetzten Pferden sind der Tabelle 4-1 in Kapitel 4.1 zu entnehmen.

4.2.1 Zugkraftbedarf

4.2.1.1 Durchschnittlicher Zugkraftbedarf

Die Ergebnisse für den durchschnittlichen Zugkraftbedarf zeigt Tabelle 4-3. Die Werte für das motorgetriebene Mähwerk mit 1,90 m Arbeitsbreite liegen für den Bereich Lastfahrt zwischen 896 N und 1.780 N. Während die Werte in Überlingen mit 1.525 N bzw. 1.560 N (Mittelwert 1.550 N) für beide Flächen sehr ähnlich sind, zeigt die Standardabweichung von 710 N große Schwankungen innerhalb der beiden Flächen an. In Frankenhäusen streut der mittlere Zugkraftbedarf zwischen den Flächen von 896 N bis 1.229 N (Mittelwert 1.044 N). Die Standardabweichung liegt bei 451 N. Die größten Unterschiede zwischen den einzelnen Flächen weisen die Versuche in Lemgo mit 975 N bis 1.780 N auf, bei einem Mittelwert von 1.320 N und einer Standardabweichung von 800 N. Der Mittelwert über alle drei Standorte beträgt 1.198 N bei einer Standardabweichung von 644 N.

Das bodengetriebene Mähwerk mit 1,90 m Arbeitsbreite hat, verglichen mit dem entsprechenden Gesamtmittelwert über alle Versuche der gleichen Variante mit Motorantrieb, mit 2.586 N bei einer Standardabweichung von 634 N einen mehr als doppelt so hohen durchschnittlichen Zugkraftbedarf. Vergleicht man diesen Wert

mit dem Mittelwert für die Überlinger Flächen (Versuche Nr. 1 und 2), so liegt der mittlere Zugkraftbedarf der bodengetriebenen Variante bei 167 % der motorgetriebenen Variante mit gleicher Arbeitsbreite.

Das 2,40 m Mähwerk bewegt sich mit 1.700 N bzw. 1.760 N, im Mittel 1.710 N, und einer Standardabweichung von 704 N im Bereich der Spitzenwerte des 1,90 m Mähwerks mit motorgetriebener Zapfwelle.

Wird der durchschnittliche Zugkraftbedarf für die Gesamtheit der Teilbereiche Lastfahrt und Wenden berechnet, sinken die Werte geringfügig gegenüber der reinen Berechnung für die Teilarbeit Lastfahrt. In den Fällen, in denen in Tabelle 4-3 für beide Berechnungen die gleichen Werte stehen, war eine Unterscheidung der beiden Teilbereiche nicht möglich, da kontinuierlich an einem Stück in Kreisbahnen gemäht wurde.

Nach wie vor ist die Schwankung für das Mähwerk mit 1,90 m Arbeitsbreite und motorgetriebener Zapfwelle mit Werten zwischen 924 N und 1.710 N bei den Versuchen in Lemgo am größten (Mittelwert 1.236 N, Standardabweichung 790 N). In Frankenhausen liegen die entsprechenden Werte zwischen 896 N und 1.169 N (Mittelwert 1.029 N, Standardabweichung 456 N), während sie in Überlingen 1.473 N bzw. 1.544 N betragen (Mittelwert 1.522 N, Standardabweichung 713 N). Im Mittel beträgt der Wert für diese Variante 1.163 N bei einer Standardabweichung von 648 N über alle Standorte.

Das 1,90 m Mähwerk mit bodengetriebener Zapfwelle hat auch bei dieser Betrachtung mit 2.528 N und einer Standardabweichung von 684 N einen etwa doppelt so hohen Zugkraftbedarf wie das gleiche Mähwerk mit motorgetriebener Zapfwelle. Das 2,40 m Mähwerk mit motorgetriebener Zapfwelle weist mit 1.653 N bzw. 1.700 N, im Mittel 1.692 N bei einer Standardabweichung von 708 N, etwas höhere Werte auf als das 1,90 m Mähwerk mit motorgetriebener Zapfwelle.

4.2.1.2 Maximaler Zugkraftbedarf

Mit einer Ausnahme, Versuch Nr. 10, unterscheidet sich der maximale Zugkraftbedarf für die Teilarbeit Lastfahrt nicht von der Gesamtheit der Teilarbeiten Lastfahrt und Wenden, d.h. der gemessene Spitzenwert tritt während der Teilarbeit Lastfahrt auf (vgl. Tabelle 4-4).

Für das 1,90 m Mähwerk mit motorgetriebener Zapfwelle liegen die Werte in Überlingen bei 4.547 N bzw. 5.123 N (Mittelwert 4.835 N, Standardabweichung 408 N), in Frankenhausen reichen sie von 2.887 N bis 4.621 N (Mittelwert 3.488 N, Standardabweichung 780 N) und in Lemgo von 3.515 N bis 4.959 N (Mittelwert 4.199 N, Standardabweichung 725 N). Der Mittelwert über alle drei Standorte beträgt 4.024 N bei einer Standardabweichung von 837 N.

Das 1,90 m Mähwerk mit bodengetriebener Zapfwelle hat für den Teilarbeitsbereich Lastfahrt einen maximalen Zugkraftbedarf von 5.061 N, für die Gesamtheit der Teilbereiche Lastfahrt und Wenden liegt der Wert mit 8.628 N deutlich darüber. Hier trat der gemessene maximale Wert also während des Wendens auf.

Das 2,40 m Mähwerk mit motorgetriebener Zapfwelle weist Werte von 3.942 N bzw. 5.731 N auf, im Mittel 4.837 N bei einer Standardabweichung von 1.265 N. Diese Werte sind etwas höher als die des motorgetriebenen 1,90 m Mähwerks. Beschränkt man den Vergleich der beiden motorgetriebenen Mähwerke auf die Überlinger Versuche, so ergeben sich mit 4.835 N (1,90 m) bzw. 4.837 N (2,40 m) nahezu identische Werte. Allerdings sind die Standardabweichungen mit 408 N (1,90 m) bzw. 1.265 N (2,40 m) deutlich verschieden.

Tabelle 4-3: Durchschnittlicher Zugkraftbedarf für die Teilarbeiten Lastfahrt und die Gesamtheit aus den Teilarbeiten Lastfahrt und Wenden ohne Berücksichtigung der Teilarbeiten Pause und Störung (N)

\emptyset = arithmetisches Mittel, SD = Standardabweichung

Versuch Nr.	Standort	Mähwerk, Antrieb der Zapf- welle	Zugkraftbedarf Lastfahrt (N)		Zugkraftbedarf Lastfahrt + Wenden (N)	
			\emptyset	SD	\emptyset	SD
1	Überlingen 2	1,90 m, Motor	1.560	717	1.544	717
2	Überlingen 2	1,90 m, Motor	1.525	692	1.473	699
		Mittelwert	1.550	710	1.522	713
3	Frankenhausen 1	1,90 m, Motor	1.014	375	1.014	375
4	Frankenhausen 1	1,90 m, Motor	1.229	441	1.169	473
5	Frankenhausen 2	1,90 m, Motor	896	485	896	486
6	Frankenhausen 3	1,90 m, Motor	1.203	72	1.129	497
		Mittelwert	1.044	451	1.029	456
7	Lemgo 1	1,90 m, Motor	975	552	924	562
8	Lemgo 2	1,90 m, Motor	1.363	619	1.270	649
9	Lemgo 3	1,90 m, Motor	1.780	1.023	1.710	1.010
		Mittelwert	1.320	800	1.236	790
1 - 9	Mittelwert gesamt	1,90 m, Motor	1.198	644	1.163	648
10	Überlingen 3	1,90 m, Boden	2.586	634	2.528	684
11	Überlingen 1	2,40 m, Motor	1.700	709	1.700	709
12	Überlingen 2	2,40 m, Motor	1.760	672	1.653	698
11 - 12	Mittelwert gesamt	2,40 m, Motor	1.710	704	1.692	708

Tabelle 4-4: Maximaler Zugkraftbedarf für die Teilarbeit Lastfahrt und die Gesamtheit aus den Teilarbeiten Lastfahrt und Wenden (N)

Versuch Nr.	Standort	Mähwerk, Antrieb der Zapfwelle	maximaler Zugkraftbedarf Lastfahrt (N)	maximaler Zugkraftbedarf Lastfahrt + Wenden (N)
1	Überlingen 2	1,90 m, Motor	5.123	5.123
2	Überlingen 2	1,90 m, Motor	4.547	4.547
1 - 2		Mittelwert Standardabweichung	4.835 408	4.835 408
3	Frankenhausen 1	1,90 m, Motor	4.621	4.621
4	Frankenhausen 1	1,90 m, Motor	2.887	2.887
5	Frankenhausen 2	1,90 m, Motor	3.360	3.360
6	Frankenhausen 3	1,90 m, Motor	3.084	3.084
3 - 6		Mittelwert Standardabweichung	3.488 780	3.488 780
7	Lemgo 1	1,90 m, Motor	3.515	3.515
8	Lemgo 2	1,90 m, Motor	4.123	4.123
9	Lemgo 3	1,90 m, Motor	4.959	4.959
7 - 9		Mittelwert Standardabweichung	4.199 725	4.199 725
1 - 9	gesamt	1,90 m, Motor Mittelwert Standardabweichung	4.024 837	4.024 837
10	Überlingen 3	1,90 m, Boden	5.061	8.628
11	Überlingen 1	2,40 m, Motor	5.731	5.731
12	Überlingen 2	2,40 m, Motor	3.942	3.942
11 - 12	gesamt	2,40 m, Motor Mittelwert Standardabweichung	4.837 1.265	4.837 1.265

4.2.2 Arbeitsgeschwindigkeit

Die erzielten Arbeitsgeschwindigkeiten bewegen sich alle in einem engen Bereich von $4,03 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bis $5,24 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Für den Bereich Lastfahrt liegt die Arbeitsgeschwindigkeit für das 1,90 m Mähwerk mit motorgetriebener Zapfwelle in Überlingen bei $4,58 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bzw. $4,72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, im Mittel bei $4,68 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ mit einer Standardabweichung von $0,70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (vgl. Tabelle 4-5). In Frankenhausen reichen die Werte von $4,74 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bis $5,24 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, im Mittel $5,00 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bei einer Standardabweichung von $0,75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. In Lemgo schließlich bewegen sich die Werte zwischen $4,73 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ und $5,24 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, bei einem Mittelwert von $5,07 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ und einer Standardabweichung von $0,95 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Im Mittel über alle drei Standorte beträgt die Arbeitsgeschwindigkeit für das Mähwerk mit 1,90 m Arbeitsbreite und motorgetriebener Zapfwelle $4,98 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bei einer Standardabweichung von $0,82 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Tabelle 4-5: Durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit für die Teilarbeit Lastfahrt und die Gesamtheit aus den Teilarbeiten Lastfahrt und Wenden ohne Berücksichtigung der Teilarbeiten Pause und Störung (km * h⁻¹)

Versuch Nr.	Standort	Mähwerk, Antrieb der Zapfwelle	Arbeitsgeschwindigkeit Lastfahrt (km * h ⁻¹)		Arbeitsgeschwindigkeit Lastfahrt + Wenden (km * h ⁻¹)	
			∅	SD	∅	SD
1	Überlingen 2	1,90 m, Motor	4,72	0,71	4,62	0,91
2	Überlingen 2	1,90 m, Motor	4,58	0,67	4,50	0,79
1 - 2		Mittelwert	4,68	0,70	4,58	0,88
3	Frankenhausen 1	1,90 m, Motor	4,89	0,65	4,89	0,65
4	Frankenhausen 1	1,90 m, Motor	4,74	0,82	4,48	1,29
5	Frankenhausen 2	1,90 m, Motor	5,24	0,84	5,23	0,87
6	Frankenhausen 3	1,90 m, Motor	5,06	0,69	4,95	1,00
3 - 6		Mittelwert	5,00	0,75	4,94	0,92
7	Lemgo 1	1,90 m, Motor	5,24	0,96	5,19	1,05
8	Lemgo 2	1,90 m, Motor	5,13	1,04	4,98	1,26
9	Lemgo 3	1,90 m, Motor	4,73	0,73	4,70	0,89
7 - 9		Mittelwert	5,07	0,95	5,00	1,11
1 - 9	Mittelwert gesamt	1,90 m, Motor	4,98	0,82	4,91	0,99
10	Überlingen 3	1,90 m, Boden	4,03	0,48	4,05	0,52
11	Überlingen 1	2,40 m, Motor	4,60	0,77	4,60	0,77
12	Überlingen 2	2,40 m, Motor	4,48	1,09	4,34	1,26
11 - 12	Mittelwert gesamt	2,40 m, Motor	4,58	0,83	4,55	0,89

Bei bodengetriebener Zapfwelle des 1,90 m Mähwerks ist die durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit mit $4,03 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (Standardabweichung $0,48 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) um nahezu $1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ geringer. Verglichen mit den Versuchen am gleichen Standort (Versuche 1 und 2) sinkt die Arbeitsgeschwindigkeit durch den Bodenantrieb der Zapfwelle um $0,65 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Das 2,40 m Mähwerk mit motorgetriebener Zapfwelle erzielt Werte von $4,48 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ und $4,64 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, im Mittel $4,58 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bei einer Standardabweichung von $0,83 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Verglichen mit dem 1,90 m Mähwerk mit motorgetriebener Zapfwelle ist die Geschwindigkeit also um $0,40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ verringert. Beschränkt man diesen Vergleich auf die Überlinger Versuche, so beträgt die Abnahme der Arbeitsgeschwindigkeit durch die größere Arbeitsbreite lediglich $0,10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Dort, wo die Teilbereiche Lastfahrt und Wenden unterschieden werden konnten (vgl. Kapitel 4.2.1), sinkt mit Ausnahme von Versuch Nr. 10 der Wert für die durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit bei Betrachtung über beide Teilbereiche hinweg. Daraus folgt, dass das Arbeitstempo beim Wendevorgang gegenüber der Lastfahrt deutlich verringert ist.

Für das motorgetriebene 1,90 m Mähwerk liegen die Werte in Überlingen bei $4,50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bzw. bei $4,62 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (Mittelwert $4,58 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, Standardabweichung $0,88 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$), in Frankenhausen treten Werte von $4,48 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bis $5,23 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ auf (Mittelwert $4,94 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, Standardabweichung $0,92 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$), in Lemgo von $4,70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bis $5,19 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (Mittelwert $5,00 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, Standardabweichung $1,11 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). Der Mittelwert über alle drei Standorte beträgt $4,91 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bei einer Standardabweichung von $0,99 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Beim bodengetriebenen 1,90 m Mähwerk steigt der Wert bei Betrachtung über beide Teilarbeitszeiten geringfügig auf $4,05 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (Standardabweichung $0,52 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). Bei dieser Variante werden also die Wendevorgänge mit einem höheren Tempo absolviert als der Teilbereich Lastfahrt.

Beim 2,40 m Mähwerk liegen die Werte bei $4,34 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bzw. $4,60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, im Mittel bei $4,55 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ mit einer Standardabweichung von $0,89 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

4.2.3 Flächenleistung

Die Ergebnisse hinsichtlich der erzielten Flächenleistungen zeigt Tabelle 4-6. Da bei den Versuchen Nr. 1 und 2 sowie Nr. 3 und 4 die Flächengrößen jeweils nur für die Gesamtfläche bestimmt wurde, lässt sich auch die Flächenleistung nur für die gesamte Fläche berechnen. Hierzu wurden die auf den Teilflächen gemessenen Werte für die Gesamtarbeitszeit sowie für die Teilarbeiten Lastfahrt und Wenden jeweils addiert.

Die Flächenleistung bezogen auf die Gesamtarbeitszeit liegt beim motorgetriebenen 1,90 m Mähwerk zwischen $0,43 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ und $0,72 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$, im Mittel bei $0,57 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ (Standardabweichung $0,12 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$). Die Werte für den Standort Lemgo sind dabei insgesamt niedriger als die der beiden anderen Standorte. Die Flächenleistung des bodengetriebenen 1,90 m Mähwerks liegt mit $0,33 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ deutlich unter den Werten für das gleiche Mähwerk mit motorgetriebener Zapfwelle, während die Flächenleistung des 2,40 m Mähwerks mit $0,75 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ bzw. $0,83 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ und im Mittel $0,79 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ (Standardabweichung $0,06 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$) deutlich höher ist.

Betrachtet man die Flächenleistung unter Auslassung der Zeiten für Pausen und Störungen, rechnet also nur die Arbeitszeit für die Teilarbeiten Lastfahrt und Wenden, so fallen die Werte für alle Mähwerke erwartungsgemäß höher aus. Für das motorgetriebene 1,90 m Mähwerk liegt die Flächenleistung bei dieser Berechnung zwischen $0,56 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ und $1,02 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$, im Mittel bei $0,71 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ (Standardabweichung $0,16 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$), also etwa 25 % höher. Die Werte für den Standort Lemgo sind wiederum deutlich niedriger als die Werte der beiden anderen Standorte, die sich bei dieser Betrachtungsweise zudem deutlich einheitlicher präsentieren. Das bodengetriebene 1,90 m Mähwerk kommt auf eine Flächenleistung von $0,54 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$, ein Plus von 64 %, während

die Werte beim 2,40 m Mähwerk mit $0,81 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ bzw. $0,94 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$, im Mittel $0,88 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ (Standardabweichung $0,09 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$), etwa 11 % höher sind als bei der Betrachtung unter Einschluss der Teilarbeitszeiten Pause und Störung.

Tabelle 4-6: Flächenleistungen anhand der Gesamtarbeitszeit sowie unter Ausschluss der Teilarbeitszeiten Pause und Störung ($\text{ha} * \text{h}^{-1}$)

Versuch Nr.	Standort	Mähwerk, Antrieb der Zapfwelle	Flächengröße (ha)	Arbeitszeit gesamt (h)	Flächenleistung gesamt ($\text{ha} * \text{h}^{-1}$)	Arbeitszeit Lastfahrt + Wenden (h)	Flächenleistung ohne Pausen und Störungen ($\text{ha} * \text{h}^{-1}$)
1 + 2	Überlingen 2	1,90 m, Motor	0,98	1,42	0,69	1,21	0,81
3 + 4	Frankenhau- sen 1	1,90 m, Motor	2,71	3,74	0,72	2,66	1,02
5	Frankenhau- sen 2	1,90 m, Motor	0,98	1,48	0,66	1,31	0,75
6	Frankenhau- sen 3	1,90 m, Motor	0,70	1,43	0,49	1,13	0,62
3 - 6		Mittelwert Standardabweichung	1,46 1,09	2,22 1,32	0,62 0,12	1,70 0,84	0,80 0,20
7	Lemgo 1	1,90 m, Motor	0,81	1,90	0,43	1,44	0,56
8	Lemgo 2	1,90 m, Motor	0,67	1,54	0,44	1,16	0,58
9	Lemgo 3	1,90 m, Motor	0,55	0,96	0,57	0,87	0,63
7 - 9		Mittelwert Standardabweichung	0,68 0,13	1,47 0,47	0,48 0,08	1,16 0,29	0,59 0,04
	gesamt	1,90 m, Motor Mittelwert Standardabweichung	1,06 0,75	1,78 0,91	0,57 0,12	1,40 0,58	0,71 0,16
10	Überlingen 3	1,90 m, Boden	0,80	2,39	0,33	1,47	0,54
11	Überlingen 1	2,40 m, Motor	1,54	1,84	0,83	1,63	0,94
12	Überlingen 2	2,40 m, Motor	0,30	0,40	0,75	0,37	0,81
11 - 12	gesamt	2,40 m, Motor Mittelwert Standardabweichung	0,92 0,88	1,12 1,02	0,79 0,06	1,00 0,89	0,88 0,09

4.2.4 Arbeitszeit und Teilarbeitszeiten

Der Vergleich der Arbeitszeiten zeigt, dass die Flächenversuche von sehr unterschiedlicher Dauer waren (s. Tabelle 4-7). Die Werte für die Gesamtarbeitszeit schwanken zwischen 23 min. und 159 min. Beim motorgetriebenen 1,90 m Mähwerk liegt die Gesamtarbeitszeit in Überlingen bei 62 min. bzw. 23 min. (Mittelwert 43 min., Standardabweichung 28 min.). In Frankenhausen dauerten die Versuche im Mittel 100 min. (Standardabweichung 41 min.), in Lemgo im Mittel 88 min. (Standardabweichung 28 min.). Im Mittel über alle Versuche ergibt sich für das 1,90 m Mähwerk mit motorgetriebener Zapfwelle eine Gesamtarbeitszeit von 83 min. (Standardabweichung 38 min.).

Der Versuch mit dem bodengetriebenen 1,90 m Mähwerk dauerte 143 min., der zweithöchste Wert insgesamt. Beim 2,40 m Mähwerk mit motorgetriebener Zapfwelle dauerten die Versuche mit 24 min. bzw. 111 min. sehr unterschiedlich lang (Mittelwert 68 min., Standardabweichung 62 min.).

Auch hinsichtlich der Anteile der einzelnen Teilarbeiten an der Gesamtarbeitszeit gibt es zwischen den Versuchen deutliche Unterschiede.

Die Teilarbeit Lastfahrt hat stets den höchsten Anteil an der Gesamtarbeitszeit. Beim motorgetriebenen Mähwerk mit 1,90 m Arbeitsbreite beträgt er in Überlingen 78 % bzw. 85 % (Mittelwert 81 %, Standardabweichung 5 %). In Frankenhausen liegt dieser Wert zwischen 52 % und 87 % (Mittelwert 70 %, Standardabweichung 15 %), während die Versuche in Lemgo mit Werten von 57 % bis 79 %, im Mittel 65 % bei einer Standardabweichung von 12 %, die geringsten Werte aufweisen.

Beim bodengetriebenen 1,90 m Mähwerk ist der Anteil der Teilarbeit Lastfahrt an der Gesamtarbeitszeit mit 57 % deutlich geringer, beim motorgetriebenen 2,40 m Mähwerk mit Werten von 78 % bzw. 88 % (Mittelwert 83 %, Standardabweichung 7 %) deutlich höher.

Der Anteil der Teilarbeit Wenden liegt beim 1,90 m Mähwerk mit Motorantrieb der Zapfwelle zwischen 0 % und 18 %, im Mittel bei 9 % (Standardabweichung 7 %). Bei den Versuchen in Lemgo liegen die Werte mit 11 % bis 18 % (Mittelwert 15 %, Standardabweichung 4 %) deutlich höher als in Überlingen (Mittelwert 7 %, Standardabweichung 5 %) und Frankenhausen (Mittelwert 6 %, Standardabweichung 6 %).

Beim bodengetriebenen 1,90 m Mähwerk beträgt der Anteil der Wendezeit 4 %, beim motorgetriebenen 2,40 m Mähwerk 0 % bzw. 15 % (Mittelwert 8 %, Standardabweichung 11 %).

Die Teilarbeit Störungen hat beim motorgetriebenen 1,90 m Mähwerk einen Anteil zwischen 0 % und 19 % (Mittelwert 7 %, Standardabweichung 7 %), während beim selben Mähwerk mit Bodenantrieb nur ein Anteil von 2 % zu verzeichnen ist. Das 2,40 m Mähwerk schließlich erzielt in beiden Versuchen 7 % (Mittelwert 7 %, Standardabweichung 0 %).

Der Anteil der Pausenzeiten schwankt in erheblichem Maße. Beim motorgetriebenen 1,90 m Mähwerk liegt er zwischen 0 % und 31 % (Mittelwert 13 %, Standardabweichung 12 %). Der Wert beim bodengetriebenen 1,90 m Mähwerk liegt mit 37 % deutlich höher, während er beim 2,40 m Mähwerk bei 0 % bzw. 5 % liegt (Mittelwert 3 %, Standardabweichung 4 %).

Fasst man die Teilarbeiten Lastfahrt und Wenden zusammen, so ergeben sich für die motorgetriebenen Mähwerke Werte von 80 % (1,90 m, Standardabweichung 10 %) und 91 % (2,40 m, Standardabweichung 3 %). Das bodengetriebene Mähwerk weist hier mit 61 % einen deutlich geringeren Wert auf, der dem relativ hohen Anteil der notwendigen Pausen geschuldet ist.

Tabelle 4-7: Arbeitszeit und Teilarbeitszeiten

Versuch Nr.	Standort	Mähwerk, Antrieb der Zapfwelle	Arbeitszeit gesamt (sec.)	Arbeitszeit gesamt (min.)	Anteil Lastfahrt (%)	Anteil Wenden (%)	Anteil Störungen (%)	Anteil Pause (%)	Anteil Lastfahrt + Wenden (%)
1	Überlingen 2	1,90 m, Motor	3.706	62	78	3	19	0	81
2	Überlingen 2	1,90 m, Motor	1.392	23	85	10	5	0	95
1 - 2		Mittelwert Standardabweichung	2.549 1.636	43 28	81 5	7 5	12 10	0 0	88 10
3	Frankenhau- sen 1	1,90 m, Motor	9.547	159	76	0	2	22	76
4	Frankenhau- sen 1	1,90 m, Motor	3.914	65	52	7	11	31	59
5	Frankenhau- sen 2	1,90 m, Motor	5.322	89	87	1	0	12	88
6	Frankenhau- sen 3	1,90 m, Motor	5.145	86	65	14	1	19	79
3 - 6		Mittelwert Standardabweichung	5.982 2.458	100 41	70, 15	6 6	3 5	21 8	76 13
7	Lemgo 1	1,90 m, Motor	6.847	114	59	17	2	22	76
8	Lemgo 2	1,90 m, Motor	5.549	92	58	18	18	7	75
9	Lemgo 3	1,90 m, Motor	3.472	58	79	11	10	0	90
7 - 9		Mittelwert Standardabweichung	5.289 1.702	88 28	65 12	15 4	10 8	10 11	80 8
	gesamt	1,90 m, Motor Mittelwert Standardabweichung	4.988 2.311	83 38	71 13	9 7	7 7	13 12	80 11
10	Überlingen 3	1,90 m, Boden	8.598	143	57	4	2	37	61
11	Überlingen 1	2,40 m, Motor	6.641	111	88	0	7	5	88
12	Überlingen 2	2,40 m, Motor	1.421	24	78	15	7	0	93
11 - 12	gesamt	2,40 m, Motor Mittelwert Standardabweichung	4.031 3.691	68 62	83 7	8 11	7 0	3 4	91 3

4.2.5 Herzfrequenz

In Tabelle 4-8 können die Herzfrequenzen desselben Pferdes bei unterschiedlichen Versuchen verglichen werden, da die Werte für „Pferd 1“ zum ersten Namen in der zugehörigen Spalte „Pferde“ gehören, die Werte für „Pferd 2“ entsprechend zum zweiten Namen. In den Versuchen 8 - 10 kam jeweils ein Dreispänner zum Einsatz, bei dem die Herzfrequenzen der beiden Außenpferde gemessen wurden. In diesen Fällen sind die Namen der gemessenen Pferde **fett** geschrieben, die Werte für „Pferd 1“ gehören zum ersten Namen in der zugehörigen Spalte „Pferde“, die Werte für „Pferd 2“ entsprechend zum dritten Namen.

Bei einigen Messreihen traten kurze Aussetzer der Messtechnik auf, die zu deutlich überhöhten Maximalwerten geführt haben (in Tabelle 4-8 grün und gelb markiert). Dies war bei Betrachtung der Messkurven gut zu sehen und wird auch durch die jeweiligen Standardabweichungen illustriert, die deutlich größer sind als bei den übrigen Mittelwerten. Statt dieser überhöhten Werte wurde aus der Messreihe der tatsächliche Maximalwert abgelesen und in Tabelle 4-8 unter den markierten Werten in () angegeben. Die Standardabweichungen wurden nicht neu berechnet. Da diese Aussetzer jeweils nur sehr kurz waren, hatten sie bei der großen Anzahl der Messwerte insgesamt keine Auswirkungen auf die durchschnittlichen Herzfrequenzen.

Die Herzfrequenz vor Versuchsbeginn, der **Ruhepuls**, schwankt beim 1,90 m Mähwerk mit motorgetriebener Zapfwelle zwischen 27 min^{-1} und 78 min^{-1} . Bei den Versuchen in Überlingen sind die Werte mit im Mittel 38 min^{-1} (Standardabweichung $6,36 \text{ min}^{-1}$) bzw. 33 min^{-1} (Standardabweichung $7,78 \text{ min}^{-1}$) deutlich niedriger als in Frankenhausen mit bei beiden Pferden 50 min^{-1} (Standardabweichung $6,61 \text{ min}^{-1}$ bzw. $5,03 \text{ min}^{-1}$). In Lemgo liegen die Werte bei 51 min^{-1} (Standardabweichung $7,51 \text{ min}^{-1}$) bzw. 62 min^{-1} (Standardabweichung $17,62 \text{ min}^{-1}$) und damit bei Pferd 2 deutlich höher als bei allen anderen betrachteten Pferden.

Bei den Versuchen Nr. 10 - 12 kann der Ruhepuls nicht angegeben werden, da die Messgeräte hier nicht sauber gearbeitet haben.

Die Werte für die **durchschnittlichen Herzfrequenzen** liegen beim motorgetriebenen 1,90 m Mähwerk zwischen 75 min^{-1} und 133 min^{-1} . Die Werte sind in Frankenhausen mit im Mittel 90 min^{-1} (Standardabweichung $9,18 \text{ min}^{-1}$) und 88 min^{-1} (Standardabweichung $9,57 \text{ min}^{-1}$) geringer als die in Überlingen (Mittelwert für beide Pferde 100 min^{-1} , Standardabweichung $15,56 \text{ min}^{-1}$ bzw. $1,41 \text{ min}^{-1}$) und Lemgo (Pferd 1: Mittelwert 108 min^{-1} , Standardabweichung $14,01 \text{ min}^{-1}$, Pferd 2: Mittelwert 117 min^{-1} , Standardabweichung $14,22 \text{ min}^{-1}$).

Beim bodengetriebenen 1,90 m Mähwerk beträgt die mittlere Herzfrequenz 82 min^{-1} bzw. 88 min^{-1} und ist damit niedriger als die beim motorgetriebenen Mähwerk.

Beim 2,40 m Mähwerk schließlich liegen die Werte zwischen 105 min^{-1} und 126 min^{-1} , die Mittelwerte für die beiden Pferde betragen 116 min^{-1} (Standardabweichung $14,85 \text{ min}^{-1}$) und 112 min^{-1} (Standardabweichung $0,00 \text{ min}^{-1}$).

Auch bei der **maximalen Herzfrequenz** gibt es deutliche Unterschiede zwischen den Pferden und den Versuchen. Für das motorgetriebene 1,90 m Mähwerk ergeben sich Werte zwischen 112 min^{-1} und 223 min^{-1} (korrigiert 168 min^{-1}). Die Werte in Frankenhausen mit im Mittel 126 min^{-1} (Standardabweichung $3,70 \text{ min}^{-1}$) bzw. 136 min^{-1} (korrigiert 115 min^{-1} ; Standardabweichung $43,37 \text{ min}^{-1}$) und in Überlingen mit Mittelwert 123 min^{-1} (Standardabweichung $11,31 \text{ min}^{-1}$) bzw. korrigiert 114 min^{-1} (fehlerhaft 172 min^{-1} , Standardabweichung $72,83 \text{ min}^{-1}$) stimmen recht gut überein, während die Werte in Lemgo mit 160 min^{-1} (Standardabweichung $10,44 \text{ min}^{-1}$) und 177 min^{-1} (korrigiert 158 min^{-1} ; Standardabweichung $35,92 \text{ min}^{-1}$) deutlich höher sind.

Beim bodengetriebenen 1,90 m-Mähwerk betragen die maximalen Herzfrequenzen 119 min^{-1} bzw. 143 min^{-1} . Beim 2,40 m Mähwerk liegt die maximale Herzfrequenz zwischen 126 min^{-1} und 235 min^{-1} (korrigiert 137 min^{-1}). Die Mittelwerte für die beiden Pferde liegen bei 184 min^{-1} (korrigiert 135 min^{-1} ; Standardabweichung $72,83 \text{ min}^{-1}$) bzw. 130 min^{-1} (Standardabweichung $4,95 \text{ min}^{-1}$).

Tabelle 4-8: Herzfrequenzen (HF) (min^{-1}) vor Versuchsbeginn, durchschnittliche und maximale Herzfrequenzen

dunkel-grau markierte Werte: durch Aussetzer der Messtechnik bedingt zu hohe Werte, in () darunter der aus der korrigierten Messreihe abgeleitete Wert; **hell-grau** markierte Mittelwerte: durch die grün markierten Werte bedingte zu hohe Ergebnisse, in () darunter der aus der korrigierten Messreihe abgeleitete Mittelwert; vgl. auch Text Kapitel 4.2.5, 2. Absatz

Versuch Nr.	Standort	Mähwerk, Antrieb der Zapfwelle	Pferde ^{*)}	HF vor Beginn Pferd 1 (min^{-1})	HF vor Beginn Pferd 2 (min^{-1})	durchschnittliche HF Pferd 1 (min^{-1})	durchschnittliche HF Pferd 2 (min^{-1})	maximale HF Pferd 1 (min^{-1})	maximale HF Pferd 2 (min^{-1})
1	Überlingen 2	1,90 m, Motor	Delia, Doro	33	27	111	101	223 (107)	131
2	Überlingen 2	1,90 m, Motor	Delia, Doro	42	38	89	99	120	115
1 - 2			Mittelwert	38	33	100	100	172 (114)	123
			Standardabweichung	6,36	7,78	15,56	1,41	72,83	11,31
3	Frankenhausen 1	1,90 m, Motor	Alphonse, Piroux	42	57	86	85	121	115
4	Frankenhausen 1	1,90 m, Motor	Alphonse, Piroux	46	45	79	75	128	112
5	Frankenhausen 2	1,90 m, Motor	Alphonse, Piroux	56	49	100	95	129	116
6	Frankenhausen 3	1,90 m, Motor	Alphonse, Piroux	54	49	94	95	201 (116)	136
3 - 6			Mittelwert	50	50	90	88	126 (115)	136
			Standardabweichung	6,61	5,03	9,18	9,57	3,70	43,37
7	Lemgo 1	1,90 m, Motor	Eddy, Rico	51	64	104	107	148	147
8	Lemgo 2	1,90 m, Motor	<u>Eddy</u> , Ernesto, <u>Asilva</u>	44	43	97	110	217 (158)	167
9	Lemgo 3	1,90 m, Motor	<u>Eddy</u> , Ernesto, <u>Asilva</u>	59	78	124	133	165	168
7 - 9			Mittelwert	51	62	108	117	160 (158)	177
			Standardabweichung	7,51	17,62	14,01	14,22	10,44	35,92
10	Überlingen 3	1,90 m, Boden	<u>Max</u> , Doro, <u>Dolex</u>	-	-	82	88	119	143
11	Überlingen 1	2,40 m, Motor	Delia, Doro	-	-	126	112	235 (137)	133
12	Überlingen 2	2,40 m, Motor	Max, Doro	-	-	105	112	132	126
11 - 12			Mittelwert			116	112	184 (135)	130
			Standardabweichung			14,85	0,00	72,83	4,95

*) : erster Name = Pferd 1, zweiter Name = Pferd 2; bei drei Pferden sind Pferd 1 und 2 fett und unterstrichen, erster Name = Pferd 1, dritter Name = Pferd 2

4.3 Diskussion

4.3.1 Zugkraftbedarf

Die gemessenen Werte für den durchschnittlichen Zugkraftbedarf (s. Tabelle 4-3) liegen alle im Rahmen des für die eingesetzten Pferde Zumutbaren (vgl. Kapitel 3.3.1.1). Die im Vergleich zu den etwa gleich schweren Pferden in Frankenhausen und Lemgo bei den Überlinger Versuchen eingesetzten etwas leichteren Süddeutschen und Schwarzwälder Kaltblüter mit ca. 700 kg Lebendmasse pro Pferd kommen auf eine Dauerzugleistungsfähigkeit von ca. 1.900 N im Zweispänner und ca. 2.700 N im Dreispänner (bei angenommenen 12 % Spannverlust im Dreispänner). Auch für diese Pferde liegen die mittleren Zugkraftwerte somit im Bereich der Dauerleistungsfähigkeit, sowohl bei den motorgetriebenen Varianten im zweispännigen, als auch bei der bodengetriebenen Variante im dreispännigen Zug.

An den Standorten Überlingen und Frankenhausen sind alle gemessenen Werte deutlich einheitlicher als in Lemgo. Dies dürfte an der weniger bewegten Topographie der nahezu flachen Versuchsflächen in Überlingen und Frankenhausen liegen, wohingegen die Flächen 2 und 3 in Lemgo am Hang lagen. Dennoch zeigen die an allen Standorten hohen Standardabweichungen, die z.T. deutlich über 50 % des Mittelwertes betragen, dass auch innerhalb recht flacher Flächen große Schwankungen im Zugkraftbedarf auftreten.

Der Bodenantrieb der Zapfwelle verursacht im Vergleich zum Motorantrieb einen etwa doppelt so hohen mittleren Zugkraftbedarf. Der maximale Zugkraftbedarf ist bei Bodenantrieb im Gegensatz zu Motorantrieb im Mittel um ca. 25 % erhöht. Bezieht man den Vergleich lediglich auf die sich recht einheitlich darstellenden und somit gut vergleichbaren Überlinger Flächen, so fallen diese Unterschiede geringer aus: 1.550 N zu 2.587 N (\pm + 67 %) für den mittleren bzw. 4.835 N zu 5.061 N (\pm + 5 %) für den maximalen Zugkraftbedarf bei Bodenantrieb (vgl. Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4). Zu bedenken ist, dass der maximale Zugkraftbedarf auch situationsbedingt durch die Betätigung der Bremsen am Vorderwagen sein kann und nicht immer ausschließlich auf den Zapfwellenantrieb zurückgehen muss.

Vergleicht man anhand der Überlinger Flächen das 2,40 m Mähwerk mit dem motorgetriebenen 1,90 m Mähwerk, so ergibt sich ein um ca. 160 N oder etwa 10 % erhöhter mittlerer Zugkraftbedarf durch die um 0,50 m (= 26 %) größere Arbeitsbreite, während sich der maximale Zugkraftbedarf faktisch nicht verändert. Dies zeigt, dass der Zugkraftbedarf vor allem durch das Gewicht des Vorderwagens sowie die Bodenbeschaffenheit und in deutlich geringerem Maße durch die Arbeitsbreite beeinflusst wird.

4.3.2 Arbeitsgeschwindigkeit, Flächenleistung und Teilarbeitszeiten

Die mittleren Arbeitsgeschwindigkeiten bewegen sich zwischen $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ und $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (s. Tabelle 4-9). Deutliche Unterschiede sind nur in dem Sinne auszumachen, als der Bodenantrieb der Zapfwelle und der damit erhöhte Zugkraftbedarf zu einer etwas verminderten Geschwindigkeit führen (Versuch Nr. 10). Im Vergleich zum Durchschnitt der Versuche 1 bis 9, also über alle Standorte hinweg, beträgt diese Differenz ca. $1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, bezogen auf die Überlinger Versuche (Nr. 1 und 2) jedoch nur $0,65 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Dass die Arbeitsgeschwindigkeit durch den Bodenantrieb nur geringfügig zurück geht, ist sicher darauf zurückzuführen, dass der etwa doppelt so hohe Zugkraftbedarf (vgl. Kapitel 4.3.1) von drei Pferden aufgebracht wird, im Gegensatz zu den zwei Pferden bei der Variante mit motorgetriebener Zapfwelle. D.h., die drei Pferde müssen pro Pferd mehr Leistung aufbringen als die zwei Pferde bei Motorantrieb, aber diese geforderte Leistung liegt noch im Bereich des Möglichen, sodass nur ein geringer Einfluss auf die Arbeitsgeschwindigkeit vorliegt.

Auch der Vergleich des 2,40 m Mähwerks mit dem 1,90 m Mähwerk mit motorgetriebener Zapfwelle zeigt einen sehr geringen Unterschied in der Arbeitsgeschwindigkeit von $0,40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bei Betrachtung aller Standorte sowie $0,10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, wenn man nur die Überlinger Versuche betrachtet.

Tabelle 4-9: Arbeitsgeschwindigkeit, Flächenleistung und Anteile Teilarbeitszeiten

Versuch Nr.	Standort	Mähwerk, Antrieb der Zapfwelle	Arbeitsgeschwindigkeit Lastfahrt + Wenden (km * h ⁻¹)	Flächenleistung gesamt (ha * h ⁻¹)	Flächenleistung ohne Pausen und Störungen (ha * h ⁻¹)	Anteil Lastfahrt + Wenden (%)	Anteil Störungen (%)	Anteil Pause (%)
1 + 2	Überlingen 2	1,90 m, Motor	4,58	0,69	0,81	88	12	0
3 + 4	Frankenhau- sen 1	1,90 m, Motor	4,69	0,72	1,02	67	6	26
5	Frankenhau- sen 2	1,90 m, Motor	5,23	0,66	0,75	88	0	12
6	Frankenhau- sen 3	1,90 m, Motor	4,95	0,49	0,62	79	1	19
3 - 6		Mittelwert Standardabweichung	4,94 0,92	0,62 0,12	0,80 0,20	76 12,50	3 4,80	21 7,95
7	Lemgo 1	1,90 m, Motor	5,19	0,43	0,56	76	2	22
8	Lemgo 2	1,90 m, Motor	4,98	0,44	0,58	75	18	7
9	Lemgo 3	1,90 m, Motor	4,70	0,57	0,63	90	10	0
7 - 9		Mittelwert Standardabweichung	5,00 1,11	0,48 0,08	0,59 0,04	80 8,28	10 7,79	10 11,32
10	Überlingen 3	1,90 m, Boden	4,05	0,33	0,54	61	2	37
11	Überlingen 1	2,40 m, Motor	4,60	0,83	0,94	88	7	5
12	Überlingen 2	2,40 m, Motor	4,34	0,75	0,81	93	7	0
11 - 12		Mittelwert Standardabweichung	4,55 0,89	0,79 0,06	0,88 0,09	91 3,23	7 0,33	3 3,56

Mit Ausnahme der bodengetriebenen Variante (Versuch Nr. 10) verringert sich die mittlere Arbeitsgeschwindigkeit geringfügig, wenn man die Teilarbeiten Lastfahrt und Wenden zusammenfasst. D.h., der Wendevorgang wird mit einem geringeren Tempo ausgeführt als die Lastfahrt, was zum einen an den teilweise engen Kurvenradien liegen dürfte, die die Pferde gehen müssen. Ein weiterer Grund dürfte der verringerte Zugkraftbedarf durch das ausgehobene Mähwerk sein: bis zu einem gewissen Grad versuchen Pferde, einen erhöhten Zugkraftbedarf durch ein höheres Gangtempo auszugleichen; sinkt der Zugkraftbedarf, gehen sie etwas langsamer, nehmen sozusagen den Schwung raus (vgl. FISCHER 1952). Bei der bodengetriebenen Variante ist der Zugkraftbedarf durch den Zapfwellenantrieb so stark erhöht, dass die Pferde dies nicht durch Schwung kompensieren können, sondern gezwungen sind, langsamer zu gehen. Beim Wendevorgang, ist der Antrieb ausgeschaltet und zudem das Mähwerk ausgehoben. Dadurch sinkt der Zugkraftbedarf so stark, dass die Pferde schneller gehen.

Die erzielte Flächenleistung ist beim Vergleich der motorgetriebenen Varianten für die größere Arbeitsbreite (2,40 m) trotz geringerer Arbeitsgeschwindigkeit höher als für die kleinere (1,90 m), d.h. die geringere Geschwindigkeit wird durch die größere Arbeitsbreite überkompensiert. Bei gleicher Arbeitsbreite (1,90 m) wird bei motorgetriebener Zapfwelle sowohl eine höhere Arbeitsgeschwindigkeit, als auch eine größere Flächenleistung erzielt als bei Bodenantrieb. Die Versuche zeigen aber, dass es innerhalb dieser generellen Regeln große Schwankungsbreiten gibt, für die z.T. die unterschiedlichen Anteile der Teilarbeitszeiten an der Gesamtarbeitszeit verantwortlich sind.

Vergleicht man die Versuche mit 1,90 m und motorgetriebener Zapfwelle in Überlingen (Nr. 1 und 2) und in Frankenhausen (Nr. 3- 6), so wird deutlich, dass bei letzteren die höhere Arbeitsgeschwindigkeit letztlich dennoch zu einer geringeren Flächenleistung führt. Der Grund dafür ist, dass in Frankenhausen der Anteil der Pausen und Störungen an der Gesamtarbeitszeit mit knapp 25 % deutlich höher ist als in Überlingen (12 %). Der mit 21 % vs. 0 % deutlich erhöhte Pausenanteil ist zum einen sicher darin begründet, dass die Versuche in Frankenhausen mit durchschnittlich 100 min. deutlich länger dauerten, als die Überlinger Versuche mit im Mittel 43 min. Somit waren in Überlingen aufgrund der Kürze der Zeit keine Pausen notwendig. Zum anderen zeigt ein Vergleich der Versuche Nr. 1 und Nr. 4 (vgl. Tabelle 4-7), dass in Frankenhausen bei vergleichbarer Gesamtarbeitsdauer deutlich mehr Pausen eingelegt wurden als in Überlingen. Zwei möglich Erklärungen wären eine bessere Kondition der Überlinger Pferde, die Pausen dort nicht notwendig werden ließ, als auch unterschiedliche Erfahrung und Fahrweise des jeweiligen Fuhrmanns.

Bei den Lemgoer Versuchen (Nr. 7 - 9) ist die Arbeitsgeschwindigkeit noch etwas höher als in Frankenhausen, der Anteil der Pausen und Störungen an der Gesamtarbeitszeit ist geringer. Dennoch resultiert in Lemgo eine geringere Flächenleistung als in Frankenhausen. Dies ist zum einen erklärbar damit, dass bei den Versuchen in Frankenhausen exakter Bahn an Bahn gemäht wurde, d.h. die Arbeitsbreite des Mähwerks besser ausgenutzt wurde, während bei den Lemgoer Versuchen offenbar nur ein geringerer Anteil der theoretischen Arbeitsbreite auch tatsächlich realisiert werden konnte. Hinzu kommt aber vor allem, dass der Anteil der Teilarbeit Lastfahrt mit 65 % in Lemgo geringer ist als in Frankenhausen (70 %) während der Anteil der Teilarbeit Wenden mit 15 % deutlich höher ist als in Frankenhausen mit 6 % (vgl. Tabelle 4-7).

4.3.3 Herzfrequenz

Die mittleren Herzfrequenzen beim 1,90 m Mähwerk mit motorgetriebener Zapfwelle sind für die drei betrachteten Standorte mit Werten zwischen 88 min^{-1} und 117 min^{-1} recht einheitlich (vgl. Tabelle 4-8). Der resultierende Mittelwert von 99 min^{-1} ist höher als der Mittelwert für das bodengetriebene 1,90 m Mähwerk mit 85 min^{-1} , was zunächst einmal überrascht. Denn wie in Kapitel 4.3.2 ausgeführt, müssen die drei Pferde in Versuch Nr. 10 pro Pferd eine höhere Leistung aufbringen als die zwei Pferde in den Versuchen Nr. 1 - 9. Auch die maximalen Herzfrequenzen sind in Versuch Nr. 10 mit im Mittel 131 min^{-1} niedriger als in den Versuchen Nr. 1 - 9 mit 147 min^{-1} . Diese geringeren Herzfrequenzwerte bei Versuch Nr. 10 im Vergleich zu Nr. 1 - 9 wären nur erklärbar durch entweder eine deutlich bessere Kondition der eingesetzten Pferde oder aber die Fahrweise des Fuhrmanns, der den Pferden längere Pausen- und damit Erholungszeiten während der Arbeit zugesteht.

Beim Blick auf die Anteile der Teilarbeitszeiten (vgl. Tabelle 4-9) wird deutlich, dass der Pausenanteil bei Versuch Nr. 10 mit 37 % deutlich höher liegt, als bei den Versuchen Nr. 1 - 9. Vergleicht man die Versuche in Frankenhausen (Nr. 3 - 6), die mit im Mittel 90 min^{-1} bzw. 88 min^{-1} in etwa vergleichbare Herzfrequenzen wie Versuch Nr. 10 aufweisen, mit den Versuchen in Überlingen (Nr. 1 - 2) und Lemgo (Nr. 7 - 9), so zeigt sich auch hier ein mit 21 % gegenüber 0 % (Überlingen) bzw. 10 % (Lemgo) deutlich höherer Anteil an Pausen.

Folgerichtig liegen auch die mittleren Herzfrequenzen in Überlingen mit 100 min^{-1} und in Lemgo mit 108 min^{-1} bzw. 117 min^{-1} deutlich höher als in Frankenhausen mit 88 min^{-1} bzw. 90 min^{-1} .

Sowohl bei den Flächenversuchen in Frankenhausen als auch bei Versuch Nr. 10 in Überlingen war der Autor der Fuhrmann, während die übrigen Versuche von anderen Fuhrleuten bestritten wurden (Erhard Schroll in Lemgo, Versuche Nr. 7 - 9, Guido Weltin in Überlingen, Versuche Nr. 1, 2, 11 und 12). Offensichtlich hat bei den betrachteten Versuchen der Einfluss des Fuhrmanns durch seine Fahrweise, sprich die Gewährung von mehr Pausenzeit, das Ergebnis stark beeinflusst und die höhere geforderte Leistung in Versuch Nr. 10 überkompensiert. Dies legt auch den Schluss nahe, dass bei einer weniger „defensiven“ Fahrweise in Versuch Nr. 10 eine höhere Flächenleistung möglich gewesen wäre, ohne die Pferde zu überfordern.

Der Vergleich der Versuche Nr. 1 und 2 mit den Versuchen Nr. 11 und 12 in Überlingen zeigt, dass die größere Arbeitsbreite und der dadurch erhöhte Zugkraftbedarf (vgl. Kapitel 4.2.1) beim 2,40 m Mähwerk mit im Mittel 116 min^{-1} bzw. 112 min^{-1} zu etwas höheren mittleren Herzfrequenzen führen als beim 1,90 m Mähwerk (100 min^{-1}). Gleiches gilt für die maximalen Herzfrequenzen, wenn man die korrigierten Werte zu Grunde legt.

Ein Blick auf die Herzfrequenzkurven der Wallache „Dolex“ und „Max“ in Versuch Nr. 10 (vgl. Abbildung A-20 im Anhang) illustriert die gute Kondition der beiden Tiere. Die mittleren Herzfrequenzen sind mit 82 min^{-1} für „Max“ und 88 min^{-1} für „Dolex“ trotz des hohen Zugkraftbedarfs sehr moderat. Zu Beginn einer Arbeitsphase steigt die Herzfrequenz bei beiden Pferden sehr schnell von einem Wert zwischen 40 min^{-1} und 50 min^{-1} („Ruhepuls“) auf Werte in einem engen Bereich um 100 min^{-1} . Wird eine Pause eingelegt, sinken die Herzfrequenzen innerhalb von weniger als 10 Minuten wieder ab auf den Ruhepuls von ca. 50 min^{-1} . Bei erneutem Arbeitsbeginn steigen die Werte wiederum sehr schnell auf das vorherige Niveau von etwa 100 min^{-1} an. Dieses Verhalten wiederholt sich über die gesamte Arbeitszeit von ca. 2,5 h bei beiden Pferden nahezu synchron.

„When he [man, Anm. d. Autors] quits using beasts and uses machines, the earth defeats him quickly. The machine can't reproduce, nor does it fertilize the soil, and it eats what he cannot raise.”

Wenn er [der Mensch, Anm. d. Autors] aufhört Tiere einzusetzen und stattdessen Maschinen benutzt, wird die Erde ihn bald bezwingen. Die Maschine kann sich weder fortpflanzen, noch düngt sie den Boden, und sie isst, was der Mensch nicht anbauen kann.

Ernest Hemmingway, 1935, zit. in AINSWORTH (2004)

5. Vergleichende Diskussion der Versuche auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen und auf den Praxisbetrieben

5.1 Versuchsaufbau und Untersuchungsmethoden

Bei der Durchführung der Flächenversuche wäre die Erhebung von Parametern zur genauen Beschreibung des Geländes und des Aufwuchses wünschenswert gewesen, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander und mit denen des Parzellenversuchs zu verbessern. Dies war aus personellen und finanziellen Gründen jedoch ebenso wenig möglich, wie die vorherige Gewöhnung der Pferde aus den Praxisbetrieben in Lemgo und Überlingen an die für sie ungewohnte Gerätetechnik. Da es sich aber in allen Fällen um routinierte und täglich arbeitende Pferde mit guter Kondition handelte, dürfte dieser Faktor zu vernachlässigen sein, was die Betrachtung der erzielten Arbeitsgeschwindigkeiten belegt. Auch die aufgrund des deutlich geringen Arbeitsinsatzes der Pferde in Frankenhausen verglichen mit den Praxisbetrieben vermutlich schlechtere Kondition derselben schlägt sich weder beim Parzellenversuch, noch bei den Flächenversuchen in den Ergebnissen nieder. Während dies beim Parzellenversuch aufgrund der kurzen Versuchsdauern von jeweils etwa 10 Minuten mit längeren Standzeiten dazwischen auch nicht zu erwarten war, überrascht dieses Ergebnis bei den Flächenversuchen doch ein wenig. Ein Erklärungsansatz ist, dass auch hier die Arbeitsbelastung noch nicht ausreichend hoch war, um solche, durch unterschiedlich starke Ermüdung der Pferde verursachte Unterschiede zu generieren. Für zukünftige Untersuchungen leitet sich daraus der Hinweis ab, für eine abschließende Beurteilung der untersuchten Varianten möglichst größere Flächeneinheiten am Stück zu bearbeiten und dies an mehreren Tagen in Folge zu wiederholen.

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Zugkraftbedarf

Die Werte für den durchschnittlichen Zugkraftbedarf von V 6 sind in den Überlinger Versuchen deutlich höher als im Parzellenversuch und in den Flächenversuchen in Frankenhausen und in Lemgo (vgl. Tabelle 4-3 und Tabelle 5-1). Die deutlich höheren Werte bei den Überlinger Versuchen dürften darauf zurück zu führen sein, dass die Flächen in weiten Teilen unter Wasser standen, so dass das Mähwerk unter der Wasseroberfläche lief und der Boden sehr tiefgründig war. Dies erklärt auch, warum der Wert für V 7 in Überlingen deutlich höher ist als im Parzellenversuch, obwohl die Flächen in Überlingen eben waren, während im Parzellenversuch ein gewisses Maß an Steigung vorhanden war.

Die Werte für den maximalen Zugkraftbedarf sind bei beiden Varianten in den Flächenversuchen deutlich höher als im Parzellenversuch (vgl. Tabelle 4-3 und Tabelle 5-1). Der Grund für die Unterschiede, die auch innerhalb der beiden Varianten zwischen den einzelnen Versuchen größer sind als beim durchschnittlichen Zugkraftbedarf, dürfte vor allem in der geringen Messfrequenz der verwendeten Messtechnik von 1 Hz zu suchen sein. Da der Zugkraftbedarf mit einer sehr hohen Frequenz variiert, wäre eine Messtechnik mit deutlich höherer Frequenz besser geeignet gewesen, um die „wahren“ Maximalwerte zu erfassen. So können die gemessenen Werte die tatsächlichen Maximalwerte sein, es kann aber auch sein, dass es Werte unterhalb des Maximalwertes sind (s. Kapitel 3.3.1.3). Beim durchschnittlichen Zugkraftbedarf als Mittelwert aus sehr vielen Messwerten liegen die Ergebnisse der einzelnen Versuche näher beieinander, da hier mit gleicher Wahrscheinlichkeit niedrige wie hohe Werte aufgrund der geringen Aufnahme­frequenz der Messtechnik nicht gemessen werden. Dadurch gleichen sich die Fehler nach oben wie nach unten gegenseitig weitgehend aus.

Tabelle 5-1: Durchschnittlicher (N_{\emptyset}) und maximaler (N_{\max}) Zugkraftbedarf [N] im Parzellenversuch und in den Flächenversuchen

		<u>Parzellenversuch</u>			<u>Flächenversuche</u>		
		2000	2001	Gesamt	Überlingen	Frankenhausen	Lemgo
N_{\emptyset}	V 6 (1,90 m, Motor)	1.261	1.052	1.157	1.522	1.029	1.236
N_{\emptyset}	V 7 (2,40 m, Motor)	1.420	1.172	1.300	1.692	-	-
N_{\max}	V 6 (1,90 m, Motor)	3.233	2.207	2.726	3.488	4.199	4.024
N_{\max}	V 7 (2,40 m, Motor)	3.833	2.440	3.139	4.837	-	-

Letztlich kann man aus den vorliegenden Ergebnissen den Schluss ziehen, dass für ebene bis wenig geneigte Flächen mit normalem bis gutem Aufwuchs als Faustregel für V 6 ein durchschnittlicher Zugkraftbedarf von ca. 1.200 N, für V 7 von ca. 1.500 N angenommen werden kann. Damit liegen beide Mähwerke deutlich innerhalb des Dauerzugleistungs­vermögen eines Zweispanners mit Pferden, die eine Körpermasse von jeweils 700 kg und mehr aufweisen ($\geq 1.275 \text{ N} - 1.913 \text{ N}$; vgl. Kapitel 3.3.1.1).

5.2.2 Arbeitsgeschwindigkeit, Flächenleistung und Teilarbeitszeiten

Der Vergleich zwischen dem Parzellenversuch und den Flächenversuchen hinsichtlich der erzielten Arbeitsgeschwindigkeiten (vgl. Tabelle 5-2) widerlegt die in Kapitel 3.3.2.1 geäußerte Vermutung, im Parzellenversuch seien die Arbeitsgeschwindigkeiten im Vergleich zur Literatur so hoch, weil es aufgrund der Kürze der Arbeitszeit keine Ermüdungserscheinungen gegeben habe. Im Parzellenversuch erzielen V 6 und V 7 mit $4,9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bzw. $4,8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ nahezu die gleiche Geschwindigkeit. In den Flächenversuchen in Frankenhausen und Lemgo erzielt V 6 mit $4,9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ die gleiche Geschwindigkeit wie im Parzellenversuch, lediglich der Wert für die Überlinger Versuche ist mit $4,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ etwas geringer. Auch V 7 erzielt in Überlingen mit $4,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ eine etwas geringere Geschwindigkeit als in den übrigen Flächenversuchen. D.h., lediglich die

Pferde in Überlingen liefen mit $4,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ im Vergleich zum Parzellenversuch etwas langsamer, somit dürfte auch die geringere Geschwindigkeit von V 7 durch die Pferde und nicht durch die Variante bedingt sein. Die Pferde in Frankenhausen mit $4,9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, wie auch die Pferde in Lemgo mit $5,0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ liegen gleichauf mit den Werten des Parzellenversuchs. Es scheint also so zu sein, dass die Pferdegespanne jeweils „ihr“ Tempo gegangen sind, bzw. dass die Einflüsse der verschiedenen Fuhrleute unterschiedlich waren.

Die Unterschiede zwischen den Versuchen sind dennoch minimal, denn rundet man die Werte auf volle Kilometer pro Stunde, so beträgt die Geschwindigkeit bei allen Varianten in allen untersuchten Fällen $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, sowohl im Parzellenversuch als auch in den Flächenversuchen. In beiden Versuchsreihen sind somit offensichtlich keine Ermüdungserscheinungen aufgetreten, dafür dauerten offensichtlich auch die Flächenversuche nicht lange genug.

Tabelle 5-2: Arbeitsgeschwindigkeit ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$), Flächenleistung ($\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$) und Anteile Teilarbeitszeiten (%) im Parzellenversuch und in den Flächenversuchen

(L = Lastfahrt, W = Wenden, S = Störung, P = Pause)

		<u>Parzellenversuch</u>			<u>Flächenversuche</u>		
		2000	2001	Gesamt	Überlingen	Frankenhausen	Lemgo
V 6 (1,90 m, Motor)	km * h⁻¹	5,0	4,9	4,9	4,6	4,9	5,0
	ha * h⁻¹	0,76	0,79	0,78	0,69	0,62	0,48
	% L	81	86	83	81	70	65
	% W	14	11	13	7	6	15
	% S	5	3	4	12	3	10
	% P	0	0	0	0	21	10
V 7 (2,40 m, Motor)	km * h⁻¹	5,0	4,7	4,8	4,6	-	-
	ha * h⁻¹	1,01	1,00	1,00	0,79	-	-
	% L	86	88	87	83	-	-
	% W	13	12	13	8	-	-
	% S	2	0	1	7	-	-
	% P	0	0	0	3	-	-

Dass die Flächenleistungen trotz der nahezu identischen Arbeitsgeschwindigkeiten innerhalb einer Variante so stark schwanken, zum Teil trotz höherer Geschwindigkeit eine geringere Flächenleistung erreicht wird (vgl. v.a. V 6 in Lemgo und in Überlingen), belegt, dass die Anteile der einzelnen Teilarbeitszeiten hier einen deutlich größeren Einfluss haben als die Arbeitsgeschwindigkeit. Vor allem die den Pferden bei der Arbeit gewährten Pausen wirken sich stark aus. Dadurch liegen die in den Flächenversuchen tatsächlich erzielten Flächenleistungen auch deutlich unter den errechneten Werten (V 6: $0,88 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$, V 7: $1,09 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$, vgl. Kapitel 3.3.5). Diese Erkenntnis belegt zum einen, wie wichtig ein erfahrener Fuhrmann ist, um eine hohe Flächenleistung zu erzielen, ohne die Pferde dabei zu überlasten. Zum anderen wird an diesen Ergebnissen deutlich, dass die Ermittlung von Faustzahlen für pferdegezogene Geräte deutlich schwerer ist als bei schleppergezogener Technik, bei der das Zugmittel im Wesentlichen standardisiert ist. Um zu brauchbaren Ergebnissen zu kommen, ist bei pferdezogener Technik daher ein wesentlich größerer Versuchsumfang notwendig.

Vergleicht man die erzielten Flächenleistungen der Pferdevarianten mit Literaturwerten für Schlepperarbeit, so ergibt sich ein differenziertes Bild. Unter Beachtung der Parzellen- oder Schlaggröße ergeben sich in der

Regel geringere Flächenleistungen der Pferdevariante, die ziemlich exakt im Verhältnis zur höheren Fahrgeschwindigkeit des Schleppers stehen. Zum Teil werden aber auch vergleichbare Flächenleistungen erzielt. Für die Pferdevariante V 6 mit 1,90 m Arbeitsbreite ergeben sich aus den Flächenversuchen folgende Werte (s. Tabelle 5-3):

Tabelle 5-3: Flächenleistungen für Variante 6 (Doppelmesser-Mähwerk mit 1,90 m Arbeitsbreite am Vorderwagen, motorgetriebene Zapfwelle) aus den Flächenversuchen

Fläche	Flächengröße (ha)	Flächenleistung (ha * h ⁻¹)
Überlingen 2	0,98	0,69
Frankenhausen 1	2,71	0,72
Frankenhausen 2	0,98	0,66
Frankenhausen 3	0,70	0,49
Lemgo 1	0,81	0,43
Lemgo 2	0,67	0,44
Lemgo 3	0,55	0,57
Mittelwert	1,06	0,57

Mittelt man über diese Flächen, so ergibt sich bei einer durchschnittlichen Flächengröße von 1,06 ha für die Variante 6 eine durchschnittliche Flächenleistung von 0,57 ha.

In DLG (1979) wird für Balkenmähwerke mit 1,80 m Arbeitsbreite am Schlepper eine Flächenleistung von 0,8 ha * h⁻¹ bis 1,0 ha * h⁻¹, bei 2,10 m Arbeitsbreite von 1,0 ha * h⁻¹ bis 1,2 ha * h⁻¹ angegeben. Rechnet man diese Werte auf 1,90 m Arbeitsbreite um, ergibt sich eine Flächenleistung von 0,84 ha * h⁻¹ bis 1,09 ha * h⁻¹. In beiden Fällen wird eine Geschwindigkeit von 8 km * h⁻¹ bis 10 km * h⁻¹ angegeben. Hier ist die Arbeitsgeschwindigkeit also in etwa doppelt so hoch wie in den angestellten Versuchen, was die annähernd doppelte Flächenleistung erklärt.

DLG (1997) spricht bei Doppelmessermähwerken von ca. 0,5 ha * h⁻¹ pro Meter Arbeitsbreite, ohne Angabe der angenommenen Arbeitsgeschwindigkeit. Bei 1,90 m Arbeitsbreite resultiert hieraus eine angenommene Flächenleistung von ca. 0,95 ha * h⁻¹.

Der DLG-Prüfbericht zum in den vorliegenden Versuchen verwendeten Doppelmessermähwerk gibt für das 1,90 m breite Mähwerk eine Flächenleistung von 1,2 ha * h⁻¹, für das 2,40 m breite Mähwerk von 1,6 ha * h⁻¹ bei Fahrgeschwindigkeiten zwischen 6 km * h⁻¹ und 10 km * h⁻¹ an (DLG 1987). Bei „sehr günstigen Verhältnissen“ seien auch höhere Leistungen erreicht worden, Fahrgeschwindigkeiten bis zu 10 km * h⁻¹ seien „mit einwandfreiem Schnitt auch bei höheren Erträgen möglich“ (DLG 1987, S. 4).

In allen zitierten Fällen ist somit die Flächenleistung im entsprechenden Verhältnis zur höheren Fahrgeschwindigkeit des Schleppers gegenüber dem Pferdeeinsatz erhöht.

KTBL (2006) gibt für das Mähen in der Landschaftspflege mit einem Doppelmesser-Mähwerk mit 1,90 m Arbeitsbreite im Heckanbau am Allradtraktor folgende maximale Flächenleistungen in Abhängigkeit von der Parzellengröße an (s. Tabelle 5-4):

Vor allem die Überlinger Fläche lässt sich hiermit gut vergleichen, da sie ebenfalls eine Landschaftspflegefläche ist, während die Frankenhäuser und Lemgoer Flächen „normale“ Grünlandflächen und somit aufgrund ebenerer Bodenverhältnisse tendenziell besser zu bearbeiten sind. Der in den Flächenversuchen auf der Fläche Überlingen 2 ermittelte Wert von 0,69 ha * h⁻¹ liegt deutlich über dem entsprechenden Wert von 0,56 ha * h⁻¹ aus KTBL (2006). WELTIN (2002) gibt als Erfahrungswert auf denselben Flächen 0,5 ha * h⁻¹ an, allerdings erfolgte der Mähwerksantrieb dabei über Bodenantrieb und der Vorderwagen wurde von drei Pferden gezogen.

Tabelle 5-4: Maximale Flächenleistungen in Abhängigkeit von der Parzellengröße für ein Doppelmessermähwerk mit 1,90 m Arbeitsbreite im Heckanbau an einem Allradtraktor

Parzellengröße (ha)	0,1	0,5	1,0	2,0	5,0
Maximale Flächenleistung (ha * h ⁻¹)	0,22	0,45	0,56	0,63	0,71

Quelle: KTBL (2006, S. 21)

Der Mittelwert für die Flächenleistung des 1,90 m-Mähwerks aus allen Flächen der Flächenversuche ist mit 0,57 ha bei einer Flächengröße von 1,06 ha nahezu identisch mit der in KTBL (2006) für das gleiche Mähwerk an einem Schlepper angegebenen Leistung von 0,56 ha bei einer Flächengröße von 1,0 ha. Unter den erschwerten Bedingungen einer Landschaftspflegefläche legen die Ergebnisse nahe, dass es offensichtlich keinen nennenswerten Leistungsunterschied zwischen pferde- und schleppergezogenem Mähwerk gibt. Die Ergebnisse weisen somit darauf hin, dass zumindest überall dort, wo die hohe Arbeitsgeschwindigkeit eines Schleppers nicht zum Tragen kommt, der Pferdeeinsatz nicht notwendiger Weise mit einer geringeren Flächenleistung einhergeht.

5.2.3 Herzfrequenz

Sowohl bei den mittleren, als auch bei den maximalen Herzfrequenzen sind bei beiden Varianten keine wesentlichen Unterschiede zwischen dem Parzellenversuch und den Flächenversuchen feststellbar. Zumal dann nicht, wenn man die durch die Aussetzer der Messtechnik begründeten „Ausreißer-Werte“ bei den maximalen Herzfrequenzen korrigiert (vgl. Tabelle 5-5).

Die Werte für die Flächenversuche in Frankenhausen entsprechen ziemlich genau den Werten aus dem Parzellenversuch, der mit den gleichen Pferden und auf vergleichbaren Flächen durchgeführt wurde. Die Werte für die Überlinger Versuche und mehr noch für die Lemgoer Versuche liegen etwas höher. In den Überlinger Versuchen dürfte sich der tiefgründige, nasse Boden ausgewirkt haben, der den Pferden zum einen das Laufen erschwerte, zum anderen auch den Zugkraftbedarf des Vorderwagens erhöht hat. In Lemgo war die Topographie deutlich bewegter als in Frankenhausen und in Überlingen, was die Arbeit der Pferde erschwerte und somit zu den leicht erhöhten Werten geführt haben dürfte.

Auch innerhalb der einzelnen Versuche lassen sich zwischen den beiden Varianten V 6 und V 7 keine deutlichen Unterschiede feststellen. Die um einen halben Meter größere Arbeitsbreite von V 7 gegenüber V 6 hat offensichtlich nur einen geringfügigen Einfluss auf die Belastung der Pferde, der zu leicht erhöhten Werten bei V 7 gegenüber V 6 führt (vgl. Tabelle 5-5).

Da die Werte bei den Flächenversuchen nicht wesentlich von den Werten im Parzellenversuch abweichen, gelten für den Vergleich mit der Literatur die gleichen Aussagen wie in der Diskussion der Ergebnisse des Parzellenversuchs (s. Kapitel 3.3.8.1).

Tabelle 5-5: Mittlere (\emptyset HF) und maximale Herzfrequenz (max. HF) der Varianten 6 und 7 im Parzellenversuch und in den Flächenversuchen

kursive Zahlen = korrigierte ungefähre Maximalwerte, vgl. Text Kapitel 4.2.5, 2. Absatz

		<u>Parzellenversuch</u>						<u>Flächenversuche</u>					
		2000		2001		Gesamt		Überlingen		Frankenhausen		Lemgo	
Pferd		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
V 6 (1,90 m, Motor)	\emptyset HF (min^{-1})	101	99	92	88	96	94	100	100	90	88	108	117
	max. HF (min^{-1})	134	127	110	100	122	114	172 <i>114</i>	123	126	136 <i>115</i>	160	177 <i>158</i>
V 7 (2,40 m, Motor)	\emptyset HF (min^{-1})	106	104	95	91	101	97	116	112	-	-	-	-
	max. HF (min^{-1})	145	137	110	102	128	120	184 <i>135</i>	130	-	-	-	-

5.2.4 Fazit

Hinsichtlich der pferdegezogenen Mähwerke weisen die Ergebnisse sowohl des Parzellen- als auch der Flächenversuche insgesamt das 1,90 m Mähwerk als die effektivste und offenbar für die Pferde auch die schonendste Variante aus. Vor allem beim Mähen um Hindernisse herum oder entlang eines Zaunes ist das 1,90 m Mähwerk deutlich genauer und leichter zu manövrieren. Der 2,40 m Balken schwenkt in Wendungen deutlich weiter aus, was ein genaues Mähen erschwert. Somit ist das 1,90 m Mähwerk auch für den Fuhrmann die angenehmere Variante. Bei großen zusammenhängenden Flächen ohne Hindernisse empfiehlt sich allerdings der 2,40 m Balken aufgrund seiner größeren Flächenleistung bei kaum erhöhtem Zugkraftbedarf und nur mäßig stärkerer Beanspruchung der Pferde.

Neben der leichteren und genaueren Manövrierbarkeit des 1,90 m Mähwerkes dürfte sein Betrieb auch schonender für die Messer sein, da der Mähbalken sich beim Ausheben im Gegensatz zum Mähbalken mit 2,40 m Arbeitsbreite nicht durchbiegt. Beim 2,40 m Balken zieht das Gewicht des Außenschuhs die Balkenspitze nach unten, so dass sich der Balken nach oben durchbiegt. Dadurch steigt vermutlich die Abnutzung der Messer des 2,40 m Balkens und ihre Standzeit wird verringert. Genaue Zahlen aus der Literatur hierzu konnten nicht gefunden werden. DLG (1987) gibt für die Messer Standzeiten von 3 ha bis 6 ha an, ohne zwischen den Arbeitsbreiten zu unterscheiden, OPPERMANN & CLAßEN (1998) geben bei optimaler Wartung der Messer Standzeiten bis zu 20 ha an, ebenfalls ohne Bezug auf die Arbeitsbreite.

Der Bodenantrieb der Zapfwelle erweist sich aufgrund des hohen Zugkraftbedarfs als für den Pferdezug eher ungeeignet. Bei gleicher Arbeitsbreite ist der Zugkraftbedarf etwa doppelt so groß wie bei Motorantrieb. Etwa 50 % des Gesamtzugkraftbedarfs entfallen auf den Antrieb der Zapfwelle und damit des Messers, während der Messerantrieb bei den alten pferdegezogenen Grasmähern nur etwa 23 % des Zugkraftbedarfs verursachte. Bezogen auf den Zugkraftbedarf stellt die moderne Pferdetechnik im untersuchten Fall somit eine deutliche Verschlechterung gegenüber der alten Technik dar. Bereits diejenige der untersuchten Varianten mit der geringsten Arbeitsbreite überfordert bei Bodenantrieb der Zapfwelle einen Zweispänner Kaltblutpferde und kann nicht empfohlen werden. Die Montage von Zwillingrädern zur Erhöhung der Traktion führt zu einem um 8 %

bis 16 % erhöhten Zugkraftbedarf. Da die Zwillingsräder nur bei Bodenantrieb der Zapfwelle verwendet werden, unterstreicht diese Erhöhung die Nichteignung dieses Antriebssystems zumindest für den zweispännigen Zug. Bei motorgetriebener Zapfwelle erhöht sich der Zugkraftbedarf um ca. 3 % je 0,1 m Arbeitsbreite. Alle Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle sind für einen Zweispänner problemlos zu bewältigen.

Die Arbeitsgeschwindigkeit der untersuchten Pferdevarianten liegt bei allen durchgeführten Versuchen zwischen $4,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ und $5,4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, im Mittel $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, ohne erkennbaren Zusammenhang zu den untersuchten Varianten. Sie hängt in erster Linie von den Pferden und dem Fuhrmann ab. Die Schleppervarianten im Parzellenversuch liegen mit Werten zwischen $7,3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ und $8,0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ deutlich darüber.

Die Flächenleistung steigt bei den Pferdevarianten grundsätzlich mit der Arbeitsbreite, allerdings ist die pro Tag mit den Pferden bearbeitbare Fläche durch das Futteraufnahmevermögen begrenzt, aufgrund dessen die Pferde nicht beliebig viel Energie „tanken“ können - im Gegensatz zum Schlepper. Wichtiger als die Arbeitsgeschwindigkeit sind für die erzielbare Flächenleistung bei gegebener Arbeitsbreite die Kondition der Pferde und die Fahrweise des Fuhrmanns. Dies zeigen die Ergebnisse der Flächenversuche, bei denen teilweise trotz einer geringeren Arbeitsgeschwindigkeit eine höhere Flächenleistung bei gleicher Arbeitsbreite erzielt wurde. Die Erklärung liegt im Anteil der unterschiedlichen Teilarbeitszeiten: je mehr Störungen auftreten (bei bodengetriebener Zapfwelle häufiger als bei Motorantrieb) und je größer der Anteil der Wendevorgänge und vor allem der Anteil der den Pferden gewährten Pausen ist, desto geringer fällt die Flächenleistung aus.

Insgesamt wurden in den vorliegenden Versuchen höhere Flächenleistungen erzielt als in der historischen Literatur angegeben. Dabei erweist sich die moderne Arbeitspferdetechnik als deutlich leistungsfähiger verglichen mit dem alten Grasmäher.

Die Schleppervarianten haben eine höhere Flächenleistung als die Pferdevarianten; bei gleicher Arbeitsbreite erzielt die pferdegezogene Variante im Parzellenversuch 66 % der Schleppervariante, im Flächenversuch fallen die erzielten Flächenleistungen etwas geringer aus. Der Vergleich der Ergebnisse der Flächenversuche mit der Literatur zeigt, dass die moderne Pferdetechnik auf Landschaftspflegeflächen, auf denen der Schlepper seine Vorteile aufgrund der Bodenbeschaffenheit nicht ausspielen kann, an die Flächenleistung des Schleppers heranreichen kann.

Für die Ermittlung von Faustzahlen für den Arbeitspferdeeinsatz in der Landwirtschaft sind Flächenversuche deutlich besser geeignet als der Parzellenversuch. Allerdings sollten diese größere Flächen und deutlich mehr Versuchswiederholungen umfassen als in der vorliegenden Arbeit.

Betrachtet man den Treibstoff- sowie den gesamten Energiebedarf der untersuchten Varianten, so wird deutlich dass die Pferdevarianten deutlich effizienter arbeiten als die Schleppervarianten. Vergleicht man die Pferdevarianten untereinander, so liegt der Gesamtenergiebedarf bei motorgetriebener Zapfwelle um 67 % über demjenigen bei Bodenantrieb. Hier zeigt sich die höhere energetische Effizienz des Organismus Pferd gegenüber der Maschine. Der Ersatz von Schlepperarbeit durch Pferdearbeit bedeutet Ersatz fossiler durch regenerative Energie in einer Höhe von 40 % bei Motorantrieb bis 100 % bei Bodenantrieb der Zapfwelle.

Selbst unter Einbezug des Erhaltungsenergieverbrauchs der Pferde während der Ruhezeiten schneiden die Pferdevarianten mit bodengetriebener Zapfwelle sowie die Vorderwagenvariante mit 2,40 m Doppelmessermähwerk und motorgetriebener Zapfwelle pro Hektar energetisch besser ab, als der Schlepper mit dem 2,40 m Doppelmessermähwerk. Die Vorderwagenvariante mit 1,90 m Doppelmessermähwerk und motorgetriebener Zapfwelle benötigt nur geringfügig mehr Energie als die Schleppervariante mit 2,40 m Doppelmessermähwerk. Allerdings mit der Einschränkung, dass mit den Pferden aufgrund ihres begrenzten Futter- und damit Energieaufnahmevermögens pro Tag nur eine begrenzte Fläche bearbeitet werden kann, während der Schlepper zumindest theoretisch rund um die Uhr arbeiten kann, lediglich von kleineren Tankstopps unterbrochen.

Bei den mit dem Energieverbrauch eng verbundenen Emissionen sind die Pferde mit Ausnahme des Methanverbrauchs deutlich günstiger zu bewerten als der Schlepper. Selbst wenn man die Methan- und die Stickstoff-Emissionen der Pferde während der Ruhezeiten mit einbezieht, ändert sich dieses Ergebnis nicht. Lediglich das Verhältnis der Pferdevarianten untereinander ändert sich, da bei Einschluss der Ruhezeiten die Höhe der Emissionen pro Hektar umso geringer ist, je mehr Fläche pro Tag bearbeitet werden kann. Dieser Effekt überlagert die Emissionen des Aufbaumotors auf dem Vorderwagen, so dass bei dieser Betrachtungsweise die Varianten mit motorgetriebener Zapfwelle besser abschneiden als die mit Bodenantrieb.

Bei der Beurteilung von Schlepper- und Pferdearbeit ergeben sich wesentliche Unterschiede im Hinblick auf die Belastung und Verdichtung des bearbeiteten Bodens. In den vorliegenden Versuchen konnte dies nur in Ansätzen durch den Anteil der betretenen/überrollten Fläche an der insgesamt bearbeiteten Fläche erhoben werden. Dabei zeigt sich, dass dieser Flächenanteil bei den Pferdevarianten grundsätzlich geringer ist als bei den Schleppervarianten. Bei gleicher Arbeitsbreite beträgt die Bodenbelastung der Pferdevariante nur 40 % verglichen mit der Schleppervariante.

Untersucht man mit Hilfe der Literatur die unterschiedliche Verdichtungswirkung von Pferdehufen und Schlepperreifen bei einem Boden mit bekannten Eigenschaften genauer, so wird die Bedeutung dieses Unterschiedes für den Bodenschutz noch deutlicher. Denn obwohl unter den Pferdehufen ein deutlich höherer Kontaktflächendruck an der Bodenoberfläche als unter den Schlepperreifen herrscht, findet eine Verdichtung des Bodens lediglich im Bereich des bearbeiteten Oberbodens statt. Der durch die Hufe verursachte Druck wird bereits im mineralischen Oberboden gänzlich abgebaut, der Unterboden wird in keiner Weise tangiert. Demgegenüber wird der gesamte mineralische Oberboden durch die Schlepperreifen verdichtet und der Druck an der Grenze zum Unterboden liegt im betrachteten Fall immer noch bei 23 % bis 35 % des Kontaktflächendrucks an der Bodenoberfläche. Der Unterboden wird bei den untersuchten Varianten und den unterstellten Bodenverhältnissen nicht verdichtet, die Zahlen belegen aber eine hochgradige Verdichtungsgefährdung des Unterbodens, sollten die Bodenverhältnisse nur geringfügig instabiler sein als unterstellt.

Die physiologische Belastung der Pferde konnte in den vorliegenden Versuchen nur ansatzweise erfasst werden. Dabei hat sich die Herzfrequenz als der am besten geeignete unter den untersuchten Parametern erwiesen. Die ermittelten Werte zeigen eine deutlich höhere Belastung der Pferde bei den Vorderwagenvarianten mit Bodenantrieb der Zapfwelle verglichen mit denen mit Motorantrieb, während der alte Grasmäher im Bereich der Letzteren liegt. Der Vergleich mit der Literatur zeigt bei den physiologischen Parametern eine gute Übereinstimmung mit den hier ermittelten Werten.

6. Ausblick – Der landwirtschaftliche Arbeitspferdeeinsatz im 21. Jahrhundert – eine Alternative für den Ökologischen Landbau?

Der Einsatz von Arbeitspferden kann grundsätzlich keine allgemeingültige Strategie für die Zukunft des Ökologischen Landbaus sein, da - wie in Kapitel 2 ausgeführt - die Freude am Umgang mit den Pferden und der Wille zur Pferdearbeit bei einer Vielzahl von Menschen unabdingbare Voraussetzungen sind. Daher muss obige Frage dahingehend präzisiert werden, ob der Arbeitspferdeeinsatz eine Alternative für die ökologischen Betriebe sein kann, bei denen diese Voraussetzungen gegeben sind. Die vorliegende Arbeit kann und will keine abschließenden Antworten auf diese Frage geben, da hierfür weit umfangreichere Untersuchungen notwendig wären. Sie ist ein erster Schritt, um am Beispiel der Mahd im Grünland die Möglichkeiten moderner pferdegezogener Technik im Ökologischen Landbau aufzuzeigen.

Die Ergebnisse wie auch die Auswertung der Literatur belegen deutliche ökologische Vorteile des Arbeitspferde- gegenüber dem Schleppereinsatz. Hinsichtlich der Energie für die Arbeitserledigung führt der Einsatz von Arbeitspferden anstelle des Schleppers bei Verwendung eines Hilfsmotors auf dem Vorderwagen zu einem 40 %igen und bei Bodenantrieb der Zapfwelle zu einem 100 %igen Ersatz fossiler durch regenerative Energie. Zudem spart der Einsatz von Arbeitspferden anstelle des Schleppers bezogen auf die verrichtete Arbeit netto Energie ein. Mit Ausnahme von Methan ist auch der Schadstoffausstoß bei der verrichteten Arbeit deutlich geringer als beim Schleppereinsatz. Das wohl wichtigste ökologische Argument für den Pferdeeinsatz ist die erheblich verringerte Gefährdung hinsichtlich Bodenverdichtung, da beim Pferdeeinsatz lediglich 33 % bis 57 % der bearbeiteten Fläche betreten oder überrollt werden, im Gegensatz zu 67 % bis 85 % beim Schleppereinsatz. Bei gleicher Arbeitsbreite beträgt die Bodenbelastung beim Pferdeeinsatz lediglich 40 % derjenigen beim Schleppereinsatz. Die Verdichtungen durch die Pferdehufe beschränken sich dabei auf den Oberboden, obwohl der Kontaktflächendruck an der Bodenoberfläche deutlich höher ist als unter den Schlepperreifen. Der Bodendruck der Pferdehufe wird bereits im Oberboden nahezu gänzlich abgebaut, so dass es bei Pferdeeinsatz keine Gefahr von Verdichtungen im Unterboden gibt. Im Gegensatz dazu verdichtet der Schlepper nicht nur den Oberboden, sondern der Kontaktflächendruck wird im Boden sehr viel langsamer abgebaut als unter den Pferdehufen, so dass auch der Unterboden verdichtungsgefährdet ist. Die verschiedenen technischen Versuche der Verhinderung von Bodenverdichtungen durch Maschinen, wie Breitreifen, Raupenfahrwerke etc., müssen als gescheitert betrachtet werden.

Nur in Ansätzen zu beantworten ist bisher die Frage, wie die Energie- und Schadstoffbilanz insgesamt aussehen, wenn pferdeseitig für die arbeitsfreien Tage der Erhaltungsenergiebedarf der Pferde, der Energiebedarf für ihre Haltung und Betreuung sowie die hierbei jeweils entstehenden Emissionen in die Berechnungen einfließen. Denn dafür müsste zunächst der jährliche Gesamtarbeitsumfang der Pferde ermittelt werden, um anschließend den Aufwand an den arbeitsfreien Tagen anteilig auf alle anfallenden Arbeiten umzulegen. Für einen fairen Vergleich zwischen Pferd und Schlepper müssten analog dazu auf der Schlepperseite die Energie- und Schadstoffbilanzen für die Gewinnung der Rohstoffe für den Schlepperbau, die Herstellung des Schleppers sowie die Reparatur- und Wartungsarbeiten und schließlich die Entsorgung des Schleppers einfließen. Es wird deutlich, dass diese Fragen einer eigenen, umfangreichen Untersuchung bedürfen. Die Arbeiten von JACKSON & BENDER (1982), BENDER (2001) und RYDBERG & JANSÉN (2002) geben allerdings deutliche Hinweise darauf, dass der Pferdeeinsatz letztlich in energetischer Hinsicht die günstigere Variante ist. Zumal mit Blick auf die absehbar endlichen fossilen Energiequellen die Frage der Energiequalität (fossil oder regenerativ) wichtiger ist als die Frage der Quantität, und diesbezüglich schneidet das Pferd in jedem Fall besser ab als der Schlepper (JANSÉN 2000). Grundsätzlich gilt, je umfangreicher der Einsatz der Pferde über das Jahr ist, je besser sie ausgelastet sind, desto weniger fällt der Aufwand an den arbeitsfreien Tagen insgesamt ins Gewicht, da bei

jedem Arbeitsgang, der mit den Pferden anstelle des Schleppers durchgeführt wird, netto Energie eingespart wird,

Den ökologischen Vorteilen stehen in ökonomischer Hinsicht eine deutlich geringere Flächenleistung und damit ein erhöhter Arbeitskraftstundenbedarf je Flächeneinheit sowie eine durch die notwendigen Fress- und Regenerationsphasen der Pferde pro Tag begrenzte maximal bearbeitbare Fläche gegenüber. Hinzu kommen einerseits Arbeitszeit und Kosten für die Haltung und Betreuung der Pferde, auch an den arbeitsfreien Tagen, sowie andererseits im Vergleich zum Schlepper geringere Investitionskosten. Eine abschließende ökonomische Bewertung ist derzeit nicht möglich, da auch hierzu weitere, umfangreiche Untersuchungen notwendig wären.

In Summe weisen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit darauf hin, dass der Einsatz von Arbeitspferden gerade für den Ökologischen Landbau, in dessen Kreislaufgedanken er sich sehr gut einfügt, zumindest *eine* ernst zu nehmende Option darstellt, und dass es sich lohnt und geboten erscheint, diese Option durch weitere, umfangreiche Forschungsarbeiten zu erhellen, um die zahlreichen noch offenen Fragen zu klären. Dies ist notwendig, um einerseits zu einer realen Bewertung des Arbeitspferde- im Vergleich zum Schleppereinsatz zu gelangen und andererseits die notwendigen Daten für die Planung in der landwirtschaftlichen Praxis zu erhalten.

Offene Fragen

Ein erster Schritt auf dem Weg zu mehr Klarheit bzgl. des Einsatzes von Arbeitspferden im Ökologischen Landbau sollte die Untersuchung weiterer moderner Arbeitspferdegeräte sein. Neben der Grünlandkette bieten sich hier als Einstieg die Pflegearbeiten in Reihenkulturen an.

Hinsichtlich der Mahd wäre es hilfreich, das Mähwerk der Firma I&J aus den USA mit einer Arbeitsbreite von 2,30 m und Bodenantrieb (SCHROLL 2012) in Anlehnung an die hier vorliegende Arbeit auf seine Leistungsfähigkeit und die Voraussetzungen und Grenzen seiner Anwendbarkeit zu untersuchen. Nicht zuletzt auch deshalb, um klare Aussagen hinsichtlich der (In-)Effizienz der Vorderwagentechnik im Vergleich zu pferdegezogenen Spezialgeräten treffen zu können. Ebenso sollten die verschiedenen Geräte und -kombinationen für die übrigen Arbeiten der Grünlandkette (s. z.B. HEROLD et al. 2009) betrachtet werden. Bei den Untersuchungen zum Energieverbrauch sollten immer auch die entstehenden Schadstoffe betrachtet werden, um Antworten hinsichtlich der Klimaverträglichkeit des Arbeitspferdeeinsatzes im Vergleich zum Schleppereinsatz treffen zu können.

Neben der Performance der Gerätetechnik in den verschiedenen Arbeitsbereichen, die auch für die konkrete Betriebsplanung in der Praxis von grundlegender Bedeutung ist, ist das Thema Bodenschonung durch Arbeitspferdeeinsatz im Vergleich zum Schleppereinsatz vielleicht eines der wichtigsten für die Zukunft. Denn auch der Ökologische Landbau hat bisher keine Antwort auf die Frage, wie die Entstehung von Bodenverdichtungen zukünftig verhindert werden kann. Im Gegenteil, die derzeitige Tendenz zu immer größeren Betrieben mit entsprechender Technik auch im Ökologischen Landbau lässt befürchten, dass hier die gleichen Fehler gemacht werden, wie im konventionellen Bereich.

Für eine umfassende Bewertung des Arbeitspferdeeinsatzes ist die Frage der Arbeitswirtschaft von zentraler Bedeutung. Denn alle Liebe zum Pferd und aller unbedingter Wille zur Arbeit mit Pferden helfen am Ende nicht weiter, wenn die Umsetzung aus arbeitswirtschaftlichen Gründen nicht möglich ist. Neben der Flächenleistung und damit dem Arbeitskraftstundenbedarf der verschiedenen Geräte und Arbeitsgänge sind Angaben zum täglich notwendigen Aufwand für Haltung, Pflege und Versorgung der Pferde entscheidend. Hierzu lassen sich aus der Literatur keine validen Angaben entnehmen, da sich zum einen die Möglichkeiten in der Pferdehaltung gegenüber den Bedingungen zur Zeit der letzten diesbezüglichen Studien über Arbeitspferde grundlegend verändert haben, andererseits die Haltung von Zucht-, Sport- oder Freizeitpferden nur sehr bedingt als Vergleich taugt. Zu untersuchen wäre, wie hoch der tatsächliche tägliche Arbeitsaufwand ist, wenn man die

modernen Möglichkeiten in der Pferdehaltung optimal nutzt. Immer damit verbunden muss die Frage einer möglichst tiergerechten Haltung sein, die der Ökologische Landbau explizit als Ziel definiert. Dabei gilt es zu prüfen, ob und wie eine möglichst tiergerechte Haltung zugleich den Arbeitskraftbedarf für Haltung und Betreuung der Pferde minimieren kann, wie erste Erfahrungen nahe legen (ELSBACH 2010).

Fasst man die Daten zur Leistungsfähigkeit der modernen Pferdetechnik und zum Arbeitsaufwand für die Haltung und Versorgung der Pferde zusammen, so ergibt sich der notwendige Arbeitskraftbedarf für die Umsetzung des modernen Arbeitspferdeeinsatzes im Ökologischen Landbau. Dieser wird im Vergleich zum Schleppereinsatz vermutlich höher ausfallen, und es schließt sich unmittelbar die Frage an, ob die notwendigen personellen Kapazitäten verfügbar sind bzw. wie diese, nicht zuletzt durch die Einbindung des Themas in die Berufs- wie auch die universitäre Ausbildung, erreicht werden können.

Ebenso wichtig ist die Wirtschaftlichkeit des Arbeitspferdeeinsatzes im Ökologischen Landbau, zu deren Beurteilung u.a. alle bisher aufgezeigten Fragen geklärt sein müssen. Ist moderner Arbeitspferdeeinsatz im Ökologischen Landbau unter den heutigen ökonomischen Rahmenbedingungen machbar, und wenn ja, mit welchem Betriebsergebnis? Und wie müssten sich diese Rahmenbedingungen gegebenenfalls ändern, um einen Erfolg möglich zu machen bzw. das Betriebsergebnis entscheidend zu verbessern?

Bei der Weiterentwicklung des Arbeitspferdeeinsatzes in die Zukunft geht es aber nicht nur um technische und wirtschaftliche Fragen, sondern vor allem auch um Glaubwürdigkeit. Pferdegezogene Technik muss sich in ihren Eigenschaften und in ihren Umwelteffekten von Schleppertechnik unterscheiden und die negativen Auswirkungen der Schleppertechnik vermeiden (SCHMIT 2008b). In dieser Hinsicht ist auch die Forschung zum Ökologischen Landbau gefragt. Immerhin findet dieses Thema inzwischen auf EU-Ebene Beachtung und wurde in den Europäischen Strategieplan für die zukünftige Forschung zum Ökologischen Landbau aufgenommen (SCHMID et al. 2009).

Arbeitspferde- oder Schleppereinsatz - eine Systemfrage

Die Entscheidung, Arbeitspferde oder Schlepper in der Landwirtschaft einzusetzen, ist eine Entscheidung, die weit über die Frage der Form der Zugkraft hinausgeht. Denn beide Antriebskräfte können nicht für sich isoliert betrachtet werden, sondern sind jeweils Teil eines ganzen „Paketes“, eines Systems (SCHMIT 2008b, BERRY 2010). Während der Schlepper das System Ökologischer Landbau, das einen möglichst weitgehend geschlossenen Betriebskreislauf und eine größtmögliche Schonung von Umwelt und Ressourcen anstrebt, auf vielfältige Weise durchbricht, passt sich das Pferd vollständig in dieses System ein. Während der Schlepper selber sowie die notwendigen Betriebsstoffe ausnahmslos von außen zugekauft werden müssen und dadurch eine erhebliche Menge an Kapital den Betrieb verlässt, kann das Pferd im eigenen Betrieb erzeugt und vollständig mit Futtermitteln aus diesem Betrieb ernährt werden. Der Anbau der Futtermittel sowie die Bereitstellung des notwendigen Grünlandes werden in vielen Fällen zu einer Aufweitung der Fruchtfolge und damit zu einer ökologischen Aufwertung des Betriebes führen. Allerdings ist zu bedenken, dass hierfür ca. 7 % (BENDER 2001) bis 10 % (DEGREIF 1993) der Betriebsfläche notwendig sind, die somit nicht für die Produktion marktfähiger Güter zur Verfügung stehen. Während der Schlepper die Umwelt in Form von Bodenschäden, Lärmbelästigung und Luftverunreinigung schädigt, gehen vom Pferd keine Gefährdungen aus, erste Hinweise deuten gar auf eine den Boden gesundende Wirkung des Pferdeeinsatzes hin (MORDHORST 2009). Der Pferdemist fördert die Bodenfruchtbarkeit, erhöht den Humusgehalt des Bodens und ernährt somit letztlich die Kulturpflanzen.

Aufgrund dieser „Systemnähe“ von Arbeitspferdeeinsatz und Ökologischem Landbau kommt letzterem hinsichtlich der Förderung des landwirtschaftlichen Einsatzes von Arbeitspferden eine Vorreiterrolle zu.

Die Situation des Arbeitspferdeeinsatzes im Ökologischen Landbau heute ähnelt der des Ökologischen Landbaus vor einigen Jahrzehnten, als dieser nicht ernst genommen und die landwirtschaftliche Förderung ausschließlich auf die konventionelle Landwirtschaft ausgerichtet wurde. Inzwischen ist der Ökologische Landbau anerkannt und hat sich nicht nur als konkurrenzfähig gegenüber der konventionellen Landwirtschaft, sondern als dieser in vielen Bereichen überlegen erwiesen. Dennoch gibt es auch im Ökologischen Landbau Verbesserungsbedarf. Der Arbeitspferdeeinsatz bietet offensichtlich Potenzial, zur Realisierung einer nachhaltigen und zukunftsfähigen Ökologischen Landwirtschaft beizutragen. Es ist zum einen an der Politik und den Interessenverbänden des Ökologischen Landbaus, auf eine förderliche Gestaltung der Rahmenbedingungen hinzuwirken. Zum anderen stehen die Vertreter des Arbeitspferdeeinsatzes selber in der Pflicht, diesen kontinuierlich weiter zu entwickeln und stetig zu verbessern. Beides sollte *jetzt* in Angriff genommen werden.

7. Zusammenfassung

Während der landwirtschaftliche Einsatz von Zugtieren im weltweiten Maßstab nach wie vor eine erhebliche Rolle spielt und wohl auch zukünftig spielen wird, wurden die Zugpferde und -rinder in Westeuropa in den 1950er und 1960er Jahren nahezu vollständig vom Schlepper verdrängt. Mit Beginn der 1990er Jahre ist – wenn auch auf niedrigem Niveau – eine langsame aber stetige Zunahme des Einsatzes von Arbeitspferden in Deutschland mit einem Schwerpunkt im Ökologischen Landbau zu beobachten. Im Gegensatz zur Schlepper-technik liegen bisher keine aussagekräftigen Daten zu Leistungsfähigkeit und Einsatzvoraussetzungen vor allem moderner pferdegezogener Geräte vor. Diese Daten sind jedoch Voraussetzung sowohl für die Beurteilung des Potenzials des Arbeitspferdeeinsatzes für eine nachhaltige und umweltschonende Landwirtschaft, als auch für die Planung in der landwirtschaftlichen Praxis.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden am Beispiel der Mahd im Grünland wissenschaftliche Daten zum Leistungspotential moderner pferdegezogener Technik in der hiesigen Landwirtschaft erhoben. Auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen, dem Versuchsbetrieb für Ökologischen Landbau der Universität Kassel, wurde dazu in den Jahren 2000 und 2001 ein Parzellenversuch mit insgesamt sieben verschiedenen pferde- und zwei schleppergezogenen Varianten durchgeführt. Zum Einsatz kam ein historischer Grasmäher *Bautz* „GM 20“ mit 1,30 m Arbeitsbreite sowie ein pferdegezogener Vorderwagen „Pintow Power Cart“ der Firma *Carthorse Machinery* mit angebautem Heck-Doppelmessermähwerk der Firma *Mörtl* in den Arbeitsbreiten 1,65 m, 1,90 m und 2,40 m. Der Antrieb der Zapfwelle erfolgte zum einen durch die Hinterräder des Vorderwagens (Bodenantrieb, bei 1,65 m Arbeitsbreite), zum anderen durch einen 13,4 kW starken Benzinmotor (Motorantrieb, bei 1,65 m, 1,90 m und 2,40 m Arbeitsbreite). Das 2,40 m breite Mähwerk wurde zudem an einem Schlepper vom Typ „Farmer 309 C“ der Marke *Fendt* im Heckanbau eingesetzt. Als weitere Variante kam ein Front-Scheibenmähwerk der Firma *Mörtl* mit 2,90 m Arbeitsbreite am selben Schlepper zum Einsatz.

Die bei den Versuchen eingesetzten Pferde waren zwei Ardenner Wallache im Alter von 6 und 7 Jahren sowie zwei Ardenner Stuten im Alter von 4 und 8 Jahren. Bei allen vier Pferden handelte es sich um für landwirtschaftliche Arbeiten ausgebildete Zugpferde, die mit den zu verrichtenden Arbeiten vertraut waren.

Erfasst wurden der Zugkraftbedarf, die Arbeitsgeschwindigkeit, die Arbeitsleistung der Pferde, die erzielte Arbeitsbreite, die Flächenleistung, die Gesamtarbeitszeit einschließlich der Teilarbeitszeiten, die Verdichtungsgefährdung des Bodens und die Arbeitsbelastung der Pferde anhand der physiologischen Parameter Herzfrequenz, Atemfrequenz, Körpertemperatur und Schwitzen sowie der Treibstoff- und Energiebedarf der Pferde, des Aufbaumotors und des Schleppers, aus denen die entstehenden Emissionen berechnet wurden.

Dieser Parzellenversuch wurde in den Jahren 2000 bis 2002 durch Flächenversuche auf drei Praxisbetrieben ergänzt, bei denen das Doppelmessermähwerk mit 1,90 m und 2,40 m am pferdegezogenen Vorderwagen mit den jeweils betriebseigenen Pferden eingesetzt und eine Auswahl der genannten Parameter erfasst wurden.

Folgende wichtige Ergebnisse lassen sich festhalten:

→ Der Bodenantrieb der Zapfwelle führt verglichen mit motorgetriebener Zapfwelle bei den pferdegezogenen Varianten beim selben Mähwerk etwa zum doppelten Zugkraftbedarf. Der Zugkraftbedarf bei 1,65 m Arbeitsbreite und Bodenantrieb der Zapfwelle übersteigt die Dauerleistungsfähigkeit eines 2-Spanners mit 850 kg schweren Pferden. Über 50 % des Zugkraftbedarfs bei den pferdegezogenen Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle wird durch den Zapfwellenantrieb verursacht, bei historischen pferdegezogenen Grasmähern liegt der Anteil des Messerantriebs am Zugkraftbedarf lediglich bei ca. 23 %. Die Montage von Zwillingreifen an den Hinterrädern des Vorderwagens zur Traktionserhöhung bei Bodenantrieb führt zu einem um 8 % - 16 % höheren durchschnittlichen Zugkraftbedarf. Bei motorgetriebener

7. Zusammenfassung

Zapfwelle steigt der Zugkraftbedarf mit zunehmender Arbeitsbreite des Mähwerks um ca. 3 % je 0,1 m Arbeitsbreite.

- Die Arbeitsgeschwindigkeiten der Pferdevarianten liegen zwischen $4,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ und $5,4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, ohne erkennbare Abhängigkeit von Arbeitsbreite oder Antriebsart der Zapfwelle. Die Arbeitsgeschwindigkeiten der Schleppervarianten variieren zwischen $7,3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ und $8,0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Die Arbeitsleistung der Pferde liegt bei bodengetriebener Zapfwelle zwischen 3,2 kW und 3,7 kW, bei motorgetriebener Zapfwelle zwischen 1,6 kW und 1,8 kW. Die tatsächlich erzielten Arbeitsbreiten der verschiedenen Mähwerke liegen bei den pferdegezogenen Varianten zwischen 87 % und 95 % der vom Hersteller angegebenen Arbeitsbreite, bei den Schleppervarianten zwischen 92 % und 93 %. Der Anteil Störungen an der Gesamtarbeitszeit ist bei den pferdegezogenen Varianten bei bodengetriebener Zapfwelle höher als bei Motorantrieb der Zapfwelle.
- Die Flächenleistung der Pferdevarianten ohne Berücksichtigung von Pausen und Störungen steigt mit zunehmender Arbeitsbreite von $0,53 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ (1,30 m) über $0,63 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ bis $0,72 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ (1,65 m) und $0,78 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ (1,90 m) auf $1,00 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ (2,40 m), die Flächenleistung der Schleppervarianten liegt bei $1,51 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ (2,40 m) bzw. $1,84 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ (2,90 m). Bei 2,40 m Arbeitsbreite beträgt die mit den Pferden erzielte Flächenleistung ($1,00 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$) 66 % der bei gleicher Arbeitsbreite mit dem Schlepper erzielten Leistung ($1,51 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$). Die pro Tag mit Pferden maximal bearbeitbare Fläche ist durch notwendige Futteraufnahme- und Ruhezeiten begrenzt. Sie steigt mit zunehmender Arbeitsbreite des Mähwerks und liegt zwischen $2,37 \text{ ha} \cdot \text{d}^{-1}$ und $5,03 \text{ ha} \cdot \text{d}^{-1}$.
- Bezogen auf die verrichtete Arbeit sind die Pferde in energetischer Hinsicht deutlich effektiver als Motoren. Der Energieverbrauch je ha ist bei den Pferdevarianten geringer als bei den Schleppervarianten. Bei gleicher Arbeitsbreite beträgt die Energieeinsparung durch Pferdeeinsatz bei motorgetriebener Zapfwelle 26 % gegenüber dem Schlepper. Bei den Pferdevarianten benötigt der Motorantrieb der Zapfwelle genau so viel Energie, wie bei Bodenantrieb der Zapfwelle für die gesamte Arbeitsleistung benötigt wird. Bei gleicher Arbeitsbreite liegt der Gesamtenergieverbrauch bei motorgetriebener Zapfwelle um 67 % höher als bei bodengetriebener Zapfwelle. Bezogen auf die zur Verrichtung der Arbeit benötigte Energie beträgt der Ersatz fossiler durch erneuerbare Energie bei den Pferdevarianten unabhängig von der Arbeitsbreite bei bodengetriebener Zapfwelle 100 %, bei motorgetriebener Zapfwelle 40 %. Selbst bei Umlegung des Erhaltungsenergieverbrauchs der Pferde während der Ruhezeiten auf die bearbeitete Fläche schneiden die Pferdevarianten mit bodengetriebener Zapfwelle sowie die Vorderwagenvariante mit 2,40 m Doppelmähwerk und motorgetriebener Zapfwelle pro Hektar energetisch besser ab, als der Schlepper. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass mit den Pferden aufgrund ihres begrenzten Futter- und damit Energieaufnahmevermögens pro Tag nur eine begrenzte maximale Fläche bearbeitet werden kann; diese ist umso größer, je geringer der Energiebedarf und je größer die Flächenleistung der Variante ist.
- Der Schadstoffausstoß je Flächeneinheit ist bei den Pferden geringer als beim Schlepper, einzige Ausnahme hierbei ist der Methanausstoß (CH_4). Auch unter Umrechnung der Gesamt-Methan- und -Stickstoff-Emissionen der Pferde während der Ruhezeiten auf die bearbeitete Fläche ändert sich an dieser Aussage nichts. Die Pferdevarianten schneiden umso günstiger ab, je größer die pro Tag bearbeitbare Fläche ist, sprich, je geringer der Energiebedarf und je größer die Flächenleistung ist.
- Die Bodenbelastung – gemessen an der befahrenen und betretenen Fläche - ist bei Pferdeeinsatz deutlich geringer als bei Schleppereinsatz. Bei gleicher Arbeitsbreite (2,40 m) werden bei der Pferdevariante 33 % der insgesamt bearbeiteten Fläche betreten und überrollt und damit potentiell verdichtet, bei der Schleppervariante 82 %. Zudem belegen Berechnungen mit Hilfe von Literaturwerten, dass bei gleichen Bodenverhältnissen trotz deutlich höheren Kontaktflächendrucks unter den Pferdehufen als unter den Schlepperreifen beim Pferdeeinsatz der Oberboden weniger stark verdichtet wird und der Unterboden im Gegensatz zum Schleppereinsatz nicht in Gefahr ist, verdichtet zu werden.

7. Zusammenfassung

- Bei bodengetriebener Zapfwelle ist die Arbeitsbelastung der Pferde bei den Vorderwagenvarianten im Vergleich zum Motorantrieb höher, während der Grasmäher im Bereich der Vorderwagenvarianten mit motorgetriebener Zapfwelle liegt. Das belegen die erfassten physiologischen Parameter. Die Werte für den Ruhepuls vor Versuchsbeginn lagen bei allen Pferden und allen Varianten zwischen 45 min^{-1} und 60 min^{-1} . Die durchschnittliche Herzfrequenz steigt bei bodengetriebener Zapfwelle auf Werte zwischen 105 min^{-1} und 134 min^{-1} , bei motorgetriebener Zapfwelle liegen die Werte zwischen 89 min^{-1} und 108 min^{-1} . In diese Größenordnung fällt auch der historische Grasmäher mit Werten zwischen 92 min^{-1} und 100 min^{-1} . Die maximalen Herzfrequenzen liegen bei bodengetriebener Zapfwelle mit Werten zwischen 118 min^{-1} bis 190 min^{-1} höher als bei Motorantrieb mit Werten von 100 min^{-1} bis 148 min^{-1} . Der Grasmäher weist Werte von 118 min^{-1} bis 149 min^{-1} auf. Bei den Werten für die Zunahme der Atemfrequenzen weisen die Varianten mit bodengetriebener Zapfwelle mit Werten von $+ 22 \text{ min}^{-1}$ bis $+ 73 \text{ min}^{-1}$ ebenfalls höhere Werte auf als bei motorgetriebener Zapfwelle ($\pm 0 \text{ min}^{-1}$ bis $+ 46 \text{ min}^{-1}$). Beim Grasmäher liegen die Werte bei $+ 8 \text{ min}^{-1}$ bis $+ 26 \text{ min}^{-1}$. Die gleiche Tendenz zeigt sich auch bei der Zunahme der Körpertemperatur, die bei bodengetriebener Zapfwelle bei Werten von $+ 0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+ 1,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und bei motorgetriebener Zapfwelle bei Werten von $+ 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+ 0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt. Beim Grasmäher liegen die Werte zwischen $\pm 0,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+ 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Zunahme des Schwitzens ist bei bodengetriebener Zapfwelle mit 5 bis 10 Punkten ebenfalls höher als bei Motorantrieb mit 3 bis 7 Punkten; der Grasmäher weist hier Werte von 3 bis 5 Punkten auf.
- Der Vergleich der Ergebnisse des Parzellenversuchs mit den Ergebnissen der Flächenversuche weist für den durchschnittlichen Zugkraftbedarf in den Flächenversuchen nur geringfügig höhere Werte aus. Beim maximalen Zugkraftbedarf fallen die Werte der Flächenversuche jedoch deutlich höher aus; offensichtlich war die Frequenz der Messtechnik nicht hoch genug, um im Parzellenversuch die absoluten Höchstwerte zu erfassen. Beim Vergleich der Arbeitsgeschwindigkeiten in den Flächen- und im Parzellenversuch wird deutlich, dass die Pferde und die Fahrweise des Fuhrmanns einen großen Einfluss haben. Insgesamt resultiert aber auch in den Flächenversuchen in allen Fällen eine gerundete Arbeitsgeschwindigkeit von $5 \text{ km} * \text{h}^{-1}$. Wichtiger als die Arbeitsgeschwindigkeit ist für die Flächenleistung der Anteil der unterschiedlichen Teilarbeitszeiten an der Gesamtarbeitszeit. Der Anteil Störungen, der im Parzellenversuch keine Rolle spielt, macht sich hier bemerkbar. Daneben spielen auch die den Pferden gewährten Pausen eine Rolle, die im Parzellenversuch ebenfalls nicht vorkommen. Auch hier wird der Einfluss des jeweiligen Fuhrmanns deutlich. Insgesamt liegen die erzielten Flächenleistungen der Flächenversuche unter denen des Parzellenversuchs, im Vergleich mit der Literatur sind sie jedoch gleich oder sogar etwas höher. Dies weist darauf hin, dass die Flächenversuche zur Ermittlung von Faustzahlen zum Arbeitspferdeeinsatz deutlich besser geeignet sind. Die Unterschiede zwischen den Flächenversuchen machen auch deutlich, dass im Vergleich zum Schleppereinsatz ein größerer Versuchsumfang notwendig ist, um zu verallgemeinerbaren Zahlen zu kommen. Die physiologischen Parameter der Pferde weisen in den Flächenversuchen vergleichbare Werte zum Parzellenversuch auf.
- Insgesamt wird das 1,90 m breite Doppelmessermähwerk am Vorderwagen mit motorgetriebener Zapfwelle als das für den Pferdezug empfehlenswerteste der untersuchten Geräte bewertet. Es ist sehr wenig beim Mähen um Hindernisse herum, die Flächenleistung liegt bei $0,57 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ (Flächenversuche) bzw. $0,78 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ (Parzellenversuch), und es belastet die Pferde am wenigsten. Bei großen und hindernisfreien Flächen ist das 2,40 m breite Doppelmessermähwerk aufgrund der deutlich höheren Flächenleistung von $0,79 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ (Flächenversuche) bzw. $1,00 \text{ ha} * \text{h}^{-1}$ (Parzellenversuch) bei nur geringfügig höheren Leistungsanforderungen an die Pferde zu empfehlen. Der Bodenantrieb der Zapfwelle erweist sich bei den untersuchten Geräten als unter hiesigen Umständen (1- und 2-Spanner als Standard-Gespanngröße) ungeeignetes System, da er zu energieintensiv ist und die Dauerleistungsfähigkeit der Pferde übersteigt. Die

7. Zusammenfassung

zukünftige Entwicklung moderner pferdezogener Geräte sollte sich daher auf direkte Antriebssysteme konzentrieren.

8. Literatur

- ABEELS, P. F. J. (1994): Horses versus tractors in forest thinnings. - Paper presented at the Meeting EC Concerted Action „Cost Effective Early Thinnings“, Feldafing-Munich, July 4-9, 1994: 14 pp.
- ACHILLES, W. (1993): Deutsche Agrargeschichte im Zeitalter der Reformen und der Industrialisierung. - Eugen Ulmer Verlag; Stuttgart: 397 S.
- AGUIRE, V. & A. ORIHUELA (2000): Effect of work experience and position in the plow harness on some physiological parameters of horses under field conditions. - Journal of Applied Animal Welfare Science 3 (3): 231-238
- AID (2012): Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe in Deutschland zwischen 1960 und 2010. – AID INFODIENST ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT, VERBRAUCHERSCHUTZ E. V.; Bonn: www.aid.de/downloads/anzahl_landwirtschaftlicher_betriebe_2012.pdf; Zugriff: 25.11.2013
- AINSWORTH, B. (2004): Why Horses? Guest Editorial. - Rural Heritage 29 (2), The Evener 2004: 14
- ANONYMUS (1929): Leistungen der Zugtiere in der Landwirtschaft. - Deutsches Kaltblut, 2. Jahrgang: 209-212
- ANONYMUS (1936a): Richtlinien für die Vorbereitung und Durchführung von Dauerzugleistungsprüfungen für Kaltblutpferde. - Deutsches Kaltblut 9: 205-206 u. 213-223
- ANONYMUS (1936b): Ergänzung der Leistungsprüfungsordnung (L. P. O.), gültig ab 1. April 1936. - Deutsches Kaltblut 9: 119-122
- ANONYMUS (1937): Leistungsprüfungen in der deutschen Kaltblutzucht und das Prüfungsjahr 1936. - Deutsches Kaltblut 10: 217-221
- ANONYMUS (1951): Wohin rollt die Motorisierung der Landwirtschaft?. - Der Tierzüchter 11: 315-316
- ANONYMUS (1991): Elmo Reed's Vorderwagen mit bodenangetriebener Zapfwelle und Drei-Punkt-Aufhängung. - Das Zugpferd 2/1991: 36-37
- ANONYMUS (1992): TEAMSTER 2000. Ein neuer Vorderwagen aus den USA. - Das Zugpferd 1/1992: 16-19
- ANONYMUS (2006): PZTM - leichter Vorderwagen für leichte Pferde. - Starke Pferde 10 (39): 21
- ANONYMUS (2010): Homepage der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen, www.agrar.uni-kassel.de/dfh/; Zugriff am 28.01.2010
- ART, T., M.-H. CRIGEL, S. VANDENOUT, H. DUVIVIER, D. VOTION, G. LEGROS, P.-P. PASTORET, J.-M. GODEAU & P. LEKEUX (1996): La traction: un effort impressionnant. - en: PASTORET, P.-P., P. LAURANT, R. COURTOIS, A. COLLARD, F. TINCHI & J.-P. HACHEZ (eds.): Le cheval ardennais. - Les Editions du Point Vétérinaire; Maisons-Alfort cedex: 317-338
- BARTSCH, E. (1926): Zuckerrübenköpfe als Haferersatz bei der Fütterung schwerer Arbeitspferde. – Landwirtschaftliche Jahrbücher. Zeitschrift für Wissenschaftliche Landwirtschaft, Bd. 63. – Verlagsbuchhandlung Paul Parey; Berlin: 157-207
- BASCHE, A. (o.J.): Geschichte des Pferdes. - Sigloch Edition; Künzelsau: 559 S.
- BASSHUYSEN, R. VAN & F. SCHÄFER (Hrsg.) (2007): Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. - Friedrich Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH; Wiesbaden: 1032 S.
- BAUHAUS, A. (1929): Zur Frage des Ersatzes der Gespannkraft durch die Motorkraft unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in der rheinischen Landwirtschaft. - Buch- und Kunstdruckerei Aug. Fieseler; Bonn: 63 S.
- BAUM, S. (2012): Ausprägung interregionaler Disparitäten und Ansätze zur Entwicklung ländlicher Räume in Mittel- und Osteuropa. - Studies on the Agricultural and Food Sector in Central and Eastern Europe, Vol. 67. - LEIBNITZ-INSTITUT FÜR AGRARENTWICKLUNG IN MITTEL- UND OSTEUROPA (Hrsg.); Halle: 194 S.
- BECK, W. (1989): Zum Einsatz von Pferden im Rückeprozeß. - Sozialistische Forstwirtschaft 4: 109-111

8. Literatur

- BEGON, M., J. L. HARPER & C. R. TOWNSEND (1991): Ökologie. Individuen, Populationen, Lebensgemeinschaften. - Birkhäuser Verlag; Basel, Boston, Berlin: 1024 S.
- BELGIAN DRAFT HORSE CORPORATION OF AMERICA (ed.) (o.J.): Belgian Horses for American Farms. - Wabash: 21 pp.
- BENDER, M. (2001): An economic comparison of traditional and conventional agricultural systems at a county level. - American Journal of Alternative Agriculture 16 (1): 2-15
- BENECKE, N. (1994): Der Mensch und seine Haustiere. Die Geschichte einer jahrtausendealten Beziehung. - Konrad Theiss Verlag; Stuttgart: 470 S.
- BERNDT, L. (1968): Untersuchungen zum Stand und zur Perspektive der Pferdezucht und -haltung in den sozialistischen Landwirtschaftsbetrieben des Bezirkes Cottbus unter den Bedingungen der weiteren Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion und die sich aus dem Zugkraftbedarf ergebende Gestaltung des Zuchtziels. - Dissertation, Landwirtschaftliche Fakultät, Friedrich-Schiller-Universität Jena; Jena: 135 S.
- BERRY, W. (2010): Taking draft animals seriously. - www.healingharvestforestfoundation.org/HHFF-new/tag/economy/; Zugriff am 07.06.2010
- BIRLENBACH, U. S. (1994): Intraspezifische Anpassungen an divergente Art und Intensität der Arbeit: Kraft, Geschwindigkeit und Energetik von Vollblut- und Kaltblutpferden. - Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen, FB Veterinärmedizin. - Offset Köhler KG; Gießen: 119 S.
- BIRLENBACH POTARD, D. E. LEITH & M. R. FEDDE (1998): Force, speed, and oxygen consumption in Thoroughbred and draft horses. - J. Appl. Physiol. 84: 2052-2059
- BLECHSCHMIDT, H. (1935): Leistungsprüfungen in der deutschen Pferdezucht. - Deutsches Kaltblut 8: 273-276
- BLOHM, G. (1956): Arbeitsleistung und Arbeitskalkulation in der Landwirtschaft. - Verlag Eugen Ulmer; Stuttgart: 148 S.
- BLUMENSTEIN, B. (2008): Arbeitswirtschaftliche Erhebungen beim Arbeitspferdeeinsatz als Kalkulationsgrundlage der Produktionsplanung. - Diplomarbeit, Universität Kassel, FB Ökologische Agrarwissenschaften; Witzenhausen: 148 S.
- BMELV (Hrsg.) (2011): Agrarbericht der Bundesregierung 2011. - hrsg.: BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ. - Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH; Köln: 108 S.
- BMELV (Hrsg.) (2012): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten in der Bundesrepublik Deutschland. - hrsg.: BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ. - Landwirtschaftsverlag; Münster-Hiltrup: 606 S.
- BOLLING I. & W. SÖHNE (1982): Der Bodendruck schwerer Ackerschlepper und Fahrzeuge. - Landtechnik 37 (2): 54-57
- BONIN, A. (1999): Pferde an die Arbeit. Landbewirtschaftung mit Pferden am Beispiel der Waldbewirtschaftung. - Diplomarbeit, Universität Gesamthochschule Kassel, FB 13, Stadt- und Landschaftsplanung; Kassel: 80 S.
- BORN, D. (1935): Landmaschine gegen Pferd. - Deutsches Kaltblut 8 (6): 81-82
- BORN, H. (2011): Wozu ist Strukturwandel gut?. - Deutsche Bauern Korrespondenz 10/11: 4-5
- BOXBERGER, J., R. RAMHARTER & T. LINDENTHAL (1997): Allgemeine Maßstäbe für die Technik im ökologischen Landbau. - Ökologie & Landbau 102: 6-9
- BRANDT, M., J. HEB & H. WILDHAGEN (2001): Bodenmonitoring auf der Domäne Frankenhausen - Kartier- und Analyseergebnisse. - FACHGEBIET BODENKUNDE DER UNIVERSITÄT KASSEL (Hrsg.): Arbeitsberichte Nr. 5; Witzenhausen: 109 S.
- BREIDBACH, S. (1953): Zuchtichtung und Leistungsprüfung in der deutschen Pferdezucht im Hinblick auf die Motorisierung in der Landwirtschaft. - Schriftenreihe des AID, Heft 65. - hrsg.: AID - LAND- UND HAUSWIRTSCHAFTLICHER AUSWERTUNGS- UND INFORMATIONSDIENST; Bad Godesberg: 38 S.

8. Literatur

- BRODAUF, W. (1996): Eine züchterische Kostbarkeit: Das Schwarzwälder Kaltblutpferd. - in: ZUCHTVERBAND FÜR FLECKVIEH UND WÄLDERVERIEH IM RZV & SCHWARZWÄLDER PFERDEZUCHTGENOSSENSCHAFT (Hrsg.): Perlen des Schwarzwaldes. Festschrift zum 100-jährigen Jubiläum der organisierten Zucht der Schwarzwälder Kaltblutpferde und der Vorderwälder-Rinder; Donaueschingen, St. Märgen: 39-76
- BRODY, S. (1945): Bioenergetics and growth. With special reference to the efficiency complex in domestic animals. - Reinhold publishing corporation; New York: 1023 pp.
- BROUDRE (1954): Die Realitäten Schlepper und Pferd. - Der Tierzüchter 6: 129-131
- BROWN, J. (1991): The horse in husbandry. - Farming Press Books; Ipswich: 112 pp.
- BRUNNER, W. (1942): Untersuchungen über die Arbeitsleistung des Schweizerischen Zugpferdes (Jurapferd). - Dissertation, ETH Zürich. - Dissertations-Druckerei A.-G. Gebr. Leemann & Co.; Zürich: 112 S.
- BRUTSCHKE, F. (1904): Die landwirtschaftlichen Maschinen in den Vereinigten Staaten von Amerika und der Arbeitersatz. - Berichte über Land- und Forstwirtschaft im Auslande. - Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft; Berlin: 79 S.
- BRUTSCHKE, F. (1928): Die Grenzen der Motorisierung in der Landwirtschaft. - Deutsche Landwirtschaftliche Tierzucht 32 (28): 586-591
- BUHLE, P. (1923): Das Zugpferd und seine Leistungen. Ein Handbuch für Geschirrführer, Pferdebesitzer und Pferdefreunde. - Bibliothek für Pferdeliebhaber, 11. - Konrad Wittwer Verlag; Stuttgart. - Nachdruck (o.J.) . - Erich Degreif Verlag; Oberteuringen: 136 S.
- BUHLE, P. (1925): Was haben die kaltblütigen Pferde im Weltkriege geleistet?. - Schaper; Hannover: 22 S.
- BUHLE, P. (1927/28): Grundsätze, Durchführung und Erfahrungen der öffentlichen Wettbewerbe für Zugpferde in Amerika am Zugkraftmesser-Wagen des Professor Collins. - Deutsches Kaltblut 1: 85-89
- BUHLE, P. (1929a): Unterscheidet die Geschichte des Pferdes einwandfrei „Warmblut und Kaltblut“?. - Deutsches Kaltblut 2: 171-175
- BUHLE, P. (1929b): Amerikanische Anschauungen über die Anspannung von Pferden bei den Feldarbeiten. - Deutsches Kaltblut 2: 301-308
- BUHLE, P. (1929c): Leben oder Materie, Blut oder Oel! Ein Beitrag zur Frage Pferd oder Motor!. - Deutsches Kaltblut 2: 43-45
- BUHLE, P. (1930): Welche Beziehungen zwischen der Körperform eines Pferdes und seiner Zugleistung sind bisher erwiesen?. - Deutsches Kaltblut 3 (14): 232-237
- BUHLE, P. (1935): „Bewegungskraft ohne Öl.“. - Deutsches Kaltblut 8: 161-167
- BUND & MISEREOR (Hrsg.) (1996): Zukunftsfähiges Deutschland. Ein Beitrag zu einer global nachhaltigen Entwicklung. Studie des Wuppertal Institutes für Klima, Umwelt, Energie. - hrsg.: BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND & MISEREOR. - Birkhäuser Verlag; Basel, Boston, Berlin: 656 S.
- CASTLE, M. E. (1976): A simple disc instrument for estimating herbage yield. - Journal of the British grassland society 31:37-40
- CAVALLI, R. & G. SABAINI (2000): Erfahrung beim Holzrücken mit Pferden im Nordosten der italienischen Alpen. - Starke Pferde 4 (15): 14-16
- CEBALLOS, F. P., R. V. TIELVES & B. G. SIMS (2000): Comparative study of influence of animal traction and light tractors on soil compaction in Cuba. - Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America 31 (3): 19-23
- CHIRGWIN, J. C. (1995): Los animales de trabajo y el desarrollo sostenible. - World Animal Review 84/85: 54-66
- CHIRGWIN, J. C. (1996): Multipurpose use of animals. - World Animal Review 86: inside cover
- CLAR, U. (1991): Entwicklung einer Feldmethode zur Messung des Energieumsatzes bei Zugtieren. - Dissertation, Universität Hohenheim; Stuttgart: 122 S.
- CLABEN, A., A. HIRLER & R. OPPERMANN (1996): Auswirkungen unterschiedlicher Mähgeräte auf die Wiesensauna in Nordost-Polen. - Naturschutz und Landschaftsplanung 28 (5): 139-144

8. Literatur

- COLLINS, E. V. & A. B. CAINE (1926): Testing Draft Horses. - Agricultural Experiment Station, Bulletin 240. - Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts; Iowa: 193-223
- CORBACH-HAPPEL, M. (2009): Tech-Nolle-logie. Jean Nolles Leben im Dienste der kleinen, vergessenen Landwirte. - Starke Pferde 13 (51): 20-22
- COURTEAU, D. (2007): Horse power. A practical suggestion that would transform the way we live. - Orion magazine September/October 2007. - www.orionmagazine.org/index.php/articles/article/343/; Zugriff am 28.10.2009
- DALIBARD, C. (1995): Livestock's Contribution to the Protection of the Environment. - World Animal Review 84/85 (1995, 3-4): 104-112
- DANNENBERG, P. (2007): Clusterstrukturen in landwirtschaftlichen Wertschöpfungsketten in Ostdeutschland und Polen. - LIT Verlag Dr. W. Hopf; Münster: 238 S.
- DEGEN, M. (2001): Streuwiesenpflege - mit Schleppertechnik oder moderner Gespanntechnik? Vergleichende Untersuchung am Beispiel des Naturschutzgebietes „Radolfzeller Aachried“. - Diplomarbeit, Fachhochschule Osnabrück, Fachbereich Landschaftsarchitektur; Osnabrück: 105 S.
- DEGREIF, E. (1992): Erste Erfahrungen mit dem Teamster 2000. - Das Zugpferd 4/1992: 37
- DEGREIF, E. (1993): Aspekte des landwirtschaftlichen Einsatzes von Zugpferden. - Das Zugpferd 3/1993: 28-33
- DEGREIF, E. (1995): Für und wider Vorderwagen. - Das Zugpferd 1/1995: 5-6
- DEGREIF, E. (2000): Auf dem Weg zum energieautarken Betrieb: 150 Hektar mit Pferdebespannung. - Ökologie & Landbau 116, 4/2000: 18-21
- DENCKER, C. H. (Hrsg.) (1961): Handbuch der Landtechnik. - Verlag Paul Parey; Hamburg und Berlin: 1046 S.
- DENCKER, C. H. (1989): Das Oldenburger Pferd. Unveränderter Nachdruck von Heft 10 der Schriftenreihe „Aus deutschen Zuchten“, 1941. - BLV Verlagsgesellschaft; München, Wien, Zürich: 128 S.
- DENCKER, C. H. & H. MEYER (1947): Die Motorisierung der Landwirtschaft. Ein wirtschaftspolitischer Ausblick. - Berichte über Landtechnik I. - hrsg.: KURATORIUM FÜR TECHNIK IN DER LANDWIRTSCHAFT. - Verlag Hellmut Neureuter; Wolfratshausen bei München: 38 S.
- DEUTSCHE WILDTIER STIFTUNG (Hrsg.) (2009): Stoppt den Mähtod. Praxisratgeber. - o.O.: 19 S.
- DIJKMAN, J., A. GEBREWOLD & R. A. PEARSON (2000): Multipurpose use of work animals in smallholder farming systems. - in: KAUMBUTHO, P. G., R. A. PEARSON & T. E. SIMALENGA (eds.): Empowering farmers with animal traction. Proceedings of the workshop of the Animal Traction Network for Eastern and Southern Africa (ATNESA), held 20-24 September 1999; Mpumalanga, South Africa: 136-141
- DLG (1979): Technik beim Mähen und Werben von Grüngut. Eine Ergänzung zu den DLG-Prüfberichten. DLG-Merkblatt 161. - hrsg.: DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT E.V.; Frankfurt am Main: 8 S.
- DLG (1987): BUSATIS-Anbauheckmäherwerk BM 1205 mit Doppelmesserschneidwerk 1,90 m und 2,40 m. - DLG-Prüfbericht 3765, Gruppe 7a/123. - hrsg.: DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT E.V.; Frankfurt am Main: 7 S.
- DLG (1997): Mähwerke. Bauarten, Auswahl- und Entscheidungshilfen, Einsatzhinweise. Eine Ergänzung zu den DLG-Prüfberichten. - DLG-Merkblatt D/97 (1997). - hrsg.: DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT E.V.; Frankfurt am Main: 12 S.
- DÖHRMANN, E. (1929): Untersuchungen über die Beziehungen zwischen Körperform und Arbeitsleistung bei Rind und Pferd. - Dissertation, Württembergische Landwirtschaftliche Hochschule Hohenheim. - Wissenschaftliches Archiv für Landwirtschaft: Abt. B Tierzucht und Tierhaltung 1: 601-651
- DOMSCH, H. (1995): Veränderung des Bodengefüges durch häufige Überrollung. - in: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (hrsg.): Bodenverdichtung. FAL/KTBL-Fachtagung am 18./19. November 1993 in Braunschweig. KTBL-Schrift 362. - Landwirtschaftsverlag; Münster-Hiltrup: 129-135

8. Literatur

- DUFFNER, A. (1998): Auswirkungen des Holzrückens mit Pferdezug auf den Bodengashaushalt im Vergleich zum Harvester-/Forwarder-Verfahren. - IGZ-Info 4: 21-23
- DUGAST, J. L. (2010): Innovationspreis 2010 für den Geräteträger „Flex“. - Starke Pferde 14 (56): 26-27
- DUSEK, J. (1963): Beitrag zur Frage der Ausnützung der Pferdezugkraft im Mehrspann. - Z. Tierz. Zücht. Biol. 79 (4): 244-248
- DVWK (1995): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden. Teil I: Mechanische Belastbarkeit. - DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E.V. (hrsg.): Merkblätter zur Wasserwirtschaft 234/1995. - Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH; Bonn: 12 S.
- EBERT, K. & E. SCHROLL (2009): Die neuen Kleinbauern. Selbstversorger-Landwirtschaft mit Eseln, Mulis, Rindern oder Pferden. Ein Besuch in der französischen Ariège. - Starke Pferde 13 (51): 14-19
- ECOPOINT (ed.) (2010): DieselNet: Emission Standards, European Union: Nonroad Diesel Engines. - www.dieselnets.com/standards/eu/nonroad.php; Zugriff am 04.05.2010
- EEGFTF (2011): Future Transport Fuels. Report of the European Expert Group on Future Transport Fuels, January 2011. - http://ec.europa.eu/transport/urban/vehicles/directive/doc/2011_01_25_future_transport_fuels_report.pdf: 81 pp.; Zugriff am 26.01.2011
- EGGERT, A. (1999): Von der Mähmaschine zum Mähdrescher. Die Technik der Getreideernte. - Weltbild Verlag GmbH; Augsburg: 128 S.
- EGGLESTONE, S., L. BUENDIA, K. MIWA, T. NGARA & K. TANABE (eds.) (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. - Institute for Global Environmental Strategies; Hayama, Kanagawa (Japan)
- EHLERS, W. (1998a): Bodenschäden durch schwere Landmaschinen?. - Landwirtschaftliches Wochenblatt Westfalen-Lippe 17/98 vom 23.04.98: 50
- EHLERS, W. (1998b): Unser Acker - durch schwere Landmaschinen gefährdet?. - hrsg.: IFW, INSTITUT FÜR FILM UND BILD IN WISSENSCHAFT UND UNTERRICHT; Göttingen: Film C2004
- EHLERS, W. (2000): Schwerlast auf dem Acker. - Der kritische Agrarbericht 2000: 153-158
- EHLERS, W., D. WERNER & T. MÄHNER (2000): Wirkung mechanischer Belastung auf Gefüge und Ertragsleistung einer Löss-Parabraunerde mit zwei Bearbeitungssystemen. - J. Plant. Nutr. Soil Sci. 163: 321-333
- EHRENBERG, P. (1932): Die neuzeitliche Fütterung des landwirtschaftlichen Arbeitspferdes. - Arbeiten der DGfZ, Heft 52. - Verlag von M. & H. Schaper; Hannover: 75 S.
- EHRENBERG, P. (1937a): Das Pferd im Kampf mit dem Motor. - Deutsches Kaltblut 10: 377-389
- EHRENBERG, P. (1937b): Wurzelfruchtfütterung an Pferde, zumal an Arbeitspferde. Eine Hilfe bei Knappheit an Hafer und anderem Körnerfutter. - Trommler-Druck; Stendal: 20 S.
- EHRENBERG, P. (1950): Motorschlepper oder Arbeitspferd. - St. Georg. Fachzeitschrift für Pferdezüchtung und Pferdesport 50 (22): 1
- EHRLEIN, H.J., W. v. ENGELHARDT, H. HÖRNICKE, G. TOLKMITT & J. DUSEK (1970): Untersuchungen über die Beziehungen zwischen Herzschlagfrequenz und Leistung bei Pferden. - Zentralblatt für Veterinärmedizin, Reihe A, Band 17, Heft 7: 577-591
- EHRLEIN, H.-J., H. HÖRNICKE, W. v. ENGELHARDT & G. TOLKMITT (1973): Die Herzschlagfrequenz während standardisierter Belastung als Maß für die Leistungsfähigkeit von Pferden. Zentralblatt für Veterinärmedizin, Reihe A, Band 20, Heft 3: 188-208
- ELSBACH, A. (2010): Untersuchung zur Haltung von Arbeitspferden in landwirtschaftlichen Betrieben unter besonderer Berücksichtigung von Tiergerechtigkeit und Ökonomie. - Bachelorarbeit, Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde, FB Landschaftsplanung und Naturschutz; Eberswalde: 81 S.
- ENGELHARDT, W. v. (Hrsg.) (2010): Physiologie der Haustiere. - Enke-Verlag; Stuttgart: 712 S.

8. Literatur

- FANAC, C. (1997): Zugerleichterung für das Pferd. High-Tech eröffnet eine neue Dimension. - Das Zugpferd 4/1997: 17-22
- FAROOQUEE, N. A., T. K. BUDAL, R. K. MAIKHURI & S. P. SINGH (2008): Contribution of pack animals in reducing CO₂ emission in Central Himalaya, India. - Current Science 95 (1): 59-63
- FISCHER, H. O. (1952): Die Leistungsprüfung und die praktische Zugarbeit des Zugpferdes. - Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Würde eines Doktors der Landwirtschaft der Landwirtschaftlichen Hochschule Hohenheim. - Institut für Tierzuchtlehre an der landwirtschaftlichen Hochschule Hohenheim; Marbach an der Lauter: 45 S.
- FLEISCHER, M. & D. SÜß (2002): Die Beanspruchung des Bodens beim Pferderücken. - Starke Pferde 6 (24): 11-13
- FLURI, P., R. FRICK & A. JAUN (2000): Bienenverluste beim Mähen mit Rotationsmäherwerken. Mitteilung Nr. 39. - hrsg.: SCHWEIZERISCHES ZENTRUM FÜR BIENENFORSCHUNG, FORSCHUNGSANSTALT FÜR MILCHWIRTSCHAFT (FAM) & EIDGENÖSSISCHE FORSCHUNGSANSTALT FÜR AGRARWIRTSCHAFT UND LANDTECHNIK (FAT). - Bern, Tänikon: 21 S.
- FN (Hrsg.) (2001): Kaltblutpferde in Deutschland. – hrsg.: DEUTSCHE REITERLICHE VEREINIGUNG E.V., BEREICH ZUCHT; Warendorf: 56 S.
- FN & DOKR (Hrsg.) (2004): Jahresbericht 2003. – hrsg.: DEUTSCHE REITERLICHE VEREINIGUNG E.V. & DEUTSCHES OLYMPIADE-KOMITEE FÜR REITEREI E.V.; Warendorf: 415 S.
- FN & DOKR (Hrsg.) (2011): Jahresbericht 2010. – hrsg.: DEUTSCHE REITERLICHE VEREINIGUNG E.V. & DEUTSCHES OLYMPIADE-KOMITEE FÜR REITEREI E.V.; Warendorf: 471 S.
- FN & DOKR (Hrsg.) (2013): Jahresbericht 2012. – hrsg.: DEUTSCHE REITERLICHE VEREINIGUNG E.V. & DEUTSCHES OLYMPIADE-KOMITEE FÜR REITEREI E.V.;+ Warendorf: 480 S.
- FOA HILCHENBACH & LAFO NRW (Hrsg.) (1997): Pferdeeinsatz im Wald, ökonomische und ökologische Aspekte. Fachtagung im Forstamt Hilchenbach am 5. und 6. September 1997. Tagungsführer. - hrsg.: FORSTAMT HILCHENBACH & LANDESFORSTVERWALTUNG NRW; o.O.: 68 S.
- FORRISTAL, P. D. (1999): Machinery costs on tillage farms and the development of decision support systems for machinery investment/use on farms. - Teagasc; Dublin: 22 pp.
- GAMEDA, S., G. S. V. RAGHAVAN, R. THERIAULT & E. MCKYES (1985): High axle load compaction and corn yield. - Transactions of the ASAE 28 (6): 1759-1765
- GANZERT, C. (1994): Die Landwirtschaft zwischen Natur und Markt. Die Kulturlandschaft spiegelt die landwirtschaftliche Nutzung wider. - in: LANDESZENTRALE FÜR POLITISCHE BILDUNG BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.): Naturlandschaft - Kulturlandschaft. - Der Bürger im Staat 44 (1): 28-36
- GAULTNEY, L., G. W. KRUTZ, G. C. STEINHARDT & J. B. LILJEDAHL (1982): Effects of subsoil compaction on corn yields. - Transactions of the ASAE 25 (3): 563-569
- GAZZARIN, C. & G. A. VÖGELI (2010): Maschinenkosten 2009/2010. Mit Kostensätzen für Gebäudeteile und mechanische Einrichtungen. - ART-Bericht Nr. 717. - hrsg.: FORSCHUNGSANSTALT AGROSCOPE RECKENHOLZ-TÄNIKON; Ettenhausen: 48 S.
- GEH, GESELLSCHAFT ZUR ERHALTUNG ALTER UND GEFÄHRDETER HAUSTIERRASSEN E.V. (Hrsg.) (2014): Rote Liste der bedrohten Nutzierrassen. - <http://www.g-e-h.de/geh/index.php/die-rote-liste/rote-liste>; Zugriff am 22.02.2014
- GEHRING, K. (1939): Untersuchungen über Kreislauf und Atmung im Hinblick auf die Leistungsprüfung des Pferdes. - Z. f. Tierzucht u. Züchtungsbiol., Bd. 42, Heft 3: 317-428
- GEILE, J. & T. SCHULZE (1992): Der Stand der Zugpferdenutzung im deutschsprachigen Raum. - Diplomarbeit, Gesamthochschule Universität Kassel, FB Internationale Agrarwirtschaft, FG Agrartechnik; Witzenhausen: 197 S.
- GEOR, R. J. & L. J. MCCUTCHEON (1998): Hydration effects on physiological strain of horses during exercise-heat stress. - J. Appl. Physiol. 84: 2042-2051

8. Literatur

- GLOVER, V., P. HEROLD & B. HÖRNING (2011): Einsatz von Arbeitspferden in der deutschen Landwirtschaft. - in: LEITHOLD, G., K. BECKER, C. BROCK, S. FISCHINGER, A.-K. SPIEGEL, K. SPORY, K.-P. WILBOIS & U. WILLIGES (Hrsg.): Es geht ums Ganze: Forschen im Dialog von Wissenschaft und Praxis. Beiträge zur 11. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Justus-Liebig-Universität Gießen, 15.-18. März 2011. Band 1: Boden, Pflanze, Umwelt, Lebensmittel und Produktqualität. - Verlag Dr. Köster; Berlin: 127-130
- GOE, M. R. (1983): Current status of research on animal traction. - *World Animal Review* 45: 2-17
- GOTTLIEB, M., B. ESSÉN-GUSTAVSSON, A. LINDHOLM & S. G. B. PERSSON (1988): Circulatory and muscle metabolic responses to draught work compared to increasing trotting velocities. - *Equine Vet. J.* 20: 430-434
- GRABISCH, W. (1953): Die Arbeitsleistung von Kühen und Rindern des Höhenfleckviehs in 18 Betrieben Südwestdeutschlands. - *Zeitschrift für Tierzüchtung und Züchtungsbiologie* 61 (1): 25-60
- HAKANSSON, I., W. B. VOORHEES, P. ELONEN, G. S. V. RAGHAVAN, B. LOWERY, A. L. M. VAN WIJK, K. RASMUSSEN & H. RILEY (1987): Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. - *Soil and Tillage Research* 10 (3): 259-268
- HAMEN, N.: (2001): Zugpferd - wohin gehst Du?. - *Starke Pferde* 5 (17): 28-29
- HAMPL, U. (1998): Zehn Regeln beim Befahren von Ackerboden. - in: AGRARBÜNDNIS E.V. (Hrsg.): Landwirtschaft 98. Der Kritische Agrarbericht. Daten, Berichte, Hintergründe, Positionen zur Agrardebatte; Kassel, Rheda-Wiedenbrück, Bonn: 128-130
- HAMZA, M. A. & W. K. ANDERSON (2005): Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. - *Soil and Tillage Research* 82 (2): 121-145
- HANGEN, G. (1989): Sportpferde aus Hessen: Geschichte, Zucht und Sport. - BLV Verlagsgesellschaft; München, Wien, Zürich: 135 S.
- HARBIG, S. (2006): Leistungsmonitoring von Hochleistungsvielseitigkeitspferden im Wettkampf und Training: Untersuchungen zur Herzfrequenz. - Dissertation, Tierärztliche Hochschule Hannover; Hannover: 142 S.
- HARING, H. (2000): Pferderassen und Zuchtgebiete. - in: THEIN, P. (Red.): Handbuch Pferd. Zucht, Haltung, Ausbildung, Sport, Medizin, Recht. - BLV Verlagsgesellschaft mbH; München, Wien Zürich: 28-79
- HARRIGAN, T., R. ROOSENBURG, D. PERKINS & J. SARGE (2002): Estimating draft, IV: Sicklebar mower. - *Rural Heritage* 27 (3): 55-58
- HARTKOPF, A. (2012): Pferd im Bestand - Maschine auf der Gasse. - *Forst & Technik* 2: 14-16
- HEGE, H. (1998): Zur Geschichte der Schneidwerke. - *Der Goldene Pflug* 8: 14-18
- HEROLD, P. (2004): Internationaler Kongress zum Zugtierreinsatz in Frankreich. - *Starke Pferde* 8 (32): 15-16
- HEROLD, P. (2005): Les chevaux de trait dans l'agriculture allemande d'aujourd'hui - situation et perspectives. - in: FEDERATION NATIONALE DES CENTRES D'INITIATIVES POUR VALORISER L'AGRICULTURE ET LE MILIEU RURAL (CIVAM) (ed.): L'animal de trait - Savoir-faire d'aujourd'hui. Actes du colloque, Le Pradel, Mirabel, Ardèche, 2 et 3 septembre 2004: 64-70
- HEROLD, P. (2007): Pferdebetriebe in der Landwirtschaft. Wir stellen vor: Die „Adressenliste Betriebe mit Pferdearbeit in Deutschland“. - *Starke Pferde* 11 (41): 14-18
- HEROLD, P. (2008): Koń roboczy - nowoczesna technologia w rolnictwie (Moderne pferdegezogene Technik in der Landwirtschaft). - in: MUZEUM NARODOWE ROLNICTWA I PRZEMYSŁU ROLNO-SPOŻYWCZEGO W SZRENIAWIE (ed.): Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Koń Roboczy w Nowoczesnym Rolnictwie“ (Tagungsband zur Konferenz „Das Arbeitspferd in der modernen Landwirtschaft“). - Szreniawa k. Poznania (Polen), 27.09.2008: 17-32
- HEROLD, P., J. JUNG & R. SCHARNHÖLZ (2009): Arbeitspferde im Naturschutz. Beispiele, Einsatzbereiche, Technik. - hrsg.: BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ. - BfN-Skripten 256 ;Bonn-Bad-Godesberg: 126 S.

8. Literatur

- HERRE, W. & M. RÖHRS (1990): Haustiere - zoologisch gesehen. - Gustav Fischer Verlag; Stuttgart, New York: 412 S.
- HERRMANN, K. (1988): Die Veränderung landwirtschaftlicher Arbeit durch Einführung neuer Technologien im 20. Jahrhundert. - Archiv für Sozialgeschichte 28: 203-237
- HERRMANN, K. (1991): Historische Überlegungen zur Zugleistung der Pferde. - Das Zugpferd 4/1991: 9-14
- HEY, H.-D. (2007): Pferdestärke. Ungewohntes Bild im Beethovenpark. - Neue Rheinische Zeitung. - Online-Flyer vom 19.09.2007; www.nrhz.de/flyer/beitrag.php?id=11477; Zugriff am 08.09.2008
- HINTZ, H. F., C. COLLYER & T. BRANT (1989): Resting heart rates in draft horses. - Equine Pract. 11: 7-8
- HOFFMANN, V. (1992): Untersuchung physischer Beanspruchungen des Pferdes bei Rückarbeiten. - Diplomarbeit am Fachbereich Forstwirtschaft der FH Hildesheim/Holzminde; Göttingen: 68 S.
- HOFFMANN-GEHR, C. (1999): Die Linientreuen. - Cavallo 2/1999: 114-119
- HORN, R. (2011): Management effects on soil properties and functions. - in: GLINSKI, J., J. HORABIK UND J. LIPIEC (eds): Encyclopedia of Agrophysics. - Springer Verlag; Dordrecht: 447-455
- HOWALD, O. (Hrsg.) (1950): Motoren und Pferdekräfte in der schweizerischen Landwirtschaft. - Schriftenfolge über Landarbeitstechnik in der Schweiz, Heft 5. - Schweizer Druck- und Verlagsdruckhaus AG; Zürich: 125 S.
- HUMBERT, J. (2003): Untersuchung zum Arbeitszeitaufwand beim Einsatz von Arbeitspferden in Landwirtschaft und Gemüsebau. - Diplomarbeit, Universität Kassel, FB Ökologische Agrarwissenschaften; Witzenhausen: 47 S.
- IAASTD (ed.) (2009a): Agriculture at a Crossroads. Global Report. - INTERNATIONAL ASSESSMENT OF AGRICULTURAL KNOWLEDGE, SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT (ed.); Washington D.C.: 590 pp.
- IAASTD (ed.) (2009b): Agriculture at a Crossroads. Vol. IV: North America and Europe (NAE) Report. - INTERNATIONAL ASSESSMENT OF AGRICULTURAL KNOWLEDGE, SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT (ed.); Washington D.C.: 309 pp.
- IGA (Hrsg.) (2000): Pferdezugmaschinen Dok. 2000. - hrsg.: IG ARBEITSPFERDE SCHWEIZ, Informationsstelle für Pferdezugmaschinen; Diesbach: 125 S.
- INHETVEEN, H. (1997): Zeit-Sprünge. Bäuerliche Lebensformen in der Industriegesellschaft. - Das Zugpferd 2/97: 35-42
- INNS, F. (1996): Matching tillage implements to draught animal potential. - World Animal Review 86: 40-49
- IPCC (2007): Climate Change 2007. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. - Core Writing Team: PACHAURI, R.K & A. REISINGER (eds.). - IPCC; Geneva, Switzerland: 104 pp.
- ISHIDA, N., T. OYUNSUREN, S. MASHIMA, H. MUKOYAMA & N. SAITOU (1995): Mitochondrial DNA sequences of various species of the genus *Equus* with special reference to the phylogenetic relationship between Przewalskii's wild horse and domestic horse. - J. Mol. Evol. 41: 180-188
- JABBAR, M. A. (1993): Research on cow traction in Africa: some lessons to be learned. - World Animal Review 74/75: 58-63
- JACKSON, M. (1977): Amish agriculture and no-till: The hazards of applying the USLE to unusual farms. - Journal of Soil and Water Conservation 43 (6): 483-486
- JACKSON, W. & M. BENDER (1982): Horses or horsepower?. - Soft Energy Notes July/August 1982: 70-87
- JANSÉN, J. (2000): Agriculture, energy and sustainability. Case studies of a local farming community in Sweden. - Doctoral thesis, Swedish University of agricultural Science. - Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Agraria 253: 92 pp.
- JANSEN, T., P. FORSTER, M. A. LEVINE, H. OELKE, M. HURLES, C. RENFREW, J. WEBER & K. OLEK (2002): Mitochondrial DNA and the origins of the domestic horse. - Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 99 (16): 10905-10910

8. Literatur

- KAHLERT, E. (1999): Design of a horse-drawn tool carrier for row crop work. - Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Land-, Umwelt- und Energietechnik, Abteilung Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik; Wien: 50 pp.
- KARLE, M. (2007): Mähdrescher, Erntemaschinen und Roder von Lanz und John Deere-Lanz. - in: HÄFNER, K.: Lanz. Halbdiesel-, Volldiesel-Bulldogs, John Deere-Lanz-Schlepper. Die Lanz-Story von 1859 bis 1967, Bd. 4. - Weltbildverlag; Augsburg: 174-187
- KENDELL, C. (2003): Horse powered traction and tillage - Some options and costs for sustainable agriculture with international applications. - Paper presented at the Newcastle Soil Association, 20th August 2003: 11 pp.
- KENDELL, C. (2005): Economics of Horse Farming. - Rural Heritage 30 (3): 71-74
- KENDELL, C. (2008): schriftliche Mitteilung, Chet Kendell, 24.04.2008
- KING, F. H. (1907): A textbook of the physics of agriculture. - Madison, Wis.: 604 pp.
- KINGSTON, J. K., R. J. GEOR & L. J. MCCUTCHEON (1997): Rate and composition of sweat fluid losses are unaltered by hypohydration during prolonged exercise in horses. - J. Appl. Physiol. 83: 1133-1143
- KOCH, M. (1998): Traditionelles Arbeiten mit Pferden in Feld und Wald. - Verlag Eugen Ulmer; Stuttgart: 160 S.
- KOSZEL, T., E. SASIMOWSKI & K. TOMASZEWSKI (1986): Katalog narzędzi i maszyn konnych produkowanych seryjnie w latach 1950 - 1986 do tematu koordynowanego (program RR.II.22) „Inwentaryzacja i ocena sposobów oraz warunków wykorzystania koni roboczych w Polsce jako podstawa ich doskonalenia“. - Akademii Rolniczej w Lublinie, Instytut Hodowli i Technologii Produkcji Zwierzęcej, Instytut Mechanizacji Rolnictwa; Lublin: 130 S.
- KRAYBILL, D. B. (1997): Hintergründe der Wahl von Technik bei den Amischen. - Das Zugpferd 2/1997: 50-54
- KRAYBILL, D. B. (2001): The Riddle of Amish Culture. - The Johns Hopkins University Press; London & Baltimore: 397 pp.
- KRÜGER, J. (1947): Untersuchungen über den Arbeitszeit- und Zugkraftbedarf landwirtschaftlicher Geräte und Maschinen. - Inauguraldissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Landwirtschaft an der Universität Berlin. - Landmaschinen-Institut der Humboldt-Universität; Berlin: 139 S.
- KRÜGER, L. (1938): Einige grundsätzliche Bemerkungen zur Durchführung von Arbeits-Leistungsprüfungen. - Deutsches Kaltblut 11: 197-202
- KRÜGER, L. (1957): Die Bestimmung der Arbeitsfähigkeit bei Pferd und Rind durch Leistungsprüfungen, physiologische und psychologische Meßwerte und durch die Exterieurbeurteilung. - Z. Tierz. u. Züchtungsbiol. 69 (4): 289-320
- KRÜGER, L. (1958): Die Bestimmung der Arbeitsfähigkeit bei Pferd und Rind durch Leistungsprüfungen, physiologische und psychologische Meßwerte und durch die Exterieurbeurteilung. - Z. Tierz. u. Züchtungsbiol. 70 (1): 1-20
- KRÜGER, L. & G. SEEFELDT (1955): Untersuchungen zur Bestimmung des Arbeitswertes von Groß- und Kleinpferden. - Z. Tierz. u. Züchtungsbiol. 64 (2): 175-190
- KTBL (Hrsg.) (1963): KTBL-Kalkulationsunterlagen für Betriebswirtschaft. Landwirtschaft, Band 1. Arbeitsvorschlag. Die Kalkulation der Arbeitszeit für Arbeits- und Zugkräfte im landwirtschaftlichen Betrieb. - hrsg.: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V., Frankfurt am Main. - Hellmut-Neureuter-Verlag; Wolfratshausen bei München
- KTBL (Hrsg.) (1996): KTBL-Taschenbuch Landwirtschaft. Daten für die Betriebskalkulation in der Landwirtschaft. - hrsg.: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V., Darmstadt. -Landwirtschaftsverlag GmbH; Münster-Hiltrup: 275 S.

8. Literatur

- KTBL (Hrsg.) (1998) : KTBL-Taschenbuch Landwirtschaft. Daten für die Betriebskalkulation in der Landwirtschaft. - hrsg. : KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V., Darmstadt. - BLV Verlagsgesellschaft; München : 273 S.
- KTBL (Hrsg.) (2006): Landschaftspflege 2005. KTBL-Datensammlung. - hrsg. : KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V.; Darmstadt: 100 S.
- KTBL (Hrsg.) (2009) : Faustzahlen für die Landwirtschaft. - hrsg. : KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V.; Darmstadt: 1280 S.
- KÜHNER, S. (1997): Simultane Messung von Spannungen und Bodenbewegungen bei statischen und dynamischen Belastungen zur Abschätzung der dadurch induzierten Bodenbeanspruchung. - Schriftenreihe, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Universität Kiel, Nr. 39; Kiel: 231 S.
- KUTZBACH, H.-D. (1989): Lehrbuch der Agrartechnik, Band 1: Allgemeine Grundlagen, Ackerschlepper, Fördererntechnik. - Verlag Paul Parey; Hamburg und Berlin: 245 S.
- LAU, N., L. PENG, H. GOTO, L. CHEMNICK, O. A. RYDER & K. D. MAKOVA (2009) : Horse domestication and conservation genetics of Przewalski's horse inferred from sex chromosomal and autosomal sequences. - Mol. Biol. Evol. 26 (1) : 199-208
- LAVALARD, E. (1894): Le Cheval dans ses rapports. Avec l'économie rurale et les industries de transport. Tome II: Choix et Achat. Utilisation du Cheval. Situation actuelle de la Production Chevaline. - Bibliothèque de l'enseignement agricole. - Librairie de Firmin-Didot et Cie.; Paris: 426 S.
- LAWRENCE, P. R. & R. A. PEARSON (1989): Measurement of energy expenditure in working animals: methods for different conditions. - in: HOFFMANN, D., J. NARI & J. PETHERAM (eds.): Draught animals in rural development. - ACIAR Proceedings, Series No. 27: 155-165
- LAWRENCE, P. R. & R. A. PEARSON (1999): Feeding standards for cattle used for work. - Centre for Tropical Veterinary Medicine, University of Edinburgh; Midlothian: 59 pp.
- LAWRENCE, P. R., R. A. PEARSON & J. T. DIJKMAN (1991): Techniques for measuring whole body energy expenditure of working animals: a critical review. - in: IAEA & FAO (eds.): Isotopes and related techniques in animal production and health. Proceedings of a symposium; Vienna: 211-232
- LAWRENCE, P. R. & R. J. STIBBARDS (1990): The energy costs of walking, carrying and pulling loads on flat surfaces by Brahman cattle and Swamp buffalo. - Anim. Prod. 50: 29-39
- LHOSTE, P. (2005): La traction animale en Afrique subsaharienne: Histoire et nouveaux enjeux. - in: FEDERATION NATIONALE DES CENTRES D'INITIATIVES POUR VALORISER L'AGRICULTURE ET LE MILIEU RURAL (CIVAM) (ed.): L'animal de trait - Savoir-faire d'aujourd'hui. Actes du colloque, Le Pradel, Mirabel, Ardèche, 2 et 3 septembre 2004: 49-57
- LICZNER, Y. (1999): Auswirkungen unterschiedlicher Mäh- und Heubearbeitungsmethoden auf die Amphibi-enfauna in der Narewniederung (Nordostpolen). - Rana, Sonderheft 3: 67-79
- LOBODA, S. (2012): Pferd trifft Forwarder. - Forst & Technik 2: 18-20
- LUDWIG, K.-H. & V. SCHMIDTCHEN (1997): Metalle und Macht 1000 bis 1600. - in: KÖNIG, W. (hrsg.): Propyläen Technikgeschichte, Zweiter Band. - Ullstein Buchverlag; Berlin: 640 S.
- MAIER-BODE, F. W. (Hrsg.) (1953): Das Buch des Bauern. Ein Ratgeber für alle, die auf dem Bauernhof arbeiten und ihn betreuen. - Landwirtschaftsverlag GmbH; Hilstrup: 479 S.
- MARTINY, B. (1911): Zugkraftmessung bei Bodenbearbeitungsgeräten. - Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde bei der philosophischen Fakultät der Grossherzoglich Hessischen Ludwigs-Universität zu Giessen. - Buchdruckerei Gebr. Unger; Berlin: 63 S.
- MATTHIES, D. (2009): Forsttechnik unter Druck. Waldböden setzen noch schwereren Maschinen Grenzen - eine Ursachenanalyse. - LWF aktuell 68/2009: 47-49
- MCCUTCHEON, L. J. & R. J. GEOR (2000): Influence of training on sweating responses during submaximal exercise in horses. - J. Appl. Physiol. 89: 2463-2471

8. Literatur

- MCGAHERN, A., M. A. M. BOWER, C. J. EDWARDS, P. O. BROPHY, G. SULIMOVA, I. ZAKHAROV, M. VIZUETE-FORSTER, M. LEVINE, S. LI, D. E. MACHUGH & E. W. WILL (2006): Evidence for biogeographic patterning of mitochondrial DNA sequences in Eastern horse populations. - *Animal Genetics* 37: 494-497
- MEINEN, G. (1994): Sie leben noch - Die Ostfriesen und Oldenburger alten Schlags. - *Das Zugpferd* 4/1994: 32-35
- MEYER, E. (1939): Das Deutsche Kaltblutpferdeleistungsbuch und seine Anwendung im Prüfungswesen für Kaltblutpferde. - *Deutsches Kaltblut* 12: 281-286, 291-294 u. 300-301
- MEYER, E. (1940): Die deutsche Kaltblutzucht. Ein kurzer Leitfaden für Kaltblutzüchter und Nutzer von Kaltblutpferden. - Neubearbeiteter und erweiterter Sonderdruck aus dem im gleichnamigen Verlag erschienenen zweibändigen Werk „Reiter, Pferd und Fahrer“. - Verlag Küster & Co. GmbH; Essen: 46 S.
- MEYER, E. (1951): Motorisierung und Pferdehaltung. Gedanken um einen zweckvollen Arbeitseinsatz von Pferd und Motor. - *Der Tierzüchter* 2: 32-35
- MEYER, H. (1961): Verbrennungsmotoren und Schlepper. – in: DENCKER, C. H. (Hrsg.): *Handbuch der Landtechnik*. – Verlag Paul Parey; Hamburg und Berlin: 51-172
- MEYER, H. & M. COENEN (2002): *Pferdefütterung*. - Parey Buchverlag; Berlin: 244 S.
- MEYER, S. (1997): *Arbeitspferde in der Schweiz*. - Semesterarbeit, ETH Zürich, Abteilung für Agrar- und Lebensmittelwissenschaften; Zürich: 31 S.
- MEYER, W. (2010 a): Schriftliche Mitteilung, Prof. Dr. em. Wilfried Meyer, Tierärztliche Hochschule Hannover; 12.11.2010
- MEYER, W. (2010 b): Hautdrüsen. - in: WISSDORF, H., H. GERHARDS, B. HUSKAMP & E. DEEGEN: *Praxisorientierte Anatomie und Propädeutik des Pferdes*. - Verlag M. & H. Schaper GmbH; Hannover: 39-42
- MILLER, L. R. (1994): *Training workhorses, training teamsters*. - Small Farmer's Journal Inc.; Sisters, Oregon: 351 pp.
- MILLER, L. R. (2004): *Work Horse Handbook*. - Small Farmer's Journal Inc.; Sisters, Oregon: 366 pp.
- MILLER, L. R. (2006): *Twenty-first Century Horsefarming? What About the Equipment?.* - *Small Farmer's Journal* 30 (4): 1-6
- MÖRTL (o.J.): *Doppelmesser-Heckmäherwerk BM 1205 System „Busatis Bidux“*. - Firmenprospekt der Firma Mörtl; Pöttmes: 4 Seiten
- MÖRTL (1997): *Ermittlung Leistungsbedarf für Scheibenmäherwerke und Aufbereiter*. - Rundschreiben der Technischen Abteilung der Firma Mörtl vom 04.03.1997; Pöttmes, 1 S.
- MOORE, S. (1998): *Horse Pulling Contests*. - *Rural Heritage* 23 (6): 60-61
- MOORE, S. (2006): *Implements for Farming with Horses & Mules. A Modern All-in-One Manual*. - *Rural Heritage*; Gainesboro: 276 pp.
- MORDHORST, A. (2009): *Zeitabhängige Strukturbildung bei biologisch-dynamischer Bodenbewirtschaftung mit leichten Maschinen und Zugpferden*. - Masterarbeit am Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel; Kiel: 82 S.
- MORRISSEY, C. (2009): *A sustainability comparison between horse traction and tractor traction on small farm holdings in Ireland*. - MSc.-thesis. - Dublin Institute of Technology, Department of Environment and Planning; Dublin: 111 pp.
- MÜHLENBERG, M. & J. SLOWIK (1997): *Kulturlandschaft als Lebensraum*. - UTB, Quelle & Meyer Verlag; Wiesbaden: 312 S.
- MUMMA, T. (2008): *Draft animal power for farming*. - hrsg.: ATTRA - NATIONAL SUSTAINABLE AGRICULTURE INFORMATION SERVICE; Fayetteville: 8 pp.
- MUNCKEL, H. (1930): *Zugproben mit Pferden*. - *Züchtungskunde* V: 218-225
- NEMESTOTHY, N. (2009): *Boden unter Druck - sind Bodenschutz und Holzernte vereinbar?.* - *BFW-Praxisinformation* 19: 9-13
- NEUSCHULZ, H. (1956): *Pferdezucht: Haltung und Sport*. - Deutscher Bauernverlag; Berlin: 512 S.

8. Literatur

- NIEMANN, H. (2000): Panzerschwere Technik bedroht die Ackerböden. - HNA-Sonntagszeit vom 21.05.2000: 20
- NISSEN, J. (1997): Enzyklopädie der Pferderassen. Europa Band 1. Deutschland, Belgien, Niederlande, Luxemburg. - Franckh-Kosmos-Verlags GmbH & Co.; Stuttgart: 320 S.
- NISSEN, J. (1999): Enzyklopädie der Pferderassen. Europa Band 3. Spanien, Portugal, Italien, Schweiz, Österreich, Osteuropa. - Franckh-Kosmos-Verlags GmbH & Co.; Stuttgart: 408 S.
- NOBIS, G. (2000): Die Geschichte des Pferdes - seine Evolution und Domestikation. - in: THEIN, P. (Red.): Handbuch Pferd. Zucht, Haltung, Ausbildung, Sport, Medizin, Recht. - BLV Verlagsgesellschaft mbH; München, Wien, Zürich: 9-26
- NOLLE, J. (1986): Machines modernes à traction animale: itinéraire d'un inventeur au service des petits paysans. - Edition L'Harmattan; Paris: 478 pp.
- OHRNDORF, K. (2011): Motor als Brückentechnologie. Gedanken eines Biobauern und Gerätebauers zum Zugtiereinsatz mit Vorderwagen. - Starke Pferde 15 (58): 62-63
- OLFE, G. (1995): Zur Bodenbelastung durch den Schlepper- und Maschineneinsatz in der pflanzlichen Produktion. - in: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. (Hrsg.): Bodenverdichtung. - KTBL-Schrift 362. - Landwirtschafts-Verlag; Münster-Hiltrup: 12-28
- OPPERMANN, R. & A. CLABEN (1998): Naturverträgliche Mähtechnik - Moderne Mähgeräte im Vergleich. - hrsg.: NATURSCHUTZBUND NABU, LANDESVERBAND BADEN-WÜRTTEMBERG E.V. - Grüne Reihe; Stuttgart: 48 S.
- PAGAN, J. D. & H. F. HINTZ (1986): Equine energetics. I. Relationship between body weight and energy requirements in horses. - J. Anim. Sci. 63: 815-821
- PAPAVASSILIOU, F. (1988): Liebenswerte Riesen. Die schönen Kaltblutpferde Europas. - Limpert Verlag; Wiesbaden: 159 S.
- PAPENDIECK, L. (1958): Das Kleinpferd. Seine Verwendungsmöglichkeiten, Haltung und Aufzucht in der landwirtschaftlichen Praxis. - Verlag Paul Parey; Hamburg und Berlin: 135 S.
- PEARSON, R. A. (2005): Equines. - in: OWEN, E., A. KITALYI, N. JAYASURIYA & T. SMITH (eds.): Livestock and Wealth Creation. Improving the Husbandry of Animals Kept By Resource-Poor People in Developing Countries. - DFID Livestock Production Programme. - Nottingham University Press; Nottingham: 489-507
- PEARSON, R. A. (2010): mdl. Mitt. Dr. R. A. Pearson, University of Edinburgh, Centre for Tropical Veterinary Medicine
- PEARSON, R. A. & J. T. DIJKMAN (1994): Nutritional implications of work in draught animals. - Proceedings of the Nutritional Society 53: 169-179
- PEARSON, R. A. & P. R. LAWRENCE (1997): Draught animal research by the centre for tropical veterinary medicine (CTVM), Edinburgh. - in: TISSERAND, J. L. & A. PEARSON (eds.): Draught animal power in Europe and the Mediterranean basin. - REU Technical Series 45. - Food and Agricultural Organization of the United Nations; Rom: 103-114
- PÉREZ, R., S. VALENZUELA, V. MERINO, I. CABEZAS, M. GARCIA, R. BOU & P. ORTIZ (1996): Energetic requirements and physiological adaptation of draught horses to ploughing work. - Animal Science 63: 343-351
- PETH, S., J. ROSTEK, A. ZINK, A. MORDHORST & R. HORN (2010): Soil testing of dynamic deformation processes of arable soils. - Soil and Tillage Research 106 (2): 317-328
- PETZOLD, E. (1952): Beanspruchung, Prüfung und Leistungsfähigkeit von Arbeitspferden der Betriebe Oberer und Unterer Hardthof Gießen. - Institut für Tierzucht und Milchwirtschaft an der Justus-Liebig-Hochschule Gießen; Gießen: 64 S.

8. Literatur

- PFLUGRADT, R. (2007): Phylogenetische Untersuchungen am Hauspferd (*Equus caballus*) mit besonderem Bezug zur Domestikation. - Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Hohe Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät; Bonn: 77 S.
- PIEPHO, H. P. (2004): An algorithm for a letter-based representation of all-pairwise comparisons. *Journal of Computational and Graphical Statistics* 13: 456-466
- PIEPHO, H. P., A. BÜCHSE, & K. EMRICH (2003): A hitchhiker's guide to mixed model for randomized experiments. - *J. Agronomy & Crop Science* 189: 310—322.
- PIMENTEL, D. (2009): Reducing energy inputs in the agricultural production system. - *Monthly Review* 61 (3): <http://monthlyreview.org/2009/07/01/reducing-energy-inputs-in-the-agricultural-production-system>; Zugriff am 21.01.2012
- PIMENTEL, D. & T. W. PATZEK (2005): Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. - *Natural Resources Research* 14 (1): 65-76
- PINNEY, C. (2003a): Gebt das Pferd nicht auf! Teil 1. - *Starke Pferde* 7 (27): 24-27
- PINNEY, C. (2003b): Gebt das Pferd nicht auf! Teil 2. - *Starke Pferde* 7 (28): 60-63
- PINNEY, C. (2003c): The case for returning to real live horse power. - in: DOUTHWAITE, R. (ed.): Before the wells run dry. Ireland's transition to renewable energy. - FEASTA. - Green Books Ltd.; Totnese: 336 pp.; www.feasta.org/documents/wells/six/pinney.html; Zugriff am 21.01.2012
- PINNEY, C. (2004): Zukunft der Pferdetechnik - Wohin geht die Entwicklung?. - *Starke Pferde* 31 (3): 28-33
- PLACHTER, H. (2001): Naturschutz. - Spektrum Akademie Verlag; Heidelberg: 500 S.
- PLOEG, R. R. VAN DER, W. EHLERS & F. SIEKER (1999): Floods and other possible adverse environmental effects of meadowland area decline in former West Germany. - *Naturwissenschaften* 86: 313-319
- PLOEG, R. R. VAN DER, W. EHLERS & R. HORN (2006): Schwerlast auf dem Acker. - *Spektrum der Wissenschaft*, August 2006: 80-88
- PONCE CEBALLOS, F., R. VENTO TIELVES & B. G. SIMS (2000): Comparative Study of influence of animal traction and light tractors on soil compaction in Cuba. - *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America* 31 (3): 19-23
- PREUSCHEN, G. (1956): Chancen der Pferdezucht im mechanisierten landwirtschaftlichen Betrieb. - Referat bei der öffentlichen Versammlung der Tierzucht-Abteilung der DLG, Januar 1956, Wiesbaden; zit. in: UPPENBORN, W. (1956): Bericht und Stellungnahme zum Vortag von Direktor Dr. Preuschen „Die Chancen der Pferdezucht im mechanisierten landwirtschaftlichen Betrieb“. - hrsg.: ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR ZUCHT UND PRÜFUNG DEUTSCHER PFERDE E.V. (A. D. P.) - DEUTSCHE REITERLICHE VEREINIGUNG; Bonn: 6 S.
- PRIEBE, H. (1953): Landarbeit heute und morgen. Grundfragen und praktische Hilfen. - Verlag Paul Parey; Hamburg und Berlin: 197 S.
- PRIEBE, H. (1954): Der Einfluß der Mechanisierung auf die Arbeitswirtschaft und den Ertrag der Kleinbetriebe. - in: KURATORIUM FÜR TECHNIK IN DER LANDWIRTSCHAFT (Hrsg.): Die Mechanisierung landwirtschaftlicher Kleinbetriebe. Bericht einer Arbeitstagung, die vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten im Auftrag der OEEC und in Zusammenarbeit mit der FOA 1954 in Stuttgart durchgeführt wurde. - *Berichte über Landtechnik* 41. - Verlag Hellmut Neureuter; München-Wolfratshausen: 67-94
- RAMASWAMY, N. S. (1983): Draught Animal Power. - in: UNITED NATIONS ECONOMIC AND SOCIAL COMMISSION FOR ASIA AND THE PACIFIC (ESCAP) & FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS (FAO) (eds.): Renewable Sources of Energy Study, Vol. 5; Bangkok: 121 pp.
- RAMASWAMY, N. S. (1998): Draught animal welfare. - *Applied Animal Behaviour Science* 59: 73-84
- RAU, G. (1950): Bedeutung und Zukunft der Pferdezucht. Vortrag, gehalten bei der dritten Hochschultagung der landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn. - *St. Georg* 50 (20): 1-5
- RAU, G. (1953): Zu den „Realitäten der Pferdezucht“. - *Der Tierzüchter* 23: 609-611

8. Literatur

- REINHARDT, W. (1930): Die Arbeitsleistung in landwirtschaftlichen Betrieben und ihre Abhängigkeit von Arbeitszeit, Arbeitslohn und anderen Faktoren, dargestellt aufgrund der dem Arbeitsausschuß vorliegenden Materialien und Verhandlungsergebnisse. - in: AUSSCHUB ZUR UNTERSUCHUNG DER ERZEUGUNGS- UND ABSATZBEDINGUNGEN DER DEUTSCHEN WIRTSCHAFT (hrsg.): Verhandlungen und Berichte des Unterausschusses für Arbeitsleistung (IV. Unterausschuß). - E. S. Mittler & Sohn; Berlin: 201 S.
- RHENIUS, K. T. (1994): Zur Entwicklung des Traktors von 1945 bis in die 80er Jahre. - in: FOK, O., U. WENDLER & R. WIESE (Hrsg.): Vom Klepper zum Schlepper. Zur Entwicklung der Antriebskräfte in der Landwirtschaft. - Arbeit auf dem Lande, Band 3. - Freilichtmuseum am Kiekeberg; Rosengarten-Ehestorf: 263-275
- RIES, L.-W. (1949): Der Schlepper im Bauernbetrieb. - Flugschriften der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft, Band 6. - Landbuch-Verlag GmbH; Hannover: 125 S.
- RIJN, F. J. J. VAN (1929): Trekproeven bij paarden. Een onderzoek naar de trekkracht en het arbeidsvermogen van paarden in Nederland, met behulp van het toestel van Prof. Visser. - Dissertation, Universität Utrecht. - H. Veenman & Zonen; Wageningen: 282 S.
- RODEWALD, M.-C., H. HOFFMANN & P. HEROLD (2006): Die Nutzung des Einsatzes von Arbeitspferden im betrieblichen Marketing. Ergebnisse einer Bachelorarbeit an der Humboldt Universität zu Berlin. - Starke Pferde 10 (37): 17-18
- RUHRSTICKSTOFF AG (hrsg.) (1963): Faustzahlen für die Landwirtschaft. - Landwirtschaftsverlag GmbH; Hiltrup (Westf.): 399 S.
- RYDBERG, T. & J. JANSÉN (2002): Comparison of horse and tractor traction using emergy analysis. - Ecological Engineering 19: 13-28
- SANSOUCY, R. (1995): Livestock - a driving force for food security and sustainable development. World Animal Review 84/85: 5-17
- SASIMOWSKI, E. (1987): Animal breeding and production. An outline. - PWN-Polish Scientific Publishers & Elsevier; Warszawa, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: 758 pp.
- SASIMOWSKI, E. & E. SASIMOWSKI (1998): Racjonalne i nowoczesne wykorzystanie koni roboczych w rolnictwie, leśnictwie i ochronie środowiska. - Wojewódzki Ośrodek Doradztwa Rolniczego w Olsztynie; Olsztyn: 65 S.
- SCHACK-KIRCHNER, H. (2008): mdl. Mitt.; Prof. Dr. H. Schack-Kirchner, Forstliche Versuchsanstalt Freiburg. - KWF-Workshop „Bodenbelastung und Reifenentwicklung im Forst“, 27.02.2008; Groß-Umstadt
- SCHACK-KIRCHNER, H., E. E. HILDEBRAND & K. VON WILPERT (1993): Bodensauerstoffhaushalt unter Fahrspuren. - AFZ 3/1993: 118-121
- SCHARNHÖLZ, R. (2002): Kaltblutpferde - Made in Germany. Handbuch der Deutschen Kaltblutzucht. - Starke Pferde Verlag; Lemgo: 262 S.
- SCHARNHÖLZ, R. (2006): Rückepferde sind gesetzeskonform. - Starke Pferde 10 (37): 19-21
- SCHARNHÖLZ, R. (2007): Kleinpferde. - Starke Pferde 11 (42): 60-67
- SCHARNHÖLZ, R. (2011): mdl. Mitt., Dr. Reinhard Scharnhölz, 1. Vorsitzender der Interessengemeinschaft Zugpferde e.V.
- SCHEIBER, O. (1940): Pferd und Fuhrmann in Landwirtschaft und Gewerbe. - Verlag M. & H. Schaper; Hannover: 209 S.
- SCHEPP, W. (1952): Pferdehaltung und Pferdezucht. Ihre betriebswirtschaftliche Stellung in der Bundesrepublik. - in: AID - LAND- UND HAUSWIRTSCHAFTLICHER AUSWERTUNGS- UND INFORMATIONSDIENST (Hrsg.): Schriftenreihe des AID, Heft 52; Bad Godesberg: 24 S.
- SCHERF, B. D. (ed.) (2000): World Watch List for Domestic Animal Diversity. - ed.: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS; Rome: 726 pp.
- SCHMELZER, A. (2010): Kaltblutpferde. - Müller Rüschnikon Verlags AG; Cham: 191 S.

8. Literatur

- SCHMID, O., S. PADEL, N. HALBERG, M. HUBER, I. DARNHOFER, C. MICHELONI, C. KOOPMANS, S. BÜGEL, C. STOPES, H. WILLER, M. SCHLÜTER & E. CUOCO (2009): Strategic research agenda for organic food and farming. – in: IFOAM EU GROUP (ed.): Technology Platform Organics; Brussels: 116 pp.
- SCHMIDT, L. A. (1998): Schonende Bodenbearbeitung und Pflege mit Pferden im ökologischen Gemüsebau. - Diplomarbeit, Universität Gesamthochschule Kassel, FB Landwirtschaft, Internationale Agrarentwicklung und Ökologische Umweltsicherung; Witzenhausen: 46 S.
- SCHMIT, P. (2007): Maintaining Grassland with Horses. Part I. - Small Farmer's Journal, 31 (3): 26-31
- SCHMIT, P. (2008a): Making Hay with Horses. Part I. - Small Farmer's Journal 32 (1): 49-53
- SCHMIT, P. (2008b): Making Hay with Horses. Part III. - Small Farmer's Journal 32 (4): 62-65
- SCHMIT, P. (2010): Biodiversität erhalten mit Arbeitspferden. Teil I. - Starke Pferde 14 (53): 14-23
- SCHMIT, P. (2011a): Fortschritt mit Arbeitspferden. Teil I: Schweden - erfrischend anders. - Starke Pferde 15 (57): 18-21
- SCHMIT, P. (2011b): Fortschritt mit Arbeitspferden. Teil II. - Starke Pferde 15 (58): 58-62
- SCHMIT, P. (2011c): Stimmt die Richtung noch?. - Starke Pferde 15 (58): 65
- SCHMIT, P. (2011d): Fortschritt mit Arbeitspferden. Teil III: Zugkraftmessungen an Kultivatoren. - Starke Pferde 15 (59): 30-35
- SCHMIT, P. (2011e): Mündliche Mitteilung, Dipl.-Ing. Paul Schmit, Geräteentwickler und Fuhrmann, Tuntange, Luxemburg
- SCHROLL, E. (2000): Vollmechanisierte Holzernte: boden- und bestandesschonendstes Arbeitsverfahren?. - Starke Pferde 4 (15): 23-27
- SCHROLL, E. (2001): Neue Pferdegereäte. - Siegerländer Tüftler entwickelt u.a. zukunftsweisendes Mähwerk für Pferde. - Starke Pferde 5 (17): 30
- SCHROLL, E. (2004): Ohne Pferde geht nichts. Polens Pferdebetriebe im Zeitalter des EU-Beitritts. - Starke Pferde 8 (32): 17-18
- SCHROLL, E. (2006): Bella Italia! Besuch bei italienischen Pferdebauern. - Starke Pferde 10 (39): 14-19
- SCHROLL, E. (2007): Biodiesel contra tierische Zugkraft. Die Gefahren der energetischen Nutzung von Pflanzen und ihre möglichen negativen Auswirkungen auch auf die weltweite Nutzung tierischer Zugkraft. - Starke Pferde 11 (41): 28-29
- SCHROLL, E. (2008a): Brustblattgeschirre - Geschirre zum Fahren und Arbeiten?. - Starke Pferde 12 (46): 36-45
- SCHROLL, E. (Hrsg.) (2008b): Holzrücken mit Pferden. Handbuch für die Waldarbeit mit Pferden. - Starke Pferde-Verlag; Lemgo: 194 S.
- SCHROLL, E. (2009): PferdeStark '09: Feldvorführungen, IGZ-Innovationspreise. - Starke Pferde 13 (52): 34-37
- SCHROLL, E. (2011a): Moderne Pferdezuggeräte für den Einsatz (nicht nur) in Naturschutz und Landschaftspflege. - Vortrag beim Seminar „Pferdeeinsatz in der Landschaftspflege“ der Norddeutschen Naturschutzakademie (NNA) und der Interessengemeinschaft Zugpferde e.V. (IGZ) am 12.10.2011 im Camp Reinsehlen, Schneverdingen
- SCHROLL, E. (2011b): Wer hat den größten? Mehr Pferdefreundlichkeit anstatt mehr Leistung. - Starke Pferde 15 (58): 66
- SCHROLL, E. (2012): Das neue I&J-Pferdemähwerk. Ein erster Erfahrungsbericht. - Starke Pferde 16 (64): 20-21
- SCHULZ, I. (2000): Belastung von in der gewerblichen Personenbeförderung eingesetzten Kutschpferden. - Dissertation, Tierärztliche Hochschule Hannover, Institut für Tierhygiene und Tierschutz; Hannover: 252 S.
- SCHWEIGMANN, P. (1993): Die Landmaschinen und ihre Instandhaltung. - Bulldog Press; Limburg/Lahn: 740 S.

8. Literatur

- SEGLER, G. (1956): Maschinen in der Landwirtschaft. - Verlag Paul Parey; Hamburg und Berlin: 447 S.
- SEMMELE, H. & R. HORN (1995): Möglichkeiten zur Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit und der Druckfortpflanzung im Boden im Hinblick auf die Ableitung von bodentyp- und maschinenspezifischen Grenzwerten. - in: KTBL (Hrsg.): Bodenverdichtung. FAL/KTBL-Fachtagung am 18./19. November 1993 in Braunschweig. KTBL-Schrift 362. - Landwirtschaftsverlag; Münster-Hiltrup: 61-92
- SMITH, A. J. (1981): The role of draught animals in agricultural systems in developing countries. - in: SPEDDING, C. R. W. (ed.): Vegetable productivity. - Macmillan; London: 247-262
- SÖHNE, W. (1992): Bodenbearbeitungs- und Erntetechnik. Ein historischer Abriss von Anbeginn bis heute. - DLG-Verlag; Frankfurt am Main: 97 S.
- SOMMER, C. & K.-H. HARTGE (1991): Verdichtung und Befahrbarkeit von Ackerböden. Probleme und Auswege. - Berichte über Landwirtschaft 204: 104-117
- SOMMERFELD, J. & R. GRUSCHINSKI (1952): Shetlandponys als Arbeitspferde des Geflügel- und Kleintierzüchters. - Celler Jahrbuch 1952. - Verlag Oertel & Spörer; Münster-Hiltrup: 250-253
- SOUKUP, B. (2008): Der Einsatz von Arbeitspferden im Gemüsebau am Beispiel der Gärtnerei am Bauerngut (Land Brandenburg). - Bachelorarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät; Berlin: 81 S.
- SOUKUP, B., H. HOFFMANN & P. HEROLD (2008): Arbeitspferde im Gemüsebau. Untersuchungen zum Zeitbedarf von Hackarbeiten. - Landtechnik 63 (5): 296-297
- SPANN, J. (1925): Das Rind als Arbeitstier. - Weihenstephaner Schriftensammlung für praktische Landwirtschaft. - Verlag von F. P. Datterer & Cie. (Sellier); Freising: 168 S.
- SPINDLER, A. (1929): Die Rückkehr der amerikanischen Landwirte zum Pferde. - Deutsches Kaltblut 2: 197-200
- SPYCHIGER, H. (1992): Revue moderner Geräte für den Pferdezug. Sommertagung der IG-Arbeitspferde der Schweiz. - Das Zugpferd 4/1992: 32-33
- SPYCHIGER, H. (1994): Thema: Pferdezugmaschinen. - Das Zugpferd 5/1994: 4-5
- SPYCHIGER, H. (2011): Vorderwagen - Die Lösung. - Starke Pferde 15 (58): 67
- SRU (Hrsg.) (2007): Klimaschutz durch Biomasse. Sondergutachten. - Hrsg.: SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN. - Hausdruck; Berlin: 189 S.
- STARKEY, P. H. (2000): Empowering farmers with animal traction: worldwide trends, issues and challenges. - in: KAUMBUTHO, P. G., R. A. PEARSON & T. E. SIMALENGA (eds.): Empowering farmers with animal traction. - Proceedings of the workshop of the Animal Traction Network for Eastern and Southern Africa (ATNESA), held 20-24 September 1999, Mpumalanga, South Africa: 18-21
- STARKEY, P. H. (2004): mdl. Mitt. Paul Starkey, International Consultant Animal Traction Development, University of Reading, UK
- STARKEY, P. H. (2005): La traction animale dans le monde: réalités, organisation en réseau et perspectives. - in: FEDERATION NATIONALE DES CENTRES D'INITIATIVES POUR VALORISER L'AGRICULTURE ET LE MILIEU RURAL (CIVAM) (ed.): L'animal de trait - Savoir-faire d'aujourd'hui. Actes du colloque, Le Pradel, Mirabel, Ardèche, 2 et 3 septembre 2004: 20
- STARKEY, P. H. (2010): Livestock for traction: world trends, key issues and policy implications. A background paper prepared for Livestock Information, Sector Analysis and Policy Branch (AGAL), Animal Production and Health Division of Food and Agriculture Organization (FAO). - ed.: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO); Rom: 42 pp.
- STEDING (1927/28): Die Hengstschau des Landgestüts Kreuz verbunden mit der ersten öffentlichen Zugleistungsprüfung unter Verwendung eines amerikanischen Zugkraftmeßwagens. - Deutsches Kaltblut 1: 10-14

8. Literatur

- STEGMAIER, E. (2005): LIFE-Projekt Lebensraumverbund Westlicher Untersee - Bodensee. Endbericht 2004. Kurzfassung des technischen Berichts. - hrsg.: BEZIRKSSTELLE FÜR NATURSCHUTZ UND LANDSCHAFTSPFLEGE; Freiburg: 26 S.
- STEINERT, B. (1992): Perspektiven der Pferdearbeit in der Landwirtschaft unter besonderer Berücksichtigung der Pflegearbeiten. - Diplomarbeit, Universität Gesamthochschule Kassel, FB Landwirtschaft, FG Agrartechnik; Witzenhausen: 90 S.
- STEVENSON, R. D. & R. J. WASSERSUG (1993): Horsepower from a horse. - *Nature*, Vol. 364: 195
- STRÜBER, K. (2003): Umbau einer Grasmähmaschine. - *Starke Pferde* 7 (25): 13-14
- STRÜBER, K. (2010): Humussphäre. Projekt zu Energie sparenden und Humus aufbauenden Methoden in der Landwirtschaft. - *Starke Pferde* 14 (54): 24-27
- STRÜBER, K. (2011): Science Fiction? Das bedingungslose Grundeinkommen. Humussphäre. Projekt zu Energie sparenden und Humus aufbauenden Methoden in der Landwirtschaft. Teil 6: Das Jahr 2010. - *Starke Pferde* 14 (59): 41-42
- SUDFELDT, C., R. DRÖSCHMEISTER, C. GRÜNEBERG, S. JAEHNE, A. MITSCHKE & J. WAHL (2008): Vögel in Deutschland – 2008. - hrsg.: DACHVERBAND DEUTSCHER AVIFAUNISTEN, BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ & LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT DER VOGELSCHUTZWARTEN. - Eigenverlag des Dachverbandes Deutscher Avifaunisten e.V.; Steckby: 44 S.
- TÄNZER, E. (1928): Zugleistungsprüfungen an Zugpferden. Kritisches Sammelreferat. - *Landwirtschaftliche Jahrbücher. Zeitschrift für wissenschaftliche Landwirtschaft*, Band 67. - Verlagsbuchhandlung Paul Parey; Berlin: 103-147
- TAMM, M. (2010): mdl. Mitt., Marco Tamm, Betriebsleiter, Hessische Staatsdomäne Frankenhausen; Grebenstein
- TEICHMANN, W. (1928): Zugkraft der Zugtiere und Zugkraftbedarf landwirtschaftlicher Maschinen und Geräte. - Inauguraldissertation zur Erlangung der Doktorwürde einer Hohen Philosophischen Fakultät der Albertus-Universität zu Königsberg i. Pr.. - Universitätsverlag von Robert Noske; Borna-Leipzig: 84 S.
- TEIPEL, R. (1949): Vergleichende Untersuchungen über die Kuhanspannung und ihre Forderung an die Geräte der Bodenbearbeitung. – Diplomarbeit, Universität Jena: 46 S.
- TELLEEN, M. (1977): *The Draft Horse Primer. A Guide to the Care, Selection and Use of Work Horses and Mules.* – Draft Horse Journal, Inc.; Waverly, Iowa (USA): 386 pp.
- TEMPER, K. (1927): Versuche über Verfütterung von frischen und getrockneten Rübenblättern an Arbeitspferde. - *Landw. Jahrb.* 66: 245-316
- THOMAS, D. P., G. F. FREGIN, N. H. GERBER & N. B. AILES (1983): Effects of training on cardiorespiratory function in the horse. - *Am. J. Physiol.* 245: R160-R165
- TILLAK, P. (2000): Landwirtschaftliche Unternehmen in einer unternehmerischen Landwirtschaft der Zukunft. - in: LEIPZIGER ÖKONOMISCHE SOCIETÄT E.V. (Hrsg.): Nachtrag zur Vortragstagung anlässlich des Beginns der Landarbeitsforschung vor 80 Jahren in Pommritz und deren Weiterführung vor 50 Jahren in Gundorf am 20. Oktober 2000 in Leipzig; Leipzig: 3-18
- UBA (Hrsg.) (1997): *Nachhaltiges Deutschland. Wege zu einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung.* - hrsg.: UMWELTBUNDESAMT. - Erich Schmidt Verlag; Berlin: 355 S.
- UPPENBORN, W. (1956): Bericht und Stellungnahme zum Vortrag von Direktor Dr. Preuschen „Die Chancen der Pferdezucht im mechanisierten landwirtschaftlichen Betrieb“. - hrsg.: ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR ZUCHT UND PRÜFUNG DEUTSCHER PFERDE E.V. (A. D. P.) - DEUTSCHE REITERLICHE VEREINIGUNG; Bonn: 6 S.
- VOORHEES, W. B., R. A. YOUNG & L. LYLES (1979): Wheel traffic considerations in erosion research. - *Transactions of the ASAE* 22 (4): 786-790
- VOORHEES, W. B. & M. J. LINDSTROM (1983): Soil compaction constraints on conservation tillage in the northern corn belt. - *J. Soil and Water Cons.* 38: 307-311

8. Literatur

- VOßBRINK, J. (2005): Bodenspannungen und Deformationen in Waldböden durch Ernteverfahren. - Dissertation, Universität Kiel, Agrar- und Ernährungswissenschaftliche Fakultät. - Schriftenreihe, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Universität Kiel, Nr. 65: 107 S.
- WAGGERSHAUSER, O. (1954): Wie finanziert der bäuerliche Betrieb seine Mechanisierung?. - in: KURATORIUM FÜR TECHNIK IN DER LANDWIRTSCHAFT (Hrsg.): Die Motorisierung im bäuerlichen Familienbetrieb. - Berichte über Landtechnik 38. - Verlag Hellmut Neureuter; Wolfratshausen-München: 21-25
- WAGNER, F. & W. PREDIGER (1989): Der Feldversuch. Durchführung und Technik. - Selbstverlag Fritz Wagner; Bad Hersfeld: 552 S.
- WAGNER, S. (2008): Rechtliche Beurteilung von Bodenschäden in der Forstwirtschaft. - LWF aktuell 67/2008: 28-30
- WAIBLER, F. (2013): Mähwerke. - www.mf-tech.de/html/maehwerke.html; Zugriff: 25.11.2013
- WAIMANN, A. (1995): Pferdetypen und Pferdehaltung im Mittelalter: Die Schlachtrasse der Könige. - Traum-pferde 5/95: 46-48
- WALCHER, W. (1989): Praktikum der Physik. - Verlag B. G. Teubner; Stuttgart: 415 S.
- WALKER, A. (1994): Auswirkungen des Holzrückens mit Pferdezug auf den Bodengashaushalt im Vergleich zum Harvester/Forwarder-Verfahren. - Diplomarbeit, Universität Hohenheim, Fakultät III; Stuttgart-Hohenheim: 98 S.
- WEBER, L. (2003): Die Böden nehmen kein Wasser mehr auf. Fragen an den Bodenkundler Rainer Horn zu den Auswirkungen schwerer Landmaschinen. - FAZ vom 15.12.2003
- WEBER, T. (1987): Bodenphysikalische Untersuchungen zum Einsatz von Arbeitspferden in der Landschaftspflege. - Diplomarbeit, FH Nürtingen, FB Landschaftspflege; Nürtingen: 99 S.
- WEHNER, R. (1944): Lassen sich Beziehungen der Knochenachsen und Gliedmaßenwinkel zur Schrittlänge beim rheinisch-deutschen Kaltblut nachweisen?. - Zeitschrift für Züchtung und Züchtungsbiologie 56 (3): 321-353
- WEIZSÄCKER, E. U. V., A. B. LOVINS & L. H. LOVINS (1995): Faktor vier. Doppelter Wohlstand – halbiertes Naturverbrauch. Der neue Bericht an den Club of Rome. – Droemer Knauer; München: 352 S.
- WELSCHOF, G. (1997): 7000 Jahre Zugtiere, 100 Jahre Traktoren ... (Nur wer seine Geschichte kennt, hat eine Zukunft). – Vortrag, gehalten am 28. April 1997 in Potsdam Bornim auf einem Wissenschaftlichen Kolloquium zu Ehren des 65. Geburtstages von Prof. Dr. sc. techn. Dr. agr. Georg Otto. - Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 15; Potsdam-Bornim: 32-50
- WELTIN, G. (1999): mdl. Mitt. Guido Weltin, Landwirt und Fuhrmann, Singen-Überlingen
- WELTIN, T. (2002): Moderner Arbeitspferdeeinsatz zur Pflege von Streuwiesen in Naturschutzgebieten. - Diplomarbeit, FH Nürtingen, FB Agrarwirtschaft: 73 S.
- WENDEL, C. H. (1997): Encyclopedia of American Farm Implements & Antiques. - Krause Publications; Iola: 395 pp.
- WENDLER, U. (1994): Motortragpflüge, Schlepper und Motormäher - Die deutsche Schlepperentwicklung bis 1945. - in: FOK, O., U. WENDLER & R. WIESE (Hrsg.): Vom Klepper zum Schlepper. Zur Entwicklung der Antriebskräfte in der Landwirtschaft. - Arbeit auf dem Lande, Band 3. - Freilichtmuseum am Kiekeberg; Rosengarten-Ehestorf: 239-262
- WIEDENMANN, S. (2003): Bodengetriebenes Doppelmesser-Mähwerk. - Starke Pferde 7 (25): 14-15
- WIERMANN, C., T. R. WAY, R. HORN, A. C. BAILEY & E. C. BURT (1999): Effect of various dynamic loads on stress and strain behaviour of a Norfolk sandy loam. - Soil & Tillage Research 50: 127-135
- WIERMANN, C., D. WERNER, R. HORN, J. ROSTEK & B. WERNER (2000): Stress/strain processes in a structured unsaturated silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. - Soil & Tillage Research 53: 117-128

8. Literatur

- WILLRICH, G (1999): Kaltblutpferde - Dicke Freunde, Starke Typen. - BLV Verlagsgesellschaft; München, Wien, Zürich: 159 S.
- WILSON, M. L. (1926): Big Teams in Montana. - Montana State College Extension Service, Publication No. 70: 111 p.
- WIRTH, J. (2008): Vergleich von Pferde- und Seilschleppereinsatz beim Vorliefern von Vollbäumen. - Starke Pferde 12 (47): 46-51
- WITHELM, D. (1991): Zugwiderstände. - Das Zugpferd 4/1991: 26-32
- WITT, S. (2004): Einfluss von Steigungstraining auf dem Laufband und unterschiedlichem Aufbautraining auf den Konditionserhalt bei Vielseitigkeitspferden. - Dissertation, Tierärztliche Hochschule Hannover; Hannover: 226 S.
- WYSS, M. (1999): Messung und Beurteilung des Bodendruckes beim Einsatz von Zugtieren. - Diplomarbeit, Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft; Zollikofen: 42 S.
- YASUI, T., A. TSUKISE, T. MIURA, K. FUKUI, & W. MEYER (2006): Cytochemical characterization of glycoconjugates in the apocrine glands of the equine scrotal skin. - Arch. Histol. Cytol. 69 (2): 109-117
- YASUI, T., K. FUKUI, T. NARA, I. HABATA, W. MEYER & A. TSUKISE (2007): Immunocytochemical localization of lysozyme and β -defensin in the apocrine glands of the equine scrotum. - Arch. Dermatol. Res. 299: 393-397
- YOUNG, R. A. & W. B. VOORHEES (1982): Soil erosion and runoff from planting to canopy development as influenced by tractor wheel-traffic. - Transactions of the ASAE 25 (3): 708-712
- ZAUNER, R. (2011): Gerätevielfalt für alle Bereiche. - Starke Pferde 15 (58): 63-64
- ZIMMERMANN, M. (1994): Energieaspekte des Pferdeeinsatzes. - Das Zugpferd 2/3, 94: 22-25
- ZINK, A., H. FLEIGE & R. HORN (2010): Load Risks of Subsoil Compaction and Depths of Stress Propagation in Arable Luvisols. - Soil Sci. Soc. Am. J. 74 (5): 1733-1742
- ZINK, A., H. FLEIGE & R. HORN (2011): Verification of harmful subsoil compaction in loess soils. - Soil and Tillage Research 114 (2): 127-134
- ZWAGERMAN, C. (1939): Ons Landbouw-Werkpaard. Doelmatige voeding, normen en rantsoenen, kosten en rationaliseering paardenarbeid, paardentractie tegenover motortractie. - P. J. van de Sande; Terneuzen: 200 S.

9. Anhang



Abbildung A-1: Grasmäher GM 20 (Hersteller: Bautz); Ardenner-Pferde „Piroux“ (Grauschimmel, Handpferd) und „Alphonse“ (Rotschimmel, Sattelpferd) im Amerikanischen Arbeitsgeschirr

Foto: P. Herold



Abbildung A-2: Vorderwagen „Pintow Power Cart“ (Hersteller: Carthorse Machinery, GB) mit Doppelmesser-Mähwerk (hier: 2,40 m Arbeitsbreite)

Foto: P. Herold

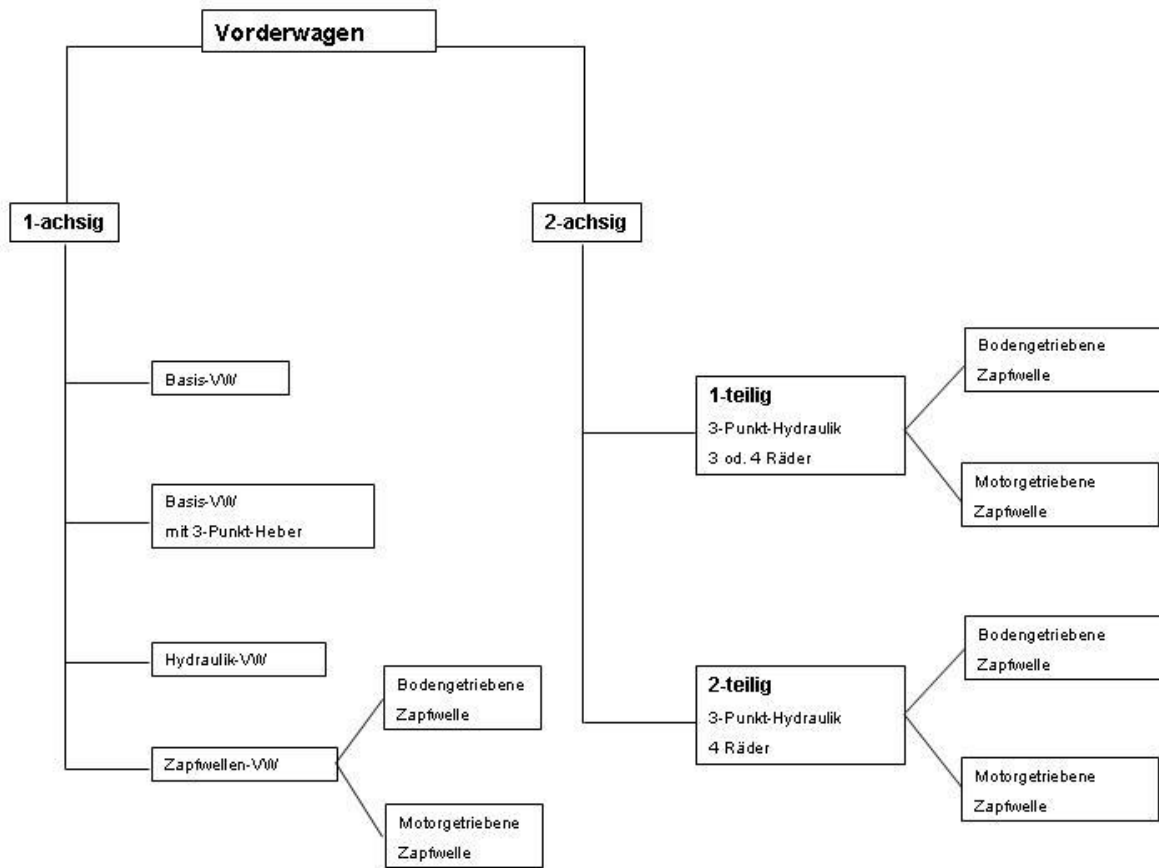


Abbildung A-3: Systematik der verschiedenen Vorderwagen

aus: HEROLD et al. (2009)



Abbildung A-4: Basis-Vorderwagen (Hersteller: Pioneer, USA)

Foto: P. Herold



Abbildung A-5: Vorderwagen „Pintow Big Team“ (Hersteller: Carthorse Machinery, GB)

Fotos: P. Herold



Abbildung A-6: Vorderwagen „Pintow Triple System“ (Hersteller: Carthorse Machinery, GB)

Foto: E. Schroll



Abbildung A-7: Vorderwagen „Pintow Power Cart“ (Hersteller: Carthorse Machinery, GB) mit angehängter Hochdruckpresse AP 41 (Hersteller: Welger)

Foto: R. Zauner



Abbildung A-8: Vorderwagen „HISKO“ mit angehängtem Doppelmesser-Mähwerk; (Hersteller: Kurt Ohrndorf, D)

Foto: P. Herold



Abbildung A-9: Vorderwagen mit angehängter Mittelkanal-Hochdruckpresse und Ballensammelwagen

Quelle: www.ruralheritage.com; Zugriff am 01.11.2001



Abbildung A-10: Vorderwagen mit angehängter Rundballenpresse

Quelle: www.ruralheritage.com; Zugriff am 29.07.1998



Abbildung A-11: Geräteträger „Univecus“ (Hersteller: Burkhalter, CH)

Foto: P. Tandler



Abbildung A-12: Verschiedene moderne Geräte des Herstellers Equi-Idea, Italien

*o.l.: Mehrzweck-Kultivator „Flex“; o.r.: Mehrzweckgerät „Multi“;
u.l.: Kultivator „Canadese“; u.r.: Messerwalze „Rolcut“*

Fotos: A. Moscardo



Abbildung A-13: Hydraulischer Rundballenlader „Charlie“ (Hersteller: Equi-Idea, I)

Foto: A. Moscardo

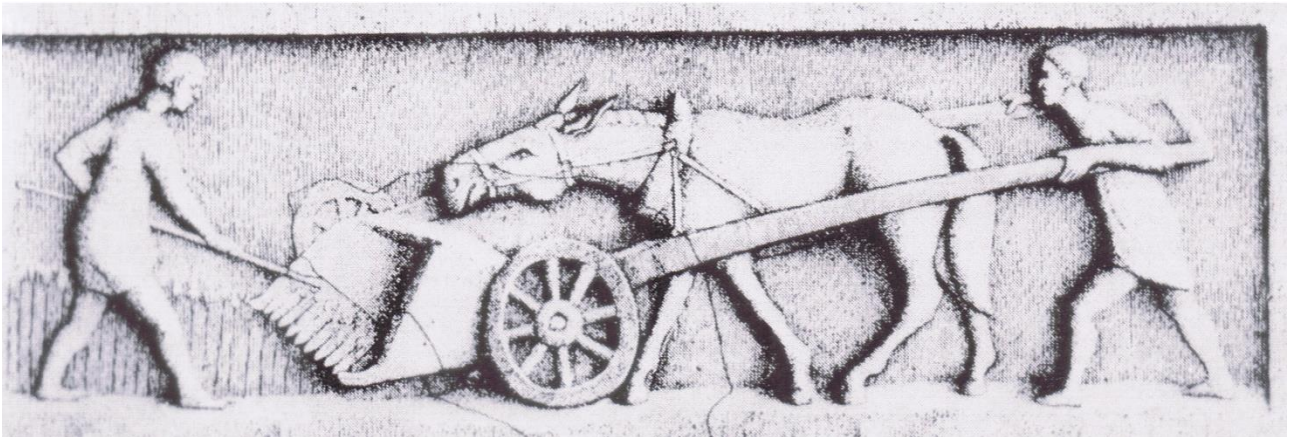


Abbildung A-14: Gallischer Mähkarren

Quelle: EGGERT (1999)



Abbildung A-15: Rheinisch-Deutsches Kaltblut

Foto: R. Scharnhölz



Abbildung A-16: Süddeutsches Kaltblut

Foto: R. Scharnhölz



Abbildung A-17: Schwarzwälder Kaltblut

Foto: R. Scharnhölz



Abbildung A-18: Schleswiger Kaltblut

Foto: R. Scharnhölz

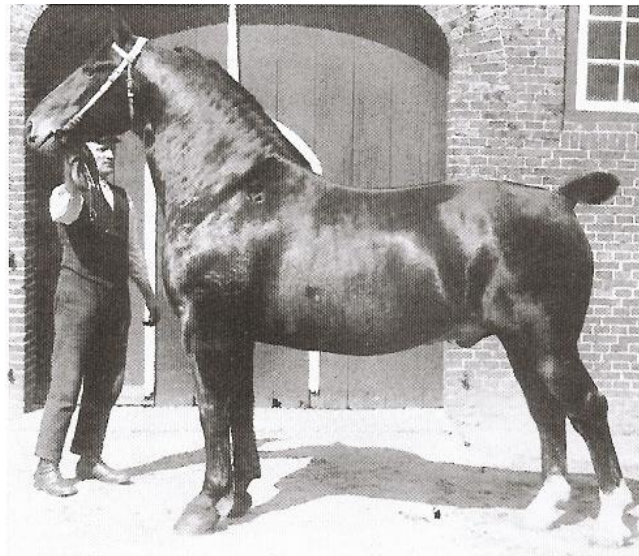


Abbildung A-19: Oldenburger Hengst "Gouverneur", geb. 1925 (von Goeben-Gido)

Quelle: NISSEN (1997), S. 131

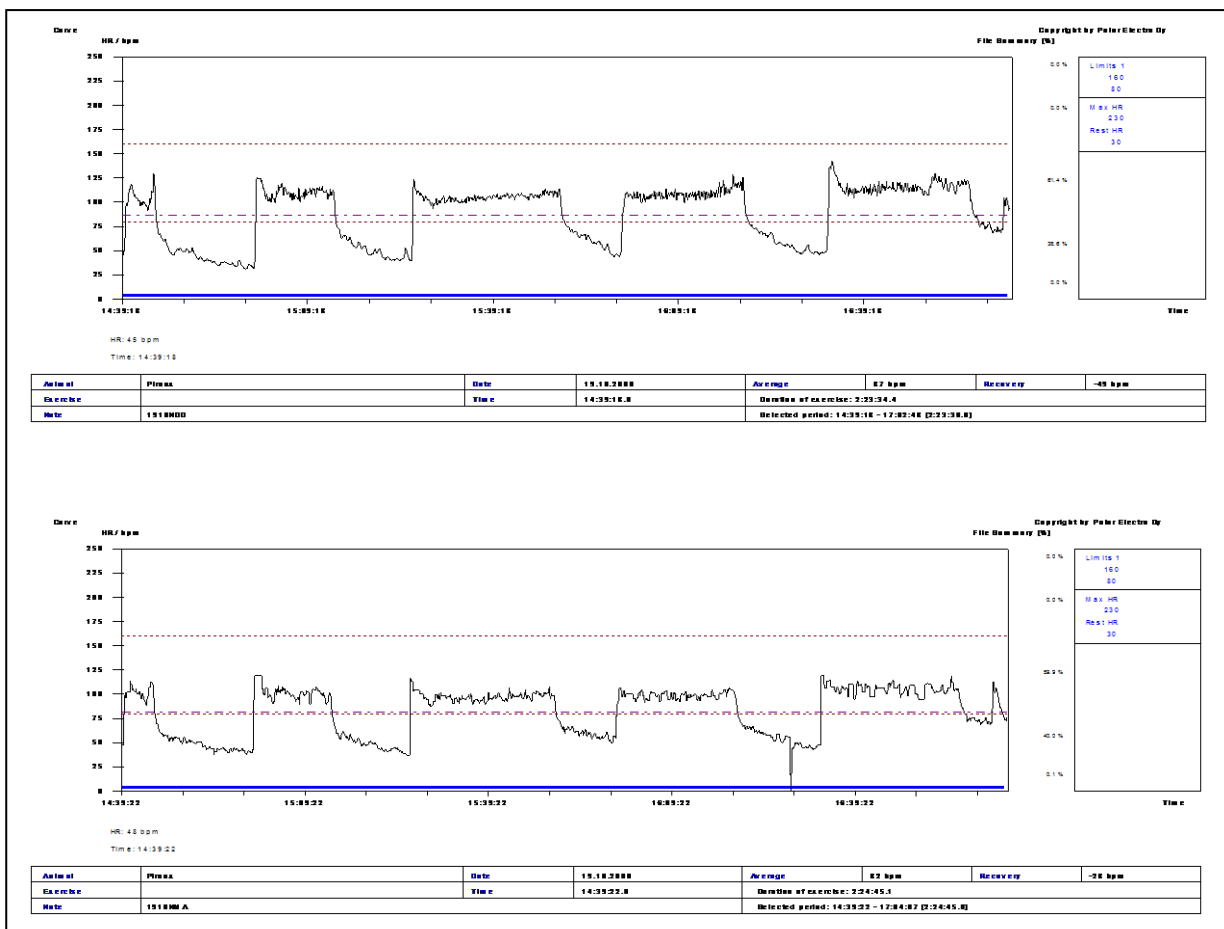


Abbildung A-20: Herzfrequenzmesskurven der Wallache „Dolex“ (oben) und „Max“ (unten) in Versuch Nr. 10 (1,90 m-Mähwerk mit Bodenantrieb), 19.10.2000

Quelle: Eigene Erhebung

Tabelle A-1: Entwicklung des Pferdebestandes in Deutschland

k.A. = keine Angaben

Jahr	Anzahl Pferde	davon Kaltblut	Anmerkungen	Quelle
1873	3,4 Mio.	k.A.		HANGEN (1989)
1882	3.522.316	k.A.	2.801.742 Pferde in der Landwirtschaft	LAVALARD (1894)
1913	4.558.000	k.A.		BASCHE (o.J.)
1914	4,4 Mio.	k.A.		HANGEN (1989)
1918	3,3 Mio.	k.A.		HANGEN (1989)
1935	3.390.000	k.A.		BASCHE (o.J.)
1938	3.442.741	2.075.000 (=60,3 %)		MEYER (1940)
1950	> 1,5 Mio.	> 100.000		HARING (2000)
1954	1.171.000	k.A.		BASCHE (o.J.)
1963	491.000	k.A.		BASCHE (o.J.)
1967	283.200	k.A.		BASCHE (o.J.)
1968	263.600	k.A.		BASCHE (o.J.)
1969	254.000	k.A.		BASCHE (o.J.)
1970	252.500	k.A.		BASCHE (o.J.)
1971	265.300	k.A.		BASCHE (o.J.)
1977	371.172	k.A.		BASCHE (o.J.)
2003	168.865	6.684 (= 3,9 %)	nur eingetragene Zuchtpferde + Fohlen	FN & DOKR (2004)
2010	165.644	6.910 (= 4,2 %)	nur eingetragene Zuchtpferde + Fohlen	FN & DOKR (2011)
2012	151.424	6.902 (= 4,6 %)	nur eingetragene Zuchtpferde + Fohlen	FN & DOKR (2013)

Tabelle A-2: Endgültige statistische Modelle zur Beschreibung der Ergebnisse der untersuchten Parameter, getrennt für die beiden Versuchsjahre

- μ = Gesamtmittel
vari = fixer Effekt der *i*-ten Variante; *i*: 1-9
*(durch*block)_{jk}* = fixer Effekt der Interaktion aus *j*-tem Durchgang und *k*-tem Block; *j*: 1-2; *k*: 1-4
 β^* *kovar_{ijk}* = fixer Effekt der in Tabelle 3-13 aufgeführten Kovariablen; *i*: 1-9, *j*: 1-2, *k*: 1-4
*(durch*var)_{ij}* = zufälliger Effekt der Interaktion aus *j*-tem Durchgang und *i*-ter Variante; *i*: 1-9, *j*: 1-2
*(block*var)_{ik}* = zufälliger Effekt der Interaktion aus *k*-tem Block und *i*-ter Variante; *i*: 1-9, *k*: 1-4
 e_{ijk} = Restfehler; $e_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$; *i*: 1-9, *j*: 1-2, *k*: 1-4

Parameter	Jahr	Modell
Ø Zugkraftbedarf (kg)	2000	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{block*var})_{ik} + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$
Ø Zugkraft (N)	2000	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{block*var})_{ik} + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$

9. Anhang

max. Zugkraftbedarf (kg)	2000	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
max. Zugkraftbedarf (N)	2000	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
Arbeitsgeschwindigkeit (km * h ⁻¹)	2000	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$
geleistete PS	2000	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
benötigte Arbeitszeit (sec.)	2000	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$
Flächenleistung (ha * h ⁻¹)	2000	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$
tatsächliche Arbeitsbreite (cm)	2000	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
relative Arbeitsbreite (%)	2000	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*block})_{jk} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
Schnitthöhe (cm)	2000	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + e_{ijk}$
	2001	nicht ermittelt
Anteil nicht gemähter Restfläche (%)	2000	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
Treibstoffverbrauch (l * Parz ⁻¹)	2000	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
Treibstoffverbrauch (l * ha ⁻¹)	2000	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
Anzahl Schritte pro Parzelle (n)	2000	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$
Anteil betretener und überrollter Parzellenfläche (%)	2000	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + e_{ijk}$
Anteil Lastfahrt an Gesamtarbeitszeit (%)	2000	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
Anteil Wendevorgänge an Gesamtarbeitszeit (%)	2000	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
Anteil Störungen an Gesamtarbeitszeit (%)	2000	$y_{ijk} = \mu + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
Ø Herzfrequenz Pferd A (min ⁻¹)	2000	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$
Ø Herzfrequenz Pferd B (min ⁻¹)	2000	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
max. Herzfrequenz Pferd A (min ⁻¹)	2000	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
max. Herzfrequenz Pferd B (min ⁻¹)	2000	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
Veränderung Atemfrequenz Pferd A (min ⁻¹)	2000	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
Veränderung Atemfrequenz Pferd B (min ⁻¹)	2000	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
	2000	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$

9. Anhang

Veränderung Körpertemperatur Pferd A (°C)	2001	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
Veränderung Körpertemperatur Pferd B (°C)	2000	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*var})_{ij} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
Veränderung Schwitzen Pferd A	2000	$y_{ijk} = \mu + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$
	2001	$y_{ijk} = \mu + (\text{durch*var})_{ij} + e_{ijk}$
Veränderung Schwitzen Pferd B	2000	keine Signifikanzen
	2001	$y_{ijk} = \mu + \text{var}_i + (\text{durch*block})_{jk} + (\text{block*var})_{ik} + e_{ijk}$

Tabelle A-3: Endgültige statistische Modelle zur Beschreibung der Ergebnisse der untersuchten Parameter über beide Versuchsjahre hinweg

- μ = Gesamtmittel
- var_i = fixer Effekt der *i*-ten Variante; *i*: 1-9
- $(\text{jahr*durch*block})_{jkl}$ = fixer Effekt der Interaktion aus *j*-tem Jahr, *k*-tem Durchgang und *l*-tem Block;
j: 1-2; *k*: 1-2; *l*: 1-4
- kovar_{ijkl} = fixer Effekt der in Tabelle 3-13 aufgeführten Kovariablen
- $(\text{jahr*var})_{ij}$ = zufälliger Effekt der Interaktion aus *j*-tem Jahr und *i*-ter Variante; *i*: 1-9, *j*: 1-2
- $(\text{jahr*durch*var})_{ijk}$ = zufälliger Effekt der Interaktion aus *j*-tem Jahr, *k*-tem Durchgang und *i*-ter Variante; *i*: 1-9, *j*: 1-2, *k*: 1-2
- $(\text{jahr*var*block})_{ijl}$ = zufälliger Effekt der Interaktion aus *j*-tem Jahr, *i*-ter Variante und *l*-tem Block;
i: 1-9, *j*: 1-2; *l*: 1-4
- e_{ijkl} = Restfehler; $e_{ijkl} \sim N(0, \sigma^2)$

Parameter	Modell über beide Versuchsjahre
Ø Zugkraftbedarf (kg)	$y_{ijkl} = \mu + \text{var}_i + (\text{jahr*durch*block})_{jkl} + (\text{jahr*var})_{ij} + (\text{jahr*var*block})_{iik} + e_{ijkl}$
Ø Zugkraft (N)	$y_{ijkl} = \mu + \text{var}_i + (\text{jahr*durch*block})_{jkl} + (\text{jahr*var})_{ij} + (\text{jahr*durch*var})_{ijk} + (\text{jahr*var*block})_{iik} + e_{ijkl}$
max. Zugkraftbedarf (kg)	$y_{ijkl} = \mu + \text{var}_i + (\text{jahr*durch*block})_{jkl} + (\text{jahr*durch*var})_{ijk} + (\text{jahr*var*block})_{ijl} + e_{ijkl}$
max. Zugkraftbedarf (N)	$y_{ijkl} = \mu + \text{var}_i + (\text{jahr*durch*block})_{jkl} + (\text{jahr*durch*var})_{ijk} + (\text{jahr*var*block})_{ijl} + e_{ijkl}$
Arbeitsgeschwindigkeit (km * h ⁻¹)	$y_{ijkl} = \mu + \text{var}_i + (\text{jahr*durch*block})_{jkl} + (\text{jahr*durch*var})_{ijk} + e_{ijkl}$
geleistete PS	$y_{ijkl} = \mu + (\text{jahr*durch*block})_{jkl} + (\text{jahr*var})_{ij} + (\text{jahr*durch*var})_{ijk} + (\text{jahr*var*block})_{iik} + e_{ijkl}$
benötigte Arbeitszeit (sec.)	$y_{ijkl} = \mu + \text{var}_i + (\text{jahr*durch*var})_{ijk} + (\text{jahr*var*block})_{ijl} + e_{ijkl}$
Flächenleistung (ha * h ⁻¹)	$y_{ijkl} = \mu + \text{var}_i + (\text{jahr*durch*var})_{ijk} + (\text{jahr*var*block})_{ijl} + e_{ijkl}$
tatsächliche Arbeitsbreite (cm)	$y_{ijkl} = \mu + \text{var}_i + (\text{jahr*durch*var})_{ijk} + e_{ijkl}$
relative Arbeitsbreite (%)	$y_{ijkl} = \mu + (\text{jahr*durch*var})_{ijk} + e_{ijkl}$
Schnitthöhe (cm)	nicht ermittelt
Anteil nicht gemähter Restfläche (%)	$y_{ijkl} = \mu + (\text{jahr*durch*var})_{ijk} + (\text{jahr*var*block})_{ijl} + e_{ijkl}$
Treibstoffverbrauch (l * Parz ⁻¹)	$y_{ijkl} = \mu + \text{var}_i + (\text{jahr*var})_{ij} + (\text{jahr*durch*var})_{ijk} + (\text{jahr*var*block})_{iik} + e_{ijkl}$
Treibstoffverbrauch (l * ha ⁻¹)	$y_{ijkl} = \mu + (\text{jahr*var})_{ij} + (\text{jahr*var*block})_{iik} + e_{ijkl}$

9. Anhang

Anzahl Schritte pro Parzelle (n)	$y_{ijkl} = \mu + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{block})_{jkl} + (\text{jahr} \cdot \text{var})_{ij} + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{var})_{ijk} + e_{ijkl}$
Anteil betretener und überrollter Parzellenfläche (%)	$y_{ijkl} = \mu + \text{var}_i + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{block})_{jkl} + (\text{jahr} \cdot \text{var})_{ij} + e_{ijkl}$
Anteil Lastfahrt an Gesamtarbeitszeit (%)	$y_{ijkl} = \mu + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{block})_{jkl} + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{var})_{ijk} + (\text{jahr} \cdot \text{var} \cdot \text{block})_{iik} + e_{ijkl}$
Anteil Wendevorgänge an Gesamtarbeitszeit (%)	$y_{ijkl} = \mu + \text{var}_i + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{block})_{jkl} + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{var})_{ijk} + e_{ijkl}$
Anteil Störungen an Gesamtarbeitszeit (%)	$y_{ijkl} = \mu + (\text{jahr} \cdot \text{var} \cdot \text{block})_{iik} + e_{ijkl}$
Ø Herzfrequenz Pferd A (min ⁻¹)	$y_{ijkl} = \mu + \text{var}_i + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{block})_{jkl} + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{var})_{ijk} + (\text{jahr} \cdot \text{var} \cdot \text{block})_{iik} + e_{ijkl}$
Ø Herzfrequenz Pferd B (min ⁻¹)	$y_{ijkl} = \mu + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{block})_{jkl} + (\text{jahr} \cdot \text{var})_{ij} + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{var})_{ijk} + e_{ijkl}$
max. Herzfrequenz Pferd A (min ⁻¹)	$y_{ijkl} = \mu + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{block})_{jkl} + (\text{jahr} \cdot \text{var})_{ij} + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{var})_{ijk} + e_{ijkl}$
max. Herzfrequenz Pferd B (min ⁻¹)	$y_{ijkl} = \mu + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{block})_{jkl} + (\text{jahr} \cdot \text{var})_{ij} + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{var})_{ijk} + e_{ijkl}$
Veränderung Atemfrequenz Pferd A (min ⁻¹)	$y_{ijkl} = \mu + \text{var}_i + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{block})_{jkl} + (\text{jahr} \cdot \text{var} \cdot \text{block})_{iik} + e_{ijkl}$
Veränderung Atemfrequenz Pferd B (min ⁻¹)	$y_{ijkl} = \mu + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{block})_{jkl} + (\text{jahr} \cdot \text{var})_{ij} + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{var})_{ijk} + (\text{jahr} \cdot \text{var} \cdot \text{block})_{iik} + e_{ijkl}$
Veränderung Körpertemperatur Pferd A (°C)	$y_{ijkl} = \mu + \text{var}_i + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{block})_{jkl} + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{var})_{ijk} + e_{ijkl}$
Veränderung Körpertemperatur Pferd B (°C)	$y_{ijkl} = \mu + \text{var}_i + (\text{jahr} \cdot \text{var} \cdot \text{block})_{iik} + e_{ijkl}$
Veränderung Schwitzen Pferd A	keine Signifikanzen
Veränderung Schwitzen Pferd B	$y_{ijkl} = \mu + (\text{jahr} \cdot \text{durch} \cdot \text{block})_{jkl} + e_{ijkl}$

Tabelle A-4: Werte für die mittlere Steigung, Versuchsfläche „Obere Kiebitzbreite 2“

Fläche	Block	Parzelle	Variante	Mittlere Steigung (%) Parzelle	Mittlere Steigung (%) Mittelwert Variante
Kiebitzbreite	1	1	1	2,37	3,74
	2	14		4,87	
	3	22		4,16	
	4	28		3,54	
	1	8	2	3,09	3,67
	2	9		3,28	
	3	18		4,52	
	4	26		3,80	
	1	2	4	2,36	3,47
	2	10		3,85	
	3	17		4,46	
	4	31		3,22	
	1	3	5	2,39	3,60
	2	13		4,66	
	3	24		3,51	
	4	25		3,85	
	1	4	6	2,36	3,34
	2	11		3,85	
	3	21		4,16	
	4	29		2,99	
	1	7	7	3,31	3,68
	2	12		4,05	
	3	20		3,78	
	4	27		3,56	
	1	5	8	2,55	3,60
	2	15		4,36	
	3	19		4,28	
	4	30		3,22	
	1	6	9	2,72	3,33
	2	16		4,34	
	3	23		3,66	
	4	32		2,61	
Gesamtmittelwert:					3,55
Minimum					2,36
Maximum					4,87

Quelle: Eigene Erhebung

Tabelle A-5: Werte für die mittlere Steigung, Versuchsfläche „Auf dem Brand“

Fläche	Block	Parzelle	Variante	Mittlere Steigung (%) Parzelle	Mittlere Steigung (%) Mittelwert Variante
Brand	1	1	2	-0,57	
	2	9		-0,90	
	3	15		0,63	
	4	17		1,36	0,13
	1	2	3	-1,12	
	2	8		-0,89	
	3	11		-0,20	
	4	19		2,67	0,12
	1	3	6	-1,04	
	2	6		-1,35	
	3	14		0,30	
	4	20		2,89	0,20
	1	4	7	-0,89	
	2	10		-0,22	
	3	12		-0,13	
	4	18		1,66	0,11
	1	5	8	-0,83	
	2	7		-0,78	
	3	13		0,16	
	4	16		1,11	-0,09
Gesamtmittelwert:					0,09
				Minimum	-1,35
				Maximum	2,89

Quelle: Eigene Erhebung

Tabelle A-6: Ergebnisse der 50 m-Rasterkartierung Boden, Obere Kiebitzbreite 2

Bodentyp: BB = Braunerde, LL = Parabraunerde, SS = Pseudogley, YK = Kolluvisol;

Bodenart: Ut = toniger Schluff

Block	Profil Nr.	Bodentyp	Bodenart	Ap-Horizont Tiefe bis cm	pH- Wert	mg/100 g Boden			C %	N %	C/N-Ver- hältnis
						P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg			
1	646	BB	Ut4	35	7,0	12	22	14	0,9	0,11	7,6
	647	LL	Ut4	32	6,7	8	16	16	1,0	0,12	8,3
	648	SS-LL	Ut4	35	6,9	7	19	21	1,1	0,13	8,1
	664	LL	Ut4	30	7,2	10	25	14	1,2	0,14	8,6
	665	LL	Ut4	30	7,2	9	21	13	1,0	0,12	8,5
	681	SS-LL	Ut4	30	7,3	14	26	14	1,2	0,14	8,4
	682	LL	Ut4	35	7,3	14	28	15	1,2	0,14	8,4
	2	649	LL	Ut4	32	6,8	8	17	16	1,0	0,13
650		YK	Ut4	35	7,1	7	11	11	1,0	0,12	8,2
666		LL	Ut4	35	7,3	12	25	13	1,1	0,14	8,4
667		YK	Ut4	35	7,0	12	22	14	1,1	0,13	8,6
668		YK	Ut3	35	7,1	9	15	12	1,2	0,14	8,5
683		YK	Ut4	35	7,4	15	22	14	1,2	0,13	8,9
684		YK	Ut4	35	7,3	16	19	13	1,3	0,14	9,2
3		651	YK	Ut3	35	7,1	9	15	8	1,1	0,13
	652	YK	Ut3	35	7,1	13	21	8	1,2	0,14	8,7
	669	YK	Ut3	35	7,1	11	17	9	1,2	0,14	8,6
	670	YK	Ut3	35	7,0	10	17	10	1,1	0,13	8,6
	685	YK	Ut3	35	7,3	16	17	13	1,2	0,13	8,8
	686	YK	Ut3	35	7,2	15	18	12	1,1	0,12	9,2
	687	YK	Ut4	35	7,0	17	17	13	1,1	0,13	8,5
	4	653	YK	Ut4	35	7,0	14	16	8	1,1	0,14
654		YK	Ut3	35	7,0	18	19	8	1,2	0,14	8,7
655		YK	Ut3	35	6,9	13	22	7	1,1	0,13	8,5
671		YK	Ut3	35	7,3	14	17	11	1,1	0,13	8,5
672		YK	Ut3	35	7,1	11	20	8	1,2	0,13	9,0
688		YK	Ut3	35	7,1	12	16	10	1,2	0,13	9,2
689		YK	Ut3	35	7,3	18	19	9	1,3	0,13	9,8

Quelle: Dr. Michael Brandt, Fachgebiet Bodenkunde der Universität Kassel, Witzenhausen

Tabelle A-7: Ergebnisse der 50 m-Rasterkartierung Boden, Auf dem Brand

Bodentyp: BB = Braunerde, DD = Pelosol, LL = Parabraunerde, YK = Kolluvisol;

Bodenart: Ut = toniger Schluff, Tu = schluffiger Ton

Block	Profil Nr.	Bodentyp	Bodenart	Ap-Horizont Tiefe bis cm	pH-Wert	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	C	N	C/N-Verhältnis
1	1195	BB	Ut4	31	7,2	16	22	13	1,4	0,15	9,1
	1206	LL	Ut4	35	6,9	20	22	12	1,3	0,14	9,1
	1207	LL	Ut4	32	7,0	21	26	17	1,3	0,15	8,8
	1216	LL	Tu4	30	6,9	25	21	13	1,6	0,16	9,8
2	1194	DD	Ut4	28	7,1	17	24	13	1,2	0,14	8,6
	1205	BB	Ut4	35	7,0	18	21	13	1,2	0,13	8,8
	1214	YK	Tu4	30	6,7	20	27	16	1,3	0,15	8,4
	1215	BB	Tu4	31	6,9	24	24	14	1,2	0,14	8,7
	1223	BB	Ut4	34	7,2	18	22	16	1,4	0,17	8,5
3	1204	BB	Ut4	28	7,0	19	26	14	1,1	0,13	8,3
	1213	BB	Tu4	34	7,0	14	27	16	1,3	0,16	8,6
	1222	YK	Ut4	35	7,0	14	22	11	1,4	0,16	8,5
4	1202	YK	Ut4	34	7,1	15	22	14	1,4	0,16	8,9
	1203	YK	Ut4	30	7,1	15	28	15	1,1	0,13	8,6
	1212	DD	Tu3	30	7,0	12	19	17	1,2	0,15	8,4
	1221	LL	Ut4	35	6,8	19	22	11	1,4	0,15	8,8

Quelle: Dr. Michael Brandt, Fachgebiet Bodenkunde der Universität Kassel, Witzenhausen

Tabelle A-8: Witterung zum Versuchszeitpunkt

Jahr	Versuchsdurchgang	Versuchstag	Lufttemperatur, Ø aus Logger 1 und 2 (°C)				Luftfeuchte, Ø aus Logger 1 und 2 (% rel. F)			
			Minimum	Maximum	Mittelwert	Diff. Max - Min.	Minimum	Maximum	Mittelwert	Diff. Max - Min.
2000	1	01.08.2000
		02.08.2000	18,82	23,23	21,30	4,41	57,81	88,66	73,16	30,85
		03.08.2000	16,07	24,85	20,84	8,78	40,61	76,04	57,91	35,43
	2	18.09.2000	14,53	16,16	15,19	1,63	84,97	90,94	88,22	5,97
		27.09.2000	13,74	14,36	14,05	0,62	94,56	99,91	97,23	5,35
		28.09.2000	16,69	20,42	18,51	3,74	73,55	94,84	83,63	21,29
		29.09.2000	18,51	24,62	22,58	6,11	48,35	79,34	61,30	31,00
		2001	3	20.06.2001	14,82	21,32	19,26	6,51	48,57	71,95
21.06.2001	18,06			22,59	20,27	4,54	49,11	68,11	56,96	19,01
4	31.07.2001		25,12	30,70	28,42	5,58	39,78	64,67	50,96	24,89
	01.08.2001		19,73	24,59	22,62	4,86	39,03	59,63	46,41	20,60

Quelle: Eigene Erhebung

Tabelle A-9: Hufflächen der im Versuch eingesetzten Pferde (cm²)

	Alphonse	Piroux	Dragonne	Charlotte	Alphonse	Piroux
	2000	2000	2000	2000	2001	2001
Huffläche gesamt	1.250,82	1.222,65	1.132,38	1.098,81	1.197,81	1.197,99
vorne links	319,05	326,70	298,26	293,76	322,38	314,73
vorne rechts	325,98	322,29	295,11	288,99	319,77	319,32
hinten links	289,44	283,77	269,55	252,00	283,59	282,15
hinten rechts	316,35	289,89	269,46	264,06	272,07	281,79
Ø pro Huf vorne	322,52	324,50	296,69	291,38	321,08	317,03
Ø pro Huf hinten	302,90	286,83	269,51	258,03	277,83	281,97
Ø pro Huf gesamt	312,71	305,67	283,10	274,71	299,46	299,50
Ø pro Huf alle Pferde	294,04			299,48		

Quelle: Eigene Erhebung

10. Danksagung

Für das Gelingen der vorliegenden Arbeit sind außer mir viele weitere Zwei- und Vierbeiner in der ein oder anderen Art mit verantwortlich. Sie zu erwähnen, ist mir eine mehr als angenehme Pflicht. Ich bin sicher, dass ich einige von ihnen zu erwähnen vergessen habe. Dafür bitte ich Euch um Verzeihung, es ist sicher keine Absicht!

Herrn **Prof. Dr. Jürgen Heß** danke ich sehr dafür, dass er den Mut hatte, mich an diesem unkonventionellen Thema arbeiten zu lassen. Auch wenn dieses Forschungsvorhaben anders verlaufen ist und „ein wenig“ länger gedauert hat als ursprünglich geplant war, hoffe ich, dass er diesen Mut nicht bereut.

Prof. Prof. h.c. mult. Dr. Dr. h.c. mult. Rainer Horn hat mir die große Ehre erwiesen, als Drittgutachter tätig zu werden und hat dieser Arbeit wichtige Impulse gegeben. Ich danke ihm überdies für ein stets offenes Ohr und manches gute Wort der Ermutigung!

Prof. Dr. Uta König von Borstel danke ich herzlich für ihre Bereitschaft zur Mitwirkung in der Promotionskommission und ihr freundliches Interesse an dem auch für sie neuen Pferdethema, das sie mir entgegengebracht hat.

Allen **Kolleginnen und Kollegen des Fachgebietes Ökologischer Land- und Pflanzenbau** und der **Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen** danke ich für die Zusammenarbeit und die Unterstützung. Einschließen möchte ich an dieser Stelle **Christian Schellert** vom Fachgebiet Agrartechnik sowie die zahlreichen Helferinnen und Helfer, die die Datenaufnahme unterstützt haben: **Sabrina Scheffold, Kathrin Schabram, Dirk Drewes, Johannes Bäumle, Doreen Scholz, Uschi Röder, Johannes Rother** und viele andere.

Dieter Türk war mir in meiner Frankenhäuser Zeit nicht nur ein unersetzlicher Kollege bei der Betreuung der beiden Pferde, sondern er ist mir zu einem lieben Freund geworden, von dem ich viel - nicht nur über Pferde - gelernt habe. Dafür danke ich Dir sehr, Dieter!

Mein Dank geht an **Dr. Michael Quintern** (geb. Brandt), der mir die bodenkundlichen Daten zugänglich gemacht hat. **Dipl.-Ing. Cindy Baiertl** und **Dr. Thomas Fricke** danke ich sehr herzlich für die Unterstützung bei allem, was irgendwie mit GPS und GIS zu tun hat. Ohne Euch wäre ich ganz schön aufgeschmissen gewesen! Für zahlreiche Hinweise und gute Gespräche über die physiologischen Aspekte bei Pferden danke ich Frau **Prof. Dr. Korinna Huber** und Herrn **Prof. Dr. em. Wilfried Meyer** von der Tierärztlichen Hochschule Hannover.

Prof. Dr. Hans-Peter Piepho danke ich sehr herzlich für seine Geduld, Langmut und Zeit, die mir die statistische Auswertung meiner Ergebnisse letztlich möglich gemacht haben. **Dr. R. Anne Pearson** danke ich herzlich für einen intensiven fachlichen Austausch, u.a. über alles, was mit dem Energiebedarf von Zugtieren zu tun hat.

Wesentlichen Einfluss auf die vorliegende Arbeit wie auch auf meinen persönlichen Werdegang hinsichtlich allem, was mit Arbeitspferden zu tun hat, hat der Mann gehabt, dessen Name wohl wie kein Zweiter stellvertretend für den modernen Arbeitspferdeeinsatz in Europa steht: **Charlie Pinney**. Von ihm stammten nicht nur die beiden Pferde **Alphonse** und **Piroux** sowie der untersuchte Vorderwagen, er stand auch stets mit Rat und Tat zur Verfügung und wurde mir ein lieber Freund. Ich habe von seinem Wissen und Verständnis in Bezug auf Arbeitspferde unendlich viel gelernt. Es war Charlie leider nicht vergönnt, die Fertigstellung dieser Arbeit zu erleben. Er verstarb viel zu früh, nach kurzer schwerer Krankheit, im September 2007. Mit ihm hat die Arbeitspferde-Welt nicht nur einen großen Menschen, sondern eine Persönlichkeit verloren, ohne die die Entwicklung anders und vermutlich sehr viel langsamer verlaufen wäre, ja vielleicht nie so in Gang gekommen wäre.

Ein herzliches „Dankeschön“ auch an **Jakob Latz** sowie die **Familie Renders**, hier vor allem **Hans Renders**, die mir die ersten Erfahrungen im Fahren und Arbeiten mit Pferden vermittelt haben. Hans Renders ist zu

einem guten Freund und Lehrmeister geworden, der die vorliegende Arbeit in vielfältiger Weise unterstützt hat.

Ein besonderer Dank gilt der Firma *Mörtl* in Pöttmes, vertreten durch die **Herren Walther** und **Kastner**, die die untersuchten Doppelmessermähwerke und das Scheibenmähwerk kostenlos zur Verfügung stellten. Ohne diese Unterstützung wären die Untersuchungen nicht durchführbar gewesen, da alle gestellten Forschungsanträge mit dem Argument abgewiesen wurden, das Thema passe zur Zeit nicht in die Forschungslandschaft, und somit keine finanziellen Mittel zur Anschaffung der untersuchten Geräte vorhanden waren. Sie haben lange auf die Früchte ihrer Großzügigkeit warten müssen. Hier sind sie nun, und ich hoffe, sie sind vom Ergebnis nicht enttäuscht.

Mein besonderer Dank gilt auch **Nicolas Hamen** und **Arman Nesper**, beide aus Drauffelt (Luxemburg), die im September 2000 spontan mit den Ardenner-Stuten *Charlotte* und *Dragonne* von Nicolas Hamen anreisen und die Fortführung der Versuche nach Erkrankung eines unserer Pferde ermöglichten.

Darüber hinaus danke ich **Guido Weltin**, der den Mähversuch im Radolfzeller Aachried ermöglichte und hierfür seine Schwarzwälder Fuchse und Süddeutschen Kaltblüter zur Verfügung stellte, sowie **Erhard Schroll**, der mit seinen Rheinisch-Deutschen Kaltblütern Eddy, Rico und Asilva die Mähversuche in Lemgo möglich machte. Beide haben mich darüber hinaus in unzähligen Gesprächen viel über Arbeitspferde gelehrt und sind mir zu lieben Freunden geworden.

Meinem langjährigen „Chef“, dem ehemaligen Vorsitzenden der Interessengemeinschaft Zugpferde e.V. und Vizepräsidenten der Europäischen Dachorganisation der Zugpferdevereinigungen FECTU a.s.b.l., **Dr. Reinhard Scharnhölz**, danke ich sehr herzlich für ein allzeit offenes Ohr und seine vielfältige Unterstützung, seine unermüdliche Bereitschaft zum Korrekturlesen, viele fachliche und stilistische Hinweise sowie vor allem für seine aufrichtige Freundschaft. Dem Präsidenten der FECTU a.s.b.l., **Dr. Pit Schlechter** (Luxemburg), **Paul Schmit** (Luxemburg) und **Emanuel de Meulenaer** (Belgien) danke ich sehr für viele fachliche Gespräche, moralische und sonstige Unterstützung, viele Hinweise auf für meine Arbeit wertvolle Arbeitspferde-Literatur und vor allem für Ihre Freundschaft.

Ein großer Dank geht an die Pferde **Alphonse, Piroux, Charlotte, Dragoonne, Delia, Doro, Max, Dolex, Eddy, Rico** und **Asilva**! Sie sind die „Hauptdarsteller“ dieser Arbeit, die ohne ihre geduldige und zuverlässige Mitarbeit nicht hätte durchgeführt werden können. Darüber hinaus waren sie – und hier vor allem **Alphonse** und **Piroux**, mit denen ich selber 3 Jahre in Frankenhausen arbeiten durfte – in mancherlei Hinsicht meine Lehrmeister, von denen ich viel gelernt habe. **Alphonse** und **Piroux** haben mich die Welt der Arbeitspferde erfahren lassen und mir klar gemacht, dass diese Welt auch die meinige ist. Mögen die Ergebnisse unserer gemeinsamen Arbeit ein Stück dazu beitragen, dass den Arbeitspferden endlich wieder der Stellenwert zugestanden wird, der ihnen gebührt – nicht nur in der Landwirtschaft!

Bleiben noch die, bei denen eine passende Formulierung am schwersten zu finden ist. Ohne die grenzenlose Liebe, Unterstützung und Geduld meiner Frau, unserer beiden Kinder, meiner Eltern und meiner Schwiegereltern hätte ich diese Arbeit nicht zu Ende führen können, denn sie waren nicht nur, aber vor allem dann für mich da, wenn mal wieder alle Kraft aufgebraucht und kein Land mehr in Sicht war. Den Dank dafür kann man nicht in Worte fassen, es wäre immer zu wenig! Ich hoffe, Ihr seid Euch dieses Dankes dennoch bewusst, auch wenn ich Eure Geduld arg strapaziert habe und Du, Papa, die Fertigstellung dieser Arbeit leider nicht mehr erleben durftest.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig, ohne unerlaubte Hilfe Dritter angefertigt und andere als die in der Dissertation angegebenen Hilfsmittel nicht benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Schriften entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht. Dritte waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der Dissertation nicht beteiligt; insbesondere habe ich hierfür nicht die Hilfe eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Kein Teil dieser Arbeit ist in einem anderen Promotions- oder Habilitationsverfahren verwendet worden.

Großarlach, 12.04.2017

(Peter Herold)