Das Vegetationsmanagement auf Gleisanlagen stellt eine herausfordernde, interdisziplinäre Aufgabe dar, die dazu beiträgt, die Sicherheit des Gleises sowie des fahrenden Verkehrs zu gewährleisten. In der EU wird die Unkrautbekämpfung im Schotterbett bisher hauptsächlich durch das Spritzen von Chemikalien durchgeführt. Allerdings wächst die Nachfrage nach einem nichtchemischen Vegetationsmanagement aufgrund der gesetzlichen Einschränkungen zur Anwendung von Herbiziden sowie des gesellschaftlichen Drucks zum Schutz von Gesundheit und Umwelt.

Als Beitrag zur Entwicklung herbizidfreier Alternativen zum Vegetationsmanagement auf Gleisanlagen wurde in dieser Arbeit das Verfahren des maschinellen Jätens mit rotierenden Rollen für den Gleiskörper entwickelt und erprobt. Dabei wurde ein Versuchsträger für die Behandlung der Hälfte der Gleisbreite gebaut, mit dem das Verfahren gegen eine Kontrollfläche oder sich selbst unter verschiedenen Arbeitsparametern verglichen wurde. Der Systemaufbau umfasst eine innovative Geometrie der Rollen. Es handelt sich um Zahnräder aus Kunststoff, die durch ihren Formschluss das Unkraut klemmen und das Ausreißen unterstützen.

Die Ergebnisse weisen auf einen möglichen Einsatz des entwickelten Jätsystems im Schotterkörper hin. Das System ist dazu fähig, die Pflanzenhöhe bei geringem Energiebedarf zu kontrollieren und eine homogene Wirkung bis zu Fahrgeschwindigkeiten von 5 km/h zu erzielen. In den Versuchen wurden manche Gräser und verholzte Pflanzen sogar vollständig ausgerissen, wobei nur geringe Verschiebungen der oberen Schotterschicht (max. 100 mm tief) an den betreffenden Stellen beobachtet wurden. Es bestanden keine Gefahren für Mitarbeitende durch Schotterflug, da dieser, wenn vorhanden, durch den Mechanismus selbst abgeschirmt wurde.

Zwei bis drei Behandlungen pro Jahr waren effektiv, um die Pflanzenhöhe unter 0,3 m zu halten, was dem Abstand vom Schotter zur Fahrzeugbegrenzungslinie entspricht. Die Relevanz der Behandlung wird vor allem bei verholzten Pflanzen offensichtlich, deren Höhe in der Kontrollfläche ca. 3 m betrug, während die behandelten Pflanzen eine maximale Höhe von 370 mm erreichten.

ISBN 978-3-98555-354-9

BAND 10

Entwicklung eines Verfahrens zum maschinellen Jäten für das Vegetationsmanagement auf Gleisanlagen

Carolina Archut

Schriftenreihe Schienenfahrzeuge

Hrsg.: Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Schindler

Carolina Archut

Entwicklung eines Verfahrens zum maschinellen Jäten für das Vegetationsmanagement auf Gleisanlagen

Edition Wissenschaft Apprimus

Entwicklung eines Verfahrens zum maschinellen Jäten für das Vegetationsmanagement auf Gleisanlagen

Development of a Mechanical Uprooting Method for Weed Management in Railway Tracks

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades einer
Doktorin der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Carolina Archut,
geb. Rios Serrano

Berichter/in:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler
Prof. Dr.-Ing. Beate Bender

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Februar 2026

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Schriftenreihe Schienenfahrzeuge

Carolina Archut

Entwicklung eines Verfahrens zum maschinellen Jäten für das Vegetationsmanagement auf Gleisanlagen

Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Schindler

Band 10



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über https://portal.dnb.de abrufbar.

Carolina Archut:

Entwicklung eines Verfahrens zum maschinellen Jäten für das Vegetationsmanagement auf Gleisanlagen

1. Auflage, 2026

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Copyright Apprimus Verlag, Aachen, 2026
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen, Deutschland
Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany

ISBN 978-3-98555-354-9

Vorwort

Diese Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Schienenfahrzeuge (IFS) der RWTH Aachen. Hiermit danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler für die Möglichkeit zu promovieren sowie für seine Unterstützung und das in mich gesetzte Vertrauen als Leiterin des Projekts „Entwicklung eines Alternativverfahrens zur chemischen Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen", aus dem Teile dieser Dissertation entstanden sind.

Ebenfalls danke ich Frau Prof. Dr.-Ing. Beate Bender von der TU Berlin für die Übernahme des Zweitgutachtens, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Burkhard Corves für den Vorsitz und Herrn Univ.-Prof. Dr. Raphael Pfaff für den Beisitz meiner Doktorprüfung.

Außerdem danke ich dem Deutschen Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF) beim Eisenbahn-Bundesamt (EBA) und dem Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) für die Ausschreibung und Förderung des genannten Projektes. Selbstverständlich gilt ein Dankeschön der Rurtalbahn GmbH, der Museumsbahn Miljoenenlijn der Stiftung Zuid-Limburgse Stoomtrein Maatschappij (ZLSM), der RWE AG und dem Kleinbahnmuseum Selfkantbahn der Touristenbahnen im Rheinland GmbH für die Bereitstellung der Teststrecken.

Ein herzlicher Dank gilt dem Projektteam für die gute Zusammenarbeit und für das große Engagement bei der Durchführung der Versuche im Rahmen meiner Dissertation: Nils Jaeger, Aileen Schulte-Marxloh, Anton Soemantri und Maximilian Skiba. Ein großes Lob gebührt den Werkstattmitarbeitern, Dirk Hoß und Jesse Latour, für ihr engagiertes Mitdenken, vor allem bei der Fertigung von Sonderteilen. Außerdem bedanke ich mich beim Eisenbahnbetriebsleiter des IFS, Anselm Daniel, für die Durchführung des Zulassungsprozesses und für seinen besonderen Einsatz trotz seiner vielfältigen Aufgaben am IFS. Ich danke ebenfalls den weiteren Festangestellten am IFS, die im Projekt und somit indirekt an meiner Dissertation mitgewirkt haben. Danke für Eure tolle Arbeit: Anna-Kaisa Jennes, Claudia Neubauer, Luca Iacono, Martin Vermeeren und Thomas Holeczek.

Ein weiterer Dank gilt allen, die meine Dissertation teils oder ganz gegengelesen haben. Danke für Euer wertvolles Feedback: Jan-Lukas Archut, Henrik Brändle, Maximilian Skiba, Anh Hoang, Nils Jaeger und Aileen Schulte-Marxloh. Außerdem danke ich allen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des IFS für die schöne Zeit am Institut. Insbesondere danke ich jenen, die mir geholfen haben,

die Dissertation mit Disziplin und Routine, aber auch mit Spaß fertigzustellen: Chinnawit Glunrawd, Nutchanon Prasomsuk, Martin Rakowitsch, Axel von Stillfried, Sebastian Winkelheide, Simon Klamt, Katrin Ostendorf, Anh Hoang und Prasaenna Ranganathan.

Vielen Dank auch an meine Familie und an meine Freunde und Freundinnen für die Ermutigung auf dieser langen Reise weit weg von der Heimat. Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht haben, und meinen Schwiegereltern, die mir in Deutschland ein Zuhause bieten.

Ein liebes Dankeschön gilt meinem Ehemann, Jan-Lukas Archut, für die Unterstützung und Ermutigung bei der Vorbereitung meiner Dissertation und der Doktorprüfung sowie für seine Exzellenz und Leidenschaft für die wissenschaftliche Arbeit, die mich inspiriert und mir ein Vorbild ist.

Abschließend danke ich Gott, Der mir einen Weg aufbaut und mir hilft, meine Ziele erfolgreich zu erreichen. Ich danke Ihm für Seine Treue und Kraft entlang meiner Karriere und meines gesamten Lebens.

Aachen, im Juni 2026 Carolina Archut

Kurzfassung

Das Vegetationsmanagement auf Gleisanlagen stellt eine herausfordernde, interdisziplinäre Aufgabe dar, die dazu beiträgt, die Sicherheit des Gleises sowie des fahrenden Verkehrs zu gewährleisten. In der EU wird die Unkrautbekämpfung im Schotterbett bisher hauptsächlich durch das Spritzen von Chemikalien durchgeführt. Allerdings wächst die Nachfrage nach einem nichtchemischen Vegetationsmanagement aufgrund der gesetzlichen Einschränkungen zur Anwendung von Herbiziden sowie des gesellschaftlichen Drucks zum Schutz von Gesundheit und Umwelt.

Als Beitrag zur Entwicklung herbizidfreier Alternativen zum Vegetationsmanagement auf Gleisanlagen wurde in dieser Arbeit das Verfahren des maschinellen Jätens mit rotierenden Rollen für den Gleiskörper entwickelt und erprobt. Dabei wurde ein Versuchsträger für die Behandlung der Hälfte der Gleisbreite gebaut, mit dem das Verfahren gegen eine Kontrollfläche oder sich selbst unter verschiedenen Arbeitsparametern verglichen wurde. Der Systemaufbau umfasst eine innovative Geometrie der Rollen. Es handelt sich um Zahnräder aus Kunststoff, die durch ihren Formschluss das Unkraut klemmen und das Ausreißen unterstützen.

Die Ergebnisse weisen auf einen möglichen Einsatz des entwickelten Jätsystems im Schotterkörper hin. Das System ist dazu fähig, die Pflanzenhöhe bei geringem Energiebedarf zu kontrollieren und eine homogene Wirkung bis zu Fahrgeschwindigkeiten von 5 km/h zu erzielen. In den Versuchen wurden manche Gräser und verholzte Pflanzen sogar vollständig ausgerissen, wobei nur geringe Verschiebungen der oberen Schotterschicht (max. 100 mm tief) an den betreffenden Stellen beobachtet wurden. Es bestanden keine Gefahren für Mitarbeitende durch Schotterflug, da dieser, wenn vorhanden, durch den Mechanismus selbst abgeschirmt wurde.

Zwei bis drei Behandlungen pro Jahr waren effektiv, um die Pflanzenhöhe unter 0,3 m zu halten, was dem Abstand vom Schotter zur Fahrzeugbegrenzungslinie entspricht. Die Relevanz der Behandlung wird vor allem bei verholzten Pflanzen offensichtlich, deren Höhe in der Kontrollfläche ca. 3 m betrug, während die behandelten Pflanzen eine maximale Höhe von 370 mm erreichten.

Abstract

Weed management on railway tracks is a challenging interdisciplinary task that aids to ensure the safety of both the track and rail traffic. In the EU, weed control on the ballast bed has so far mainly been carried out by spraying chemicals. However, the demand for non-chemical vegetation management is increasing due to legal restrictions on the use of herbicides and social pressure to protect health and the environment.

As a contribution to the development of herbicide-free alternatives to vegetation management on railway tracks, this work developed and tested the method of mechanical weed pulling for the ballast bed with rotating rollers. A test vehicle was built for the treatment of half the track width, that allowed the method to be compared against a control area or itself under different working parameters. The system design includes an innovative geometry of the rollers. These are plastic gears that clamp the weeds through form fit and support the pulling process.

The results indicate a possible use of the developed weeding system in the ballast body. The system controlled the plant height with low energy requirements and achieved a homogeneous effect up to working speeds of 5 km/h. In the experiments, some grasses and woody plants were even completely uprooted, whereby only slight displacements of the upper ballast layer (max. 100 mm deep) were observed at the relevant points. There was no danger to employees from flying ballast, if present, as this was shielded by the mechanism itself.

Two to three treatments per year were effective to keep the plant height below 0.3 m, which corresponds to the distance from the ballast to the vehicle clearance. The relevance of the treatment is particularly evident in woody plants, whose plant height in the control area was about 3 m, while the treated plants reached a maximum height of 0.37 m.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **v**

Tabellenverzeichnis **xi**

Symbolverzeichnis **xiii**

Abkürzungsverzeichnis **xv**

1 Einleitung **1**

2 Stand der Technik **5**
2.1 Aktuelles Vegetationsmanagement im Gleisbereich und Bedarf an herbizidfreien Alternativen 5
2.2 Definition und Anwendung des Jätens 7
2.2.1 Punktuelle Apparate zum maschinellen Jäten 10
2.2.2 Flächendeckende Apparate zum maschinellen Jäten . . . 13
2.2.3 Mechanismen mit ähnlichem Wirkprinzip wie das Jäten . . 15
2.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Literaturrecherche 18
2.3 Rahmenbedingungen zur Entwicklung eines Systems zum Vegetationsmanagement auf Gleisanlagen 25
2.3.1 Beschreibung des Gleisbereiches 25
2.3.2 Unkraut verstehen 29

3 Zielsetzung und Methodik **33**
3.1 Aufgabenstellung und Vorgehen 33
3.2 Methodik der Arbeit - Grundlage des methodischen Konstruierens 37

4 Entwicklung des Systems zum maschinellen Jäten **39**
4.1 Funktionsweise des Jätsystems 39
4.2 Spezifizierung der Systemanforderungen 40
4.3 Konzeptionierung des Jätsystems 43
4.3.1 Funktionsstruktur des Jätsystems 43
4.3.2 Entwicklung und Bau eines Prüfstands zur Erprobung des maschinellen Jätens 45
4.3.3 Vorversuche im Labor 50
4.3.4 Vorversuche auf Gleisanlagen 54
4.3.5 Lösungssuche zur Erfüllung der Teilfunktionen des Jätsystems 61

4.3.6 Morphologischer Kasten und Gesamtkonzept des maschinellen Jätens 68

5 Erprobung des Jätsystems im Gleisbereich 71
5.1 Vorstellung des Versuchsträgers 71
5.2 Versuchsvorbereitung 75
5.2.1 Zielsetzung der Versuche 75
5.2.2 Eigenschaften der Versuchsstrecken 76
5.2.3 Aufteilung und Dokumentation der Versuchsabschnitte . . 80
5.2.4 Bewertungsstufen der Wirksamkeit 81
5.2.5 Versuchsparameter des maschinellen Jätens 82
5.3 Ergebnisse und Diskussion der Versuche 83
5.3.1 Wirkung des maschinellen Jätens 83
5.3.2 Ermittlung des direkten Energiebedarfs des Systems . . . 91
5.3.3 Weitere bewertete Aspekte zum Einsatz des Verfahrens . 93

6 Ermittlung der langfristigen Wirksamkeit des entwickelten Verfahrens 97
6.1 Zielsetzung und Vorgehen der Untersuchung 97
6.1.1 Beschreibung der Versuchsstrecken 99
6.1.2 Behandelte Pflanzenarten und ihr Standort 101
6.2 Ergebnisse der Untersuchung 102
6.2.1 Auswertung der angewendeten Verfahren 102
6.2.2 Auswertung nach Pflanzenarten 108

7 Zusammenfassung und Ausblick 115
7.1 Ergebnisse der Arbeit 115
7.2 Zukünftiger Forschungsbedarf 118

Literaturverzeichnis 121

A Vollständige Anforderungsliste zur Entwicklung des Jätsystems 135

B Daten zur Untersuchung der langfristigen Wirksamkeit 149
B.1 Versuchsflächen und -Pflanzen zur Ermittlung der langfristigen Wirksamkeit der Verfahren im Gleisbereich 149
B.2 Graphische Darstellung der Wirksamkeit der Verfahren 154
B.2.1 Abbildung der Pflanzenhöhe unter Wirkung der Verfahren 154
B.2.2 Abbildung des entnommenen Pflanzengewichts unter Wirkung der Verfahren 157
B.3 Graphische Darstellung der Wachstumsentwicklung der Einzelpflanzenarten 163
B.3.1 Abbildung der Wuchshöhe der Einzelpflanzenarten 163

B.3.2 Abbildung der Gewichtsentnahme der Einzelpflanzenarten 173

C Eigene Veröffentlichungen **179**

D Betreute studentische Arbeiten **181**

E Lebenslauf **183**

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Einteilung des Gleisquerschnittes nach dem UIC [Nol18] . . . 6
Abb. 2.2: Manuelle Apparate zum Unkrautjäten: a) Gabel mit gebogenem Metallfuß [Mic23] b) Zwei-Finger-Greifer mit Stock [Mic23] c) Werkzeug aus Federstahlspiralen [Erg15] d) Apparat zum Ausreißen verholzter Pflanzen [Ser24] 10
Abb. 2.3: Automatisierter Apparat zum Unkrautjäten nach [Kon04] . . . 11
Abb. 2.4: Flächendeckende Apparate zum Unkrautjäten: a) Apparat nach dem Arbeitsprinzip Epilieren [Ima24] b) Rotor mit Blättern [Kum23] c) Gegenläufige Gummireifen [Sim19, Clo07] 13
Abb. 2.5: Punktuelle Apparate zum Ernten: a) Zwei-Finger-Greifer aus parallelen Blechen [Tia18], b) V-Griff [Sca09], c) Finger-Greifer mit Lebensmittelgestalt [Dav20] 16
Abb. 2.6: Aufbau des Gleisbettes mit Fahrzeugbegrenzungslinie in Bezug auf den Gleiskörper einer eingleisigen Strecke. (Eigene Darstellung nach [Men24] und §22 Abs.1 S.1 EBO.) 26
Abb. 2.7: Komponenten des Oberbaus einer hochbelasteten eingleisigen Strecke. (Eigene Darstellung nach [Men24, Lic10, Fen19].) 27
Abb. 2.8: Ein- und Zweikeimblättrige Pflanzen im vegetativen Stadium (Eigene Darstellung nach [Nic21, Mer19]) 30

Abb. 3.1: Standorte der Versuchsstrecken zur Untersuchung des maschinellen Jätens 36
Abb. 3.2: Phasen des Produktentwicklungsprozesses nach Pahl und Beitz [Sch12, Ben21] 37

Abb. 4.1: Darstellung des Arbeitsprinzips des maschinellen Jätens . . . 39
Abb. 4.2: Funktionsstruktur des maschinellen Jätens 43
Abb. 4.3: Messung der Ausreißkraft unterschiedlicher Pflanzenarten im Gleis [Arc23] 45
Abb. 4.4: Kleinprobenprüfstand zur Erprobung des maschinellen Jätens 47
Abb. 4.5: Reifen und Rollen für das maschinelle Jäten: a) Gummireifen b) Hubwagenrollen c) Industriewalzen d) Zahnradgeometrie e) Sterngeometrie [Arc25] 49
Abb. 4.6: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Press- und Vertikalkraft im Labor [Arc25] 50
Abb. 4.7: Evaluierung der Press- und Zugkräfte bei der Variation des Pflanzendurchmessers mit Sterngeometrie 52

Abb. 4.8: Evaluierung der Press- und Zugkräfte bei der Variation des Pflanzendurchmessers mit Zahnradgeometrie 53
Abb. 4.9: Evaluierung der Press- und Zugkräfte bei der Variation der Drehzahl 54
Abb. 4.10: Darstellung des Rollenwinkels zur Horizontalen: a) -10°, b) 10° 55
Abb. 4.11: Verhältnis der Dreh- und Fahrgeschwindigkeit auf stillgelegtem Gleis mit Aufrechter Trespe (Puffendorf) und auf Abstellgleis mit gemischter Vegetation (Linnich) 56
Abb. 4.12: Evaluierung weiterer Arbeitsparameter im Gleis 59
Abb. 4.13: Drehmoment-Masse-Vergleich von elektrischen, hydraulischen und pneumatischen Motoren ([Tan13] modifiziert) 64
Abb. 4.14: Drehmoment-Drehzahl-Vergleich von elektrischen und hydraulischen Motoren ([Sak22] modifiziert) 64
Abb. 4.15: Mögliche Varianten zur Übertragung des Drehmoments 65
Abb. 4.16: Mögliche Drehungsrichtungen der Rollen 67
Abb. 4.17: Morphologischer Kasten des Jätsystems 69

Abb. 5.1: CAD-Darstellung der Jätmodule mit drei und zwei Rollenpaaren 72
Abb. 5.2: CAD-Anordnung der Jätmodule auf dem ebenen Bereich des Schotterbettes (Bereich A) 73
Abb. 5.3: Versuchsträger zur flächendeckenden Erprobung des maschinellen Jätens im Gleisbereich: a) Jätmodul b) Trägermodul c) Gesamtsystem [Jen24] 74
Abb. 5.4: Wuchsformen zur Aufteilung der Gleisabschnitte: a) Krautig b) Gräser c) Verholzend bis verholzt 77
Abb. 5.5: Fotos der Versuchsstrecken: a) Vetschau - Strecke mit hoher Vegetationsdichte und hohem Feinanteil b) Bergheim - Streckenabschnitt mit hoher Vegetationsdichte und hohem Feinanteil c) Bergheim - Streckenabschnitt mit niedriger Vegetationsdichte und geringem Feinanteil 79
Abb. 5.6: Erhobene Pflanzenarten der Versuchsstrecken 79
Abb. 5.7: Darstellung des Vegetationswachstums im Gleis und Aufteilung der Streckenabschnitte 80
Abb. 5.8: Dokumentierung der Versuchsabschnitte: a) Markierung der Arbeitsbereiche b) Ermittlung der Vegetationsdichte c) Messung der Pflanzenhöhe 81
Abb. 5.9: Reduktion der Wuchshöhe durch die Rollen des maschinellen Jätens im krautigen Bereich [Arc26] 85
Abb. 5.10: Effekt des maschinellen Jätens auf verholzend bis verholzte Pflanzen a) Verletzung der Rinde b) Vollständig entwurzelter Baum [Arc26] 86

Abb. 5.11: Abnahme der Pflanzenhöhe in krautigen Bereichen 87
Abb. 5.12: Abnahme der Vegetationsdichte in krautigen Bereichen 87
Abb. 5.13: Abnahme der Vegetationsdichte (VD) der Pflanzenhöhe (PH) in Bezug auf die Anzahl der Überfahrten (F) im krautigen Bereich 89
Abb. 5.14: Abnahme der Vegetationsdichte (VD) und Pflanzenhöhe (PH) abhängig von der Presskraft 300 N und 450 N 90
Abb. 5.15: Darstellung des direkten Energiebedarfs der wirksamsten Arbeitsparameter pro Anwendung 93
Abb. 5.16: Messungen der dB(A)-Werte der Lärmexposition des Versuchsträgers [Arc26] 95

Abb. 6.1: Aufteilung der Schotterbereiche zur Untersuchung der Wirkprinzipien des maschinellen Jätens und Mähens 98
Abb. 6.2: Versuchsstrecken zur Untersuchung der langfristigen Wirksamkeit des maschinellen Jätens: a) Puffendorf b) Linnich c) Birgden 100
Abb. 6.3: Initiale Pflanzenhöhe und erstes Gewicht der drei Standorte (Juli 2022 - Linnich und Puffendorf, Juni 2023 - Birgden) . . . 103
Abb. 6.4: Änderung der Pflanzenhöhe in der Versuchsstrecke Puffendorf (normiert) 104
Abb. 6.5: Frischgewicht der Versuchsstrecke Puffendorf (normiert) . . . 107
Abb. 6.6: Trockengewicht der Versuchsstrecke Puffendorf (normiert) . . 107
Abb. 6.7: Pflanzenhöhe der Brombeere in Linnich über die gesamte Untersuchungszeit (normiert) 108
Abb. 6.8: Pflanzenhöhe des Ruprechtskrauts in Linnich über die gesamte Untersuchungszeit 109
Abb. 6.9: Pflanzenhöhe des Ackerschachtelhalms in Puffendorf über die gesamte Untersuchungszeit 110
Abb. 6.10: Pflanzenhöhe der Birken in Linnich über die gesamte Untersuchungszeit 112

Abb. B.1: Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) in Linnich 154
Abb. B.2: Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) in Puffendorf 154
Abb. B.3: Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) in Birgden 155
Abb. B.4: Durchschnittlichen Pflanzenhöhe in Linnich (normiert) 155
Abb. B.5: Durchschnittliche Pflanzenhöhe in Puffendorf (normiert) . . . 156
Abb. B.6: Durchschnittliche Pflanzenhöhe in Birgden (normiert) 156
Abb. B.7: Durchschnittliches Frischgewicht (g) der behandelten Pflanzen in Linnich 157
Abb. B.8: Durchschnittliches Trockengewicht (g) der behandelten Pflanzen in Linnich 157

Abb. B.9: Durchschnittliches Frischgewicht (g) der behandelten Pflanzen in Puffendorf 158
Abb. B.10: Durchschnittliches Trockengewicht (g) der behandelten Pflanzen in Puffendorf 158
Abb. B.11: Durchschnittliches Frischgewicht (g) der behandelten Pflanzen in Birgden 159
Abb. B.12: Durchschnittliches Trockengewicht (g) der behandelten Pflanzen in Birgden 159
Abb. B.13: Durchschnittliches Frischgewicht der behandelten Pflanzen in Linnich (normiert) 160
Abb. B.14: Durchschnittliches Trockengewicht der behandelten Pflanzen in Linnich (normiert) 160
Abb. B.15: Durchschnittliches Frischgewicht der behandelten Pflanzen in Puffendorf (normiert) 161
Abb. B.16: Durchschnittliches Trockengewicht der behandelten Pflanzen in Puffendorf (normiert) 161
Abb. B.17: Durchschnittliches Frischgewicht der behandelten Pflanzen in Birgden (normiert) 162
Abb. B.18: Durchschnittliches Trockengewicht der behandelten Pflanzen in Birgden (normiert) 162
Abb. B.19: Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) der Aufrechte Trespe in Linnich 163
Abb. B.20: Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) der Aufrechte Trespe in Puffendorf 163
Abb. B.21: Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) des Ackerschachtelhalms in Linnich 164
Abb. B.22: Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) des Ackerschachtelhalms in Puffendorf 164
Abb. B.23: Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) des Ruprechtskrauts in Linnich 165
Abb. B.24: Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) der Brombeere in Linnich 165
Abb. B.25: Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) der Brombeere in Birgden 166
Abb. B.26: Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) des Birkens in Linnich . 166
Abb. B.27: Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) des Berg-Ahorns in Birgden 167
Abb. B.28: Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) der Gemeinen Hainbuche in Birgden 167
Abb. B.29: Durchschnittliche Pflanzenhöhe der Aufrechte Trespe in Linnich (normiert) 168
Abb. B.30: Durchschnittliche Pflanzenhöhe der Aufrechte Trespe in Puffendorf (normiert) 168

Abb. B.31: Durchschnittliche Pflanzenhöhe des Ackerschachtelhalms in Linnich (normiert) . . . 169
Abb. B.32: Durchschnittliche Pflanzenhöhe des Ackerschachtelhalms in Puffendorf (normiert) . . . 169
Abb. B.33: Durchschnittliche Pflanzenhöhe des Ruprechtskrauts in Linnich (normiert) . . . 170
Abb. B.34: Durchschnittliche Pflanzenhöhe der Brombeere in Linnich (normiert) . . . 170
Abb. B.35: Durchschnittliche Pflanzenhöhe der Brombeere in Birgden (normiert) . . . 171
Abb. B.36: Durchschnittliche Pflanzenhöhe des Birkens in Linnich (normiert) 171
Abb. B.37: Durchschnittliche Pflanzenhöhe des Berg-Ahorns in Birgden (normiert) . . . 172
Abb. B.38: Durchschnittliche Pflanzenhöhe der Gemeinen Hainbuche in Birgden (normiert) . . . 172
Abb. B.39: Durchschnittliches Frischgewicht (g) von Ackerschachtelhalm, Ruprechtskraut, Brombeere, Birken und Aufrechter Trespe in Linnich . . . 173
Abb. B.40: Durchschnittliches Trockengewicht (g) von Ackerschachtelhalm, Ruprechtskraut, Brombeere, Birken und Aufrechter Trespe in Linnich . . . 173
Abb. B.41: Durchschnittliches Frischgewicht (g) der Aufrechten Trespe und des Ackerschachtelhalms in Puffendorf . . . 174
Abb. B.42: Durchschnittliches Trockengewicht (g) der Aufrechten Trespe und des Ackerschachtelhalms in Puffendorf . . . 174
Abb. B.43: Durchschnittliches Frischgewicht (g) von Berg-Ahorn, Gemeiner Hainbuche und Brombeere in Birgden . . . 175
Abb. B.44: Durchschnittliches Trockengewicht (g) von Berg-Ahorn, Gemeiner Hainbuche und Brombeere in Birgden . . . 175
Abb. B.45: Durchschnittliches Frischgewicht von Ackerschachtelhalm, Ruprechtskraut, Brombeere, Birken und Aufrechter Trespe in Linnich (normiert) . . . 176
Abb. B.46: Durchschnittliches Trockengewicht von Ackerschachtelhalm, Ruprechtskraut, Brombeere, Birken und Aufrechter Trespe in Linnich (normiert) . . . 176
Abb. B.47: Durchschnittliches Frischgewicht der Aufrechten Trespe und des Ackerschachtelhalms in Puffendorf (normiert) . . . 177
Abb. B.48: Durchschnittliches Trockengewicht der Aufrechten Trespe und des Ackerschachtelhalms in Puffendorf (normiert) . . . 177
Abb. B.49: Durchschnittliches Frischgewicht von Berg-Ahorn, Gemeiner Hainbuche und Brombeere in Birgden (normiert) . . . 178

Abb. B.50: Durchschnittliches Trockengewicht von Berg-Ahorn, Gemeiner Hainbuche und Brombeere in Birgden (normiert) 178

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Eigenschaften der punktuellen Apparate zum maschinellen Jäten 21
Tab. 2.2: Eigenschaften der flächendeckenden Apparate zum maschinellen Jäten 22
Tab. 2.3: Eigenschaften der Apparate bzw. Endeffektoren zum Ernten . 23
Tab. 2.4: Eigenschaften der Apparate zum Ausreißen von Baumwollstängeln 24
Tab. 2.5: Abmessungen des Schotterkörpers einer eingleisigen Strecke 27

Tab. 4.1: Systemanforderungen zur Wirksamkeit (Wi) und technischen Umsetzbarkeit (Tk) 42
Tab. 4.2: Ermittelte Ausreißkraft unterschiedlicher Pflanzenarten [Arc23] 46

Tab. 5.1: Versuchsparameter zur Erprobung des maschinellen Jätens . 82
Tab. 5.2: Versuchsergebnisse der flächendeckenden Erprobung des maschinellen Jätens im Gleisbereich 84
Tab. 5.3: Empfohlene Arbeitsparameter zur Anwendung des maschinellen Jätens 91
Tab. 5.4: Direkter Energiebedarf des maschinellen Jätens in Bezug auf die erprobten Arbeitsparameter pro Überfahrt 92

Tab. 6.1: Behandelte Pflanzen und ihr Wachstumsort 102
Tab. 6.2: Abweichung der Wuchshöhe und des Pflanzengewichts der Verfahren und Kontrollfläche 105
Tab. 6.3: Gesamtauswertung der jährlichen Wachstumsentwicklung in den Versuchsstrecken 106
Tab. 6.4: Anzahl der erforderlichen Behandlungen nach Pflanzenart . . 109
Tab. 6.5: Relevante Werte der Pflanzenhöhe 111
Tab. 6.6: Wachstumsentwicklung der behandelten Arten über die gesamte Untersuchungszeit 113

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

Symbol	Beschreibung	Einheit
E	Energiebedarf	kWh/km
F_N	Normale Kraft	N
F_Z	Zugkraft	N
M	Drehmoment	Nm
P	Leistung	kW
U	Umdrehung	-
n	Drehgeschwindigkeit	U/min
r	Radius	mm
v	Fahrgeschwindigkeit	km/h

Griechische Symbole

Symbol	Beschreibung	Einheit
μ	Reibung	-

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BOA	Verordnung über den Bau und Betrieb von Anschlußbahnen
BW	Baumwollstängel
DB AG	Deutsche Bahn Aktiengesellschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
DW	Trockengewicht
DZSF	Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung, Dresden
EBA	Eisenbahn-Bundesamt, Bonn
EBO	Eisenbahn-Betriebsordnung
EF	Erprobung im Feld
EL	Erprobung im Labor
EU	Europäische Union
FG	Finger-Greifer
FW	Frischgewicht
F	Anzahl der Überfahrten
GE	Gewichtsentnahme
GW	Geringe Wirksamkeit
IUP	Integrierte Unkrautbekämpfung
KB	Kurze Blockade
K	Komerziell
LD	Langsames Drehen
MSE	Muskel- und Skeletterkrankungen
ND	Normales Drehen
NM	Nicht motorisiert
PB	Permanente Blockade
PH	Pflanzenhöhe
PflSchG	Pflanzenschutzgesetz
RWE AG	Rheinisch-Westfällisches Elektrizitätswerk Aktiengesellschaft

Abkürzung	**Beschreibung**
RW	Reduziertes Wachstum
S	Ganztägig sonnenexponierte Flächen
UIC	Union Internationale des Chemins de fer (Internationaler Eisenbahnverband)
VD	Vegetationsdichte
ZLSM	Stiftung Zuid-Limburgse Stoomtrein Maatschappij
kS	Ganztägig beschattete Flächen
tS	Teilweise beschattete Flächen

1 Einleitung

Das Betreiben von Eisenbahnen stellt hohe Anforderungen an die Sicherheit. Neben den Fahrzeugen muss auch die Infrastruktur regelmäßig gewartet werden. Insbesondere gilt dies für den Fahrweg. Der überwiegende Teil der Gleise besitzt einen Schotteroberbau. Durch das Wachstum von Pflanzen und den dadurch bedingten Eintrag von Feinmaterial reduziert sich langfristig die Drainagekapazität des Schotterkörpers, was u.a. die Destabilisierung des Schotterbettes und die Verkürzung der Instandhaltungsintervalle von bspw. der Schotter- und Bettungsreinigung zur Folge haben kann. [Fen19]

Darüber hinaus können sich kurzfristige negative Effekte einstellen. So können mechanische und elektrische Funktionen der Eisenbahnanlage, wie die Positionierung der Weichenkomponenten, gestört werden. Ebenso können die Pflanzen Schmierfilme auf den Gleisen hinterlassen, wodurch sich die Bremswege von Zügen verlängern bzw. die Anfahrzugkraft verringern kann. Weitere Gefahren bestehen für Mitarbeiter und Passagiere durch den eingeschränkten Zugang zu Arbeits- bzw. Fluchtwegen.

Die Behandlung der im Gleis befindlichen Pflanzen wird als Vegetationsmanagement oder Vegetationskontrolle bezeichnet. Um den Aufwuchs von Vegetation niedrig zu halten, wird das Schotterbett in den europäischen Ländern primär mit chemischen Blatt- und Bodenherbiziden behandelt [Nol18]. Grundsätzlich ist der Einsatz von Herbiziden genehmigungspflichtig und auf Gleisanlagen nur mit Ausnahmegenehmigung erlaubt. Gemäß §12 Absch. 2 PflSchG kann die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln ausschließlich mit vordringlichem Zweck genehmigt werden und wenn dem Naturhaushalt oder dem Schutz der Gesundheit von Menschen und Tieren nichts entgegensteht. Daraus resultieren starke Einschränkungen vor allem in Schutzgebieten, die von mindestens 20 % der Strecken der DB AG berührt sind [DB 23].

Aus diesem Grund und als Beitrag zur Erreichung der Ziele des „European Green Deal“, der die Klimaneutralität bis 2050 anstrebt, streben die europäischen Bahnbetreiber an, den Einsatz von Chemikalien so weit wie möglich zu reduzieren. Darum werden in vielen Ländern der EU herbizidfreie Verfahren entwickelt. Bisher befindet sich jedoch noch keines dieser Verfahren im Regeleinsatz. [Int21]

Wegen ihrer zahlreichen Anwendungsgebiete zeigen mechanische Verfahren Potenzial zur weiteren Entwicklung. Die Behandlung der Vegetation auf dem Randweg und auf den Böschungen wird aktuell durch mechanische Verfahren entweder mit Handgeräten oder großen Maschinen durchgeführt [Int21]. Die-

se werden bei krautigen sowie verholzten Pflanzen eingesetzt, haben einen geringen Energiebedarf [Col19] und dementsprechend geringe Luftschadstoffemissionen. Da kein oder wenig Betriebsstoff beim Einsatz notwendig ist, sind die Schadstoffemissionen ebenso gering. Daher dürfen sie in Schutzgebieten angewendet werden [Int21].

Ein Nachteil der mechanischen Verfahren ist die notwendige hohe Anwendungsfrequenz. Zur Behandlung des Schotterkörpers können nur Methoden eingesetzt werden, die nicht in das Schotterbett eindringen. Wenn nur die oberirdischen Teile der Pflanze bekämpft werden, bleibt die Verbindung zwischen Spross- und Wurzelsystem der Pflanze möglicherweise unbehandelt, sodass ein neuer Austrieb entstehen kann. [Mer19]

Eine geringere Anwendungsfrequenz könnte erreicht werden, indem die Pflanzen gejätet werden, das heißt, die Wurzeln vollständig oder teilweise auszureißen. Auf diese Weise wird die Pflanze abgetötet. In der Regel genügt es, Wurzel und Pflanzenoberteil zu trennen, da sie voneinander abhängig sind, um Wachstum zu entwickeln [Mer19]. Die bekannteste Variante des Jätens wird von Hand durchgeführt, allerdings wird der menschliche Körper dadurch belastet und kann Muskel- und Skeletterkrankungen (MSE), Schmerzen im unteren Rückenbereich und Verletzungen erleiden [Kha19]. Darüber hinaus ist der Einsatz des Verfahrens auf großen Flächen zeit- und personalaufwändig [Mar15].

Um diese Nachteile zu kompensieren, kann das Jäten durch Mechanismen durchgeführt werden. Es wird als maschinelles oder mechanisiertes Jäten bezeichnet. Eine Art, das Verfahren umzusetzen, besteht aus gegenläufig drehenden Gummirädern oder Rollen, die gegeneinander gepresst werden und das Unkraut durch ihr Drehen erfassen und zupfen. Die Technologie arbeitet flächendeckend und kontinuierlich und zeigt eine hohe Effizienz beim Ausreißen von Baumwollstängeln [Pan23]. Sie ist im Agrarbereich im Einsatz, jedoch nicht im Gleisbereich.

Da die Rahmenbedingungen der Vegetationskontrolle auf Streckengleisen stark vom Agrarbereich abweichen, hat diese Arbeit das Ziel, den Mechanismus der drehenden Rollen für die Anwendung im Schotterbett zu entwickeln. Die Arbeit setzt sich aus den folgenden Kapiteln zusammen:

- Kapitel 2: Erfassung der Ausgangssituation und der bestehenden Systeme zum maschinellen Jäten
- Kapitel 3: Zielsetzung und Methodik der Arbeit – Auswahl des zu entwickelnden Systems
- Kapitel 4: Untersuchung der Funktionsweise des ausgewählten Systems und dessen Interaktion mit dem zu behandelnden Unkraut im Schotterbett

- Kapitel 5: Entwicklung und Bau des Systems für flächendeckende Versuche auf Gleisanlagen und Messung der Effizienz sowie der Wirksamkeit des entwickelten Systems auf dem Schotterbett
- Kapitel 6: Ermittlung der Anwendungsfrequenz durch langfristige Behandlung und Beobachtung des Vegetationswachstums über drei Vegetationsperioden (ca. drei Jahre)

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind mit dem Projekt „Entwicklung eines Alternativverfahrens zur chemischen Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen“ verbunden und wurden teilweise innerhalb des Projekts erzielt. Das Projekt wurde vom Deutschen Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn Bundesamt (DZSF beim EBA) beauftragt und vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) finanziert.

Innerhalb des Projekts wurden zwei weitere herbizidfreie Verfahren untersucht: das Elektroweeding, d.h., die Bekämpfung der Pflanzen mit Strom, und die Anwendung eines Hochdruckwasserstrahlverfahrens, um das Unkraut zu schneiden oder zu zerfasern. Die Verfahren teilen Schnittstellen mit dem maschinellen Jäten, vor allem bei der Erprobung des Systems im Gleisbereich, und werden ebenso in dieser Arbeit beschrieben. Weitere Ergebnisse des Einsatzes des Elektroweedings sowie des Wasserstrahls werden hier nicht erläutert, jedoch können sie im Abschlussbericht des Projekts gefunden werden [Arc26].

2 Stand der Technik

Das Vegetationsmanagement umfasst Techniken zur Prävention, Bekämpfung und Vernichtung unerwünschter Pflanzen [Zim18]. Im Eisenbahnbereich nimmt das Vegetationsmanagement eine bedeutende Rolle bei der Aufrechterhaltung der Sicherheit und Funktionsfähigkeit von Bahnanlagen ein. Die Gleise von Unkraut zu befreien ist eine interdisziplinäre Aufgabe, welche nicht nur Kenntnisse in Eisenbahntechnik und Maschinenbau erfordert, sondern auch das Verständnis des Wachstums und der Sterbensmechanismen der Pflanzen einbezieht.

Das folgende Kapitel erläutert die aktuellen Techniken zur Vegetationskontrolle im Gleisbereich. Außerdem werden die Mechanismen zum Jäten und ähnliche Technologien zusammengefasst und analysiert. Zudem werden die technischen und biologischen Rahmenbedingungen für die Entwicklung eines maschinellen Jätsystems dargestellt.

2.1 Aktuelles Vegetationsmanagement im Gleisbereich und Bedarf an herbizidfreien Alternativen

Im Gleisbereich werden verschiedene Methoden für das Vegetationsmanagement angewendet. Wie in der Abb. 2.1 gezeigt wird, kann der Gleisbereich in vier Bereichen unterteilt werden. Auf dem Schotterkörper (Bereiche A und B) sowie dem Randweg (Bereich C) dominiert die chemische Vegetationskontrolle, während an Böschungen (Bereich D) die Anwendung von Chemikalien fast überall untersagt ist. Hier wird die tolerierte Vegetation (Wiesen, Büsche und Bäume) hauptsächlich durch Mulchaggregate und Balkenmäher gepflegt, welche an landwirtschaftlichen Fahrzeugen oder ferngesteuerten Mähraupen montiert werden und unabhängig vom Schienenverkehr operieren. Gleisgebundene Technik erfordert einen großen Aufwand an Vorplanung und wird daher nur in schwer zugänglichen Bereichen eingesetzt. Um das Gras sowie die Strauch- und Baumschicht klein zu halten, werden mechanisierte manuelle Arbeitsverfahren, wie Freischneider, eingesetzt. Diese sind im Bezug auf Mähtechniken von ähnlicher Bedeutung wie die Großaggregate. [Nol18, Nie19]

Das chemische Vegetationsmanagement auf Gleisanlagen hat in Deutschland eine lange Geschichte von Produktwechseln, Erfolgen und Einschränkungen. Bis 1984 waren bis zu 24 Herbizide zugelassen. Es folgte eine drastische Reduktion bis 1990 aus Gründen des Gewässerschutzes [Hur96]. Im Jahr 2006 wurde die Anzahl der zugelassenen und eingesetzten Herbizide auf Glyphosat,

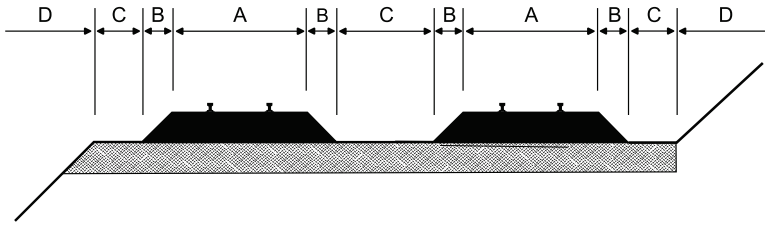


Abb. 2.1: *Einteilung des Gleisquerschnittes nach dem UIC [Nol18]*

Flumioxazin und Flazasulfuron reduziert, welche bis 2022 in Deutschland verwendet wurden [DB 22]. Um eine umweltfreundliche und verantwortungsvollere Instandhaltung der Gleise durchzuführen, verzichtet die DB AG seit 2023 auf Glyphosat und setzt stattdessen Pelargonsäure ein. Diese hat Anfang 2023 eine Zulassungserweiterung für die Anwendung auf Gleisanlagen erhalten [DB 23].

In weiteren europäischen Bahnen spielte Glyphosat bis 2018 ebenfalls eine Hauptrolle bei der Vegetationskontrolle [Nol18]. Eine starke Reduktion oder der vollständige Verzicht auf Glyphosat wird in den letzten Jahren jedoch bevorzugt, wobei Glyphosat durch andere konventionelle Herbizide ersetzt wird. Außerdem werden in Ländern wie Deutschland, Frankreich und Belgien, Strategien entwickelt, um den Einsatz von Herbiziden so weit wie möglich zu reduzieren [Int21].

Weiterhin setzen Eisenbahninfrastrukturunternehmen präventive Maßnahmen zur Vegetationskontrolle ein. Dazu zählt der Einbau von seitlichen Barrieren wie Sickerbetonriegel, Kabelkanäle und Blockstufen, die als Hindernisse für den unerwünschten Pflanzeneinwuchs fungieren. Andere Maßnahmen berücksichtigen den Einbau von Banketten aus verdichteten feinen Materialien, welche mit Quergefälle gestaltet und durch den Einbau von Folien verstärkt werden können. Ihr Hauptzweck ist, den neuen Aufwuchs und das Liegenbleiben des organischen Materials zu verhindern. Darüber hinaus werden Sperrschichten zwischen Ober- und Unterbau des Gleisbettes gebaut, um die Feuchtigkeit sowie die Verschmutzung einzugrenzen. [Mül01]

Die chemische Vegetationskontrolle gilt bisher als die effizienteste Methode zur Unkrautbekämpfung [Pav22]. Derzeit kann kein herbizidfreies Verfahren die Sicherheit der Gleise in dem Maße gewährleisten wie dieses Verfahren [Int21]. Jedoch haben die langfristige Anwendung und der übermäßige Verbrauch von Herbiziden negative Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Ge-

sundheit. Gleichzeitig wird ein globales Problem der pflanzlichen Resistenz gegen Herbizide geschaffen [Pav22, Lyt24, Gha23]. Herbizidresistente Pflanzen besitzen die Fähigkeit, die Behandlung mit diesem Mitteln aufgrund vererbbarer Veränderungen zu überstehen und sich weiter fortzupflanzen [Mat25]. Dieses Phänomen entsteht durch die wiederholte Anwendung von Herbiziden mit demselben Wirkmechanismus. Unkräuter, die weniger empfindlich gegenüber dem eingesetzten Wirkstoff sind, überleben die Behandlung und vermehren sich. Dadurch nimmt der Anteil herbizidresistenter Pflanzen in der Population zu, was zu Bekämpfungsproblemen führt [Fac19]. Das Problem verschärft sich durch einen Mangel an Entdeckungen neuer Wirkungsmechanismen [Lod21]. Aktuell werden in der internationalen Datenbank für herbizidresistente Unkräuter 373 Fälle von verschiedenen Glyphosat-resistenten Pflanzenarten weltweit verzeichnet [Glo23].

Aus diesen Gründen unterliegen Herbizide in nordwesteuropäischen Ländern wie Deutschland, dem Vereinigten Königreich, den Niederlanden, und anderen, immer strengeren Anwendungsvorschriften. Zusätzlich nimmt die Anzahl der genehmigten Herbizide ab [Lyt24, Hof14]. Darüber hinaus besteht zwischen EU-Ländern der „Green Deal“, eine Wachstumsstrategie, deren Maßnahmen und Aktionen zum Schutz der Biodiversität und zur Verringerung der Umweltverschmutzung gerichtet sind, um eine giftfreie Umwelt zu schaffen. Ziel ist es, bis zum Jahr 2050 die Klimaneutralität in der EU zu erreichen. Dazu tragen Schienenfahrzeuge und ihre Infrastruktur als nachhaltiges Verkehrssystem bei und sollen daher möglichst wenig Chemikalien einsetzen. Dies führt zu einem Bedarf an Alternativverfahren, die eine umweltfreundliche Vegetationskontrolle ermöglichen [Int21].

2.2 Definition und Anwendung des Jätens

Mechanische Verfahren zum Vegetationsmanagement werden seit den Anfängen der Landwirtschaft eingesetzt [Sin18]. Vor der Entdeckung der Herbizide wurde das Unkraut mit nichtchemischen Methoden bekämpft. In der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts verdrängten jedoch chemische Unkrautvernichtungsmittel die nichtchemische Vegetationskontrolle wegen ihrer Effektivität und geringen Kosten weitgehend [Mel17, Sin18]. Im Vergleich zu anderen Alternativverfahren sind mechanische Methoden wegen ihrer hohen Kapazität, vielfältigen Anwendungsbereiche und niedrigen Kosten besonders attraktiv [Hof14]. Sie erweisen sich als effektiver als thermische Verfahren bei der Bekämpfung größerer Unkräuter oder der Sanierung vernachlässigter Flächen [Ras07] und weisen zudem einen geringeren Energiebedarf auf [Col19].

Beim mechanischen Vegetationsmanagement werden Unkräuter durch phy-

sikalische Mittel reduziert [Mel17]. Die Techniken umfassen das Vergraben, Schneiden und Entwurzeln von Unkraut [Ahm14]. Im Schotterbett können nur Verfahren aus der Landwirtschaft angewendet werden, die nicht in den Boden eingreifen, da ansonsten der Schotter im Gleisbereich destabilisiert werden könnte. Daher sind mechanische Technologien wie Hacken und Eggen ausgeschlossen. Das Jäten nutzt als Wirkprinzip das Ausreißen der Pflanzen einschließlich ihrer Wurzeln, was effektiver für das Vegetationsmanagement ist als nur die Bekämpfung lediglich der oberen Pflanzenteile [Mer19]. Abgesehen von der Jättechnik haben weitere mechanische Methoden, die nicht in den Boden eingreifen, wie Mähen oder Mulchen, keinen Einfluss auf die Pflanzenwurzeln.

Die einfachste Form des Jätens ist die Durchführung von Hand. Obwohl diese Arbeit aufwendig und körperlich anstrengend ist, ist sie notwendig, wenn die Pflanzen robust sind oder sich nur schwer mit Herbiziden bekämpfen lassen [Jab15, Mat20]. Zudem ermöglicht das Handjäten ein selektives Vorgehen [Mül01]. Ein effizientes Handjäten in der Landwirtschaft erfolgt in den frühen Wachstumsstadien des Unkrauts, insbesondere im ersten Monat nach der Aussaat. Abhängig vom Saatgut wird diese Methode 15 Tage bis etwa acht Wochen nach der Aussaat angewendet, was eine Effizienz von bis zu 95 % ermöglicht. Dieser Wert entspricht dem Verhältnis der Anzahl der entfernten Unkräuter zur Anzahl der vorhandenen Unkräuter in einer Flächeneinheit. [Rao07, Jab15].

Die Arbeitszeit pro Hektar variiert in einem breiten Spektrum von etwa 24 bis 600 Stunden [Pan17, Bal23, Gha22, Kat09]. Sie hängt im Agrarbereich stark von der Kulturpflanze ab. Je mehr das Unkraut sich von der geschützten Pflanze unterscheidet, desto schneller kann das Handjäten durchgeführt werden. So wurden für Salatfelder etwa 24 h/ha gebraucht [Pan17], während für einen Hektar Reisfeld bis zu 500 Stunden erforderlich waren [Bal23]. Im Gleisbett liegt die Arbeitszeit bei ca. 183 Stunden pro Kilometer [Mül01]. Um diese Angabe mit den Daten der Landwirtschaft vergleichbar zu machen, kann sie mit einer Gleisbreite von ca. 5,5 m auf etwa 333 h/ha umgerechnet werden. Um die Arbeitsgeschwindigkeit zu erhöhen und die physische Anstrengung zu verringern, werden Personen-Flachbetten entwickelt, die eine bis acht Arbeitskräfte in Bauchlage fixieren und über das Arbeitsfeld gefahren werden [New10, Gha22]. So kann das Unkraut mit den herunterhängenden Armen ausgerissen werden. Die Flachbetten werden von elektrischen Motoren oder vom Traktor gezogen.

Das Handjäten spielt in vielen Ländern Asiens, Lateinamerikas und Afrikas bei kleinen landwirtschaftlichen Betrieben eine wichtige Rolle [Rao07]. In diesen Regionen basiert das Unkrautmanagement häufig auf Familienarbeit und erweist sich daher als kostengünstig. Ein weiterer Grund für die Bedeutung des Handjätens sind die Kosten der chemischen Unkrautbekämpfung, die für

viele kleine Betriebe oft untragbar sind [Bal23]. Im Gegensatz dazu kann das Handjäten bei gutbezahlter Arbeitskraft in einem Industrieland insbesondere bei großen Flächen mit hoher Vegetationsdichte die kostspieligste Methode zur Unkrautkontrolle darstellen [Mar15]. Auch in einem Schwellenland kann der finanzielle Vorteil des Handjätens im Vergleich zur Anwendung von Herbiziden in großen Betrieben gering sein, obwohl diese Technik in manchen Fällen bessere Ergebnisse als chemische Methoden erzielt [Sin18].

Wegen der hohen Kosten, der körperlichen Anstrengung und des Personalmangels besteht ein großes Interesse an Ersatzverfahren für das Handjäten, die die Abhängigkeit von menschlicher Arbeit verringern [Fen14]. Mechanisierte Ansätze des Jätens bzw. das mechanische Jäten oder maschinelle Jäten könnten diese Nachteile kompensieren. Dabei werden alle Mechanismen einbezogen, die das Ausreißen von Unkraut ermöglichen.

In der Literatur sind mechanisierte Ansätze zum Unkrautjäten bislang wenig untersucht, insbesondere im Kontext des Eisenbahnbereichs. Um den Stand der Technik zu analysieren, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine systematische Suche in englischer Sprache in zwei Datenbanken (Scopus und Web of Science) mit neun Schlüsselbegriffen durchgeführt: „mechanical weed puller“, „weed puller apparatus“, „weed puller device“, „weed puller machine“, „mechanical weeder“, „mechanical weeder pulling“, „mechanical weeding pulling“, „mechanical weeding uprooting“ und „prone weeder“. Die Suche ergab insgesamt 1035 Treffer ohne doppelte Veröffentlichungen (Stand: 23.11.2024).

Davon betrachten lediglich neun Publikationen das maschinelle Jäten, jedoch ohne Bezug zum Bahnbereich. Zusätzlich wurden fünf Veröffentlichungen identifiziert, die ähnliche Wirkprinzipien nutzen, wie das Jäten. Dazu gehören Systeme zur Optimierung der Obst- und Gemüseernte sowie Mechanismen zum Ausreißen von Baumwollstängeln, die nach der Ernte auf dem Feld verbleiben. Alle diese Arbeiten wurden analysiert und zusammengefasst. Auch Arbeiten, die von Review Papers zitiert wurden – Veröffentlichungen, die den Stand einer Technik zusammenfassen – wurden gesucht und in die Analyse einbezogen.

Laut Pahl und Beitz [Ben21] können technische Systeme je nach ihrem Hauptfluss – Energie, Stoff oder Signal – klassifiziert werden. Systeme, die als Hauptzweck haben, Energie umzuwandeln, werden als Maschine bezeichnet. Wenn der Hauptfluss auf Stoff bezogen ist, heißen die Systeme Apparat, während Systeme mit dem Hauptfluss Signal als Gerät gelten. Da Jätsysteme im Wesentlichen Stoff als Eingang und Ausgang betrachten, werden sie im Rahmen dieser Arbeit als Apparat weiter bezeichnet.

Die Apparate zum maschinellen Jäten lassen sich hauptsächlich in zwei Gruppen einteilen. Die erste Gruppe betrachtet punktuelle Greifer, die sowohl manuell als auch automatisch sowie in kleiner und großer Ausführung erhältlich

sind. Die zweite Gruppe bezieht flächendeckende Mechanismen ein, die durch die kontinuierliche Rotation von Komponenten das Unkraut zupfen. Auch die Systeme, die ähnlich wie das Ausreißen von Unkraut arbeiten, werden sowohl hinsichtlich punktueller als auch flächendeckender Ansätze betrachtet. In den Abschnitten 2.2.1 bis 2.2.3 erfolgt eine Analyse dieser Apparate, wobei die Arbeitsparameter, die Effizienz und der Entwicklungsstand im Mittelpunkt stehen.

Weiterhin ergab die Literaturrecherche 300 Arbeiten, die sich auf die konventionelle mechanische Vegetationskontrolle mit Bodenbearbeitung konzentrieren. Die übrigen Arbeiten thematisieren weitere Alternativverfahren zum Vegetationsmanagement, wie zum Beispiel das Mähen und Elektroweeding, oder haben keinen relevanten Bezug dazu. Diese Arbeiten wurden aus der Analyse ausgeschlossen.

2.2.1 Punktuelle Apparate zum maschinellen Jäten

Punktuelle Apparate zum Jäten bestehen häufig aus einem Greifer mit zwei bis fünf Fingern oder Platten, Abb. 2.2. Bei manuellen Mechanismen wird die Kraft zum Pressen und Ausreißen vom Bediener oder von der Bedienerin mithilfe eines Hebels aufgebracht, weshalb ein ergonomisches und leichtes Design von Vorteil ist. Solche Apparate werden für verschiedene Anwendungen kommerzialisiert.

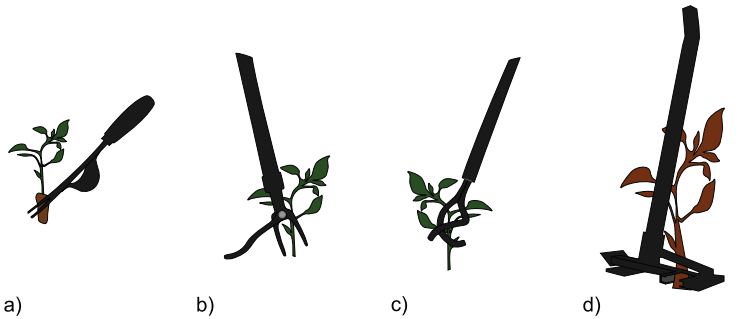


Abb. 2.2: Manuelle Apparate zum Unkrautjäten: a) Gabel mit gebogenem Metallfuß [Mic23] b) Zwei-Finger-Greifer mit Stock [Mic23] c) Werkzeug aus Federstahlspiralen [Erg15] d) Apparat zum Ausreißen verholzter Pflanzen [Ser24]

Für den Einsatz im Garten stehen beispielsweise Gabeln mit gebogenem Metallfuß, Abb. 2.2.a, oder Greifer mit drei bis fünf Fingern zur Auswahl, Abb. 2.2.b.

Bei der Gabel dient der gebogene Metallfuß als Stütze zum Aufbau der Ausreißkraft, während beim Greifer das Unkraut durch einen Schließmechanismus gezupft wird. Unterschiedliche Ausführungen der Greifer sind auf dem Markt zu finden, sie wiegen etwa 1 kg und sind ca. 900 mm lang [Mic23]. Zusätzlich gibt es für das Jäten im Garten ein Werkzeug aus Federstahlspiralen, welches die Pflanzen zum Ausreißen einrollt, Abb. 2.2.c, [Erg15]. Allerdings zeigt es sich, dass das Ausreißen der Wurzel bei den Federstahlspiralen sowie beim 3- und 5-Finger-Greifer nur dann effektiv ist, wenn die Mechanismen in den Boden eindringen [Erg15, F.A25].

Weitere manuelle Apparate, Abb. 2.2.d, sind für das Ausreißen von verholzten Pflanzen mit einem Durchmesser von bis zu 80 mm konzipiert, beispielsweise dem Wandelröschen (*Lantana camara*) [Exc96, Ser24, The15, Soo01]. Die Werkzeuge bestehen aus einem Greifer oder einer Zange, die über einen Hebelmechanismus ausgelöst wird. Der Hebel wird auf einem Stahlfuß abgestützt, um Druck auf die Zange auszuüben. Die Zange greift den Stamm der verholzten Pflanze und zieht ihn heraus. Das Werkzeug ist in verschiedenen Größen und Preisklassen erhältlich. Die maximale Greifweite beträgt etwa 82 mm. Das Gewicht des Werkzeugs variiert zwischen 2 kg bis 8,4 kg. Die minimale Pflanzenhöhe, die mit dem Mechanismus erfasst werden kann, liegt bodennah bei bis zu etwa 100 mm. Die Höhe des Hebels reicht von etwa 600 mm bis 1430 mm.

Automatisierte Apparate für das punktuelle Jäten werden ebenfalls entwickelt. Die meisten Erfindungen befinden sich in der Erprobungsphase [Vis23, Gok19, Sha15, Kon04]. Sie nutzen einen Zwei-Finger-Greifer als Werkzeug und sind in einer selbstfahrenden Struktur mit Navigationssystem montiert, Abb. 2.3.

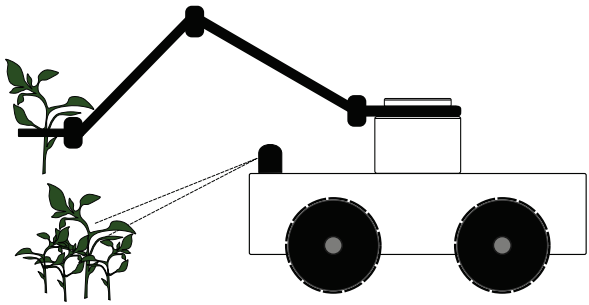


Abb. 2.3: *Automatisierter Apparat zum Unkrautjäten nach [Kon04]*

In den Arbeiten von Kondo et al. und Gokul et al. konzentriert sich die For-

schung ausschließlich auf die Entwicklung und Laborerprobung des Bilderkennungssystems, weshalb keine Daten zur Effizienz des Jätens und nur wenige Informationen zum System selbst vorliegen [Kon04, Gok19]. Lediglich in der Arbeit von Kondo et al. wird hinsichtlich der Systemeigenschaften die maximale Fahrgeschwindigkeit (6,5 km/h) berichtet, während im Fall des Apparats von Gokul et al. nur die Energieversorgung durch eine 12-V-Batterie angegeben wird [Kon04, Gok19]. In der Arbeit von Shanmugam et al. wurde ein Zwei-Finger-Greifer mit Unkraut in Feldversuchen getestet und erreichte eine Effizienz von 90 % [Sha15]. Die Zeit zum Ausreißen liegt zwischen 10 s und 11 s, während die Gesamtzeit von der Pflanzenerkennung bis zum Ausreißen zwischen 65,33 s und 258,22 s pro Pflanze variiert.

Das Greifsystem von Visentin et al. wurde sowohl im Labor als auch im Gewächshaus erprobt [Vis23]. Das Gesamtsystem hat Abmessungen von 800 x 500 x 800 mm (BxHxT), wird von einer 24-V-Batterie versorgt und operiert mit einer Arbeitsgeschwindigkeit von 1,8 km/h. Das Gewicht des Werkzeugs liegt bei 0,78 kg. Bei den Laborversuchen wurde Bohnenkräuter (*Satureja*) mit einer Vegetationsdichte von ca. 37,5 Pflanzen/m^2 und einer Höhe zwischen 20 mm und 150 mm behandelt. Im Gewächshaus wurden vier Pflanzenarten – Kriech-Quecke (*Elymus repens*), Löwenzahn (*Taraxacum*), Portulak (*Portulaca oleracea*) und Weißer Gänsefuß (*Chenopodium album*) – mit einer Höhe zwischen 20 mm bis 100 mm und einer Vegetationsdichte von ca. 28,6 Pflanzen/m^2 bekämpft.

Nach den Versuchen wurde im Labor eine Effizienz von etwa 92 % bei den ausgerissenen Pflanzen gemessen. Fehler traten aufgrund instabiler Stängel auf, die sich weggebogen haben oder bei Pflanzenhöhen unterhalb von 50 mm, die vom Greifer nicht erfasst werden konnten. Im Gewächshaus lag die Effizienz bei 85 %, wobei der Hauptunterschied hauptsächlich an Fehlern bei der Pflanzenerkennung zurückzuführen ist. Das spiegelt sich auch in der Arbeitsgeschwindigkeit wider, denn im Labor wurden durchschnittlich zehn Pflanzen/min erfasst, während es im Gewächshaus nur sechst Pflanzen/min waren.

Neben den Apparaten in der Erprobungsphase ist ein automatisiertes System für den kommerziellen Gebrauch verfügbar [B.V25]. Es handelt sich um einen Träger mit einem Drei-Finger-Greifer. Die Gesamtgröße des Systems beträgt 2050 x 1700 x 1550 mm (BxHxT), es wiegt 400 kg und hat einen Energiebedarf von 95 W. Eine bis drei Batterien können installiert werden, somit kann das System ganztägig betrieben werden. Das Jätsystem hat eine Größe von 700 x 700 x 700 mm (BxHxT), wiegt 20 kg und zieht zwei Pflanzen/s. Im Träger gibt es Bauraum für mehrere Greifer, sodass die Arbeitsgeschwindigkeit des Systems erhöht werden kann. Diese variiert zwischen einem und zwölf Hektar am Tag. Das System ist für den Einsatz mit Traktor oder anderem

Trägerfahrzeug kompatibel.

2.2.2 Flächendeckende Apparate zum maschinellen Jäten

Von den flächendeckenden Apparaten des maschinellen Jätens befinden sich sowohl einige in der Erprobungsphase [Ima24], [Kum23], als auch andere bereits im kommerziellen Einsatz [Sim19], [Clo07]. Im Unterschied zu den punktuell arbeitenden Apparaten sind die Systeme dieser Kategorie immer motorisiert. Für das kontinuierliche Zupfen des Unkrauts sorgen rotierende Komponenten in unterschiedlichen Umsetzungen, wie in Abb. 2.4 gezeigt wird.

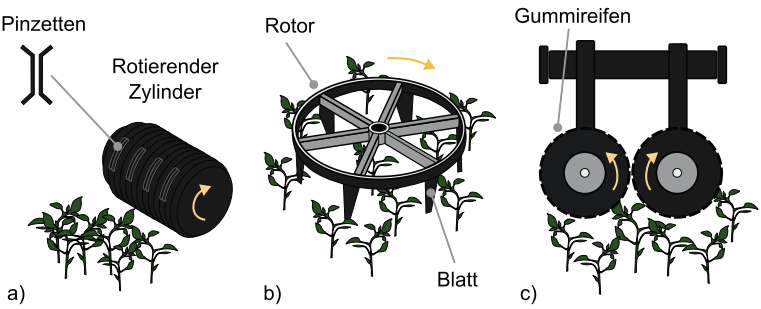


Abb. 2.4: *Flächendeckende Apparate zum Unkrautjäten: a) Apparat nach dem Arbeitsprinzip Epilieren [Ima24] b) Rotor mit Blättern [Kum23] c) Gegenläufige Gummireifen [Sim19, Clo07]*

In der Erprobungsphase befindet sich ein Kleinapparat, welcher nach dem Prinzip des Epilierens entwickelt wurde, Abb. 2.4.a, [Ima24]. Er besteht aus Pinzetten, die entlang eines drehenden Zylinders angeordnet sind. Die Pinzetten öffnen und schließen sich mithilfe einer Feder und zupfen das Unkraut aus. Die maximale Öffnungsbreite der Pinzetten beträgt 6,8 mm, die Federkraft liegt zwischen 3 N und 8,3 N und die Drehgeschwindigkeit beträgt 1740 U/min. Um die Arbeitsgeschwindigkeit des Geräts zu erhöhen, werden drei Reihen von Pinzetten im Umfangsbereich um 120 ° versetzt angebracht. Der Apparat wird von einer 12-V-Batterie mit Energie versorgt und hat ein Gewicht von 2,6 kg sowie Abmessungen von 200 x 400 x 230 mm (BxHxT), ohne tragende Struktur.

Die Ausreißkraft des Mechanismus wurde bei verschiedenen Öffnungsbreiten gemessen. Die Ergebnisse zeigen ein lineares Verhältnis zwischen der Ausreißkraft und der Öffnungsbreite, das im Bereich von 3,5 N bis 6,5 N liegt, bei Proben mit einer Dicke von 2 mm bis 3 mm. Darüber hinaus wurde die Effektivität des Ausreißens mit künstlichen Proben im Labor sowie mit echten Pflanzen

im Feld getestet. Im Labor wurden alle Proben erfolgreich vom Mechanismus erfasst und ausgerissen, jedoch gab es Schwierigkeiten beim Einklemmen, da die Proben häufig gegen den Zylinder und nicht gegen die Pinzetten stießen. Im Gegensatz dazu wurden im Feld nur wenige Pflanzen ausgerissen, während die meisten lediglich abgerissen wurden.

Ebenso befindet sich ein größeres System in der Erprobungsphase, das aus drei Rotoren mit einem Durchmesser von 300 mm besteht, die jeweils sechs kleine Rotorblätter (80 mm hoch) entlang des Umfangs verteilt besitzen, Abb. 2.4.b, [Kum23]. Durch die Drehung der Rotoren um die vertikale Achse wird das Unkraut eingewickelt und gezogen. Die Drehgeschwindigkeit beträgt 180 U/min und die Kraft der Blätter liegt bei ca. 285 N. Das System wird von einem Traktor über das Feld gezogen. In Feldversuchen wurden bei Arbeitsgeschwindigkeiten von 1,3 km/h und 2,5 km/h Effizienzen von 84,2 % bzw. 78 % gemessen. Die Bodenfeuchtigkeit lag bei 17 %. Der Kraftstoffverbrauch betrug zwischen 3 l/h und 3,5 l/h inkl. Fahrzeug. Nachteil dieser Entwicklung ist das Eindringen in den Boden. Obwohl das Werkzeug den Zweck hat, Vegetationskontrolle ohne Bodenkontakt auszuführen, lag der Kontakt in einer Tiefe zwischen 20 mm und 40 mm.

Abb. 2.4.c zeigt eine dritte Umsetzung rotierender Mechanismen zum Vegetationsmanagement. Es handelt sich um Reihen gegenläufiger Gummireifen, die sich um die horizontale Achse drehen und das oberhalb der Kulturpflanzen herausragende Unkraut jäten [Clo07],[Sim19]. Die Rollenreihen werden quer zur Fahrrichtung angeordnet und von einem Traktor gezogen. In Feldversuchen wurde die Effizienz einer kommerziellen Anwendung gemessen [Sim19]. Bei der Anlage sind die Gummireifen mit einer Neigung von 30° zur Vertikalen eingestellt. Die Versuche wurden mit zwei Dreh- und Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt. Kombiniert wurde eine Drehzahl von 50 U/min bei einer Geschwindigkeit von 0,64 km/h sowie 30 U/min bei 1,28 km/h.

Für die Erprobung wurden zwei Standorte genutzt. Im ersten Standort wurden hauptsächlich Weißer Gänsefuß *(Chenopodium album)* und Beifuß *(Ambrosia artemisiifolia)* mit einer Höhe über 1100 mm behandelt, während im zweiten Standort zurückgebogener Amarant *(Amaranthus retroflexus)* mit etwas niedrigerer Höhe bekämpft wurde. Im Durchschnitt wurden weniger als 50 % der zu behandelnden Pflanzen entfernt, mehrere wurden beschädigt und einige blieben intakt. Der höchste Erfolg beim Ausreißen wurde beim Gänsefuß in einer Behandlung mit 47,5 % beobachtet, während der Durchschnitt des Ausreißens der selben Pflanzenart bei 39,7 % lag. Weniger als ein Drittel des Beifuß oder des zurückgebogenen Amarants wurden im Durchschnitt erfolgreich entfernt.

2.2.3 Mechanismen mit ähnlichem Wirkprinzip wie das Jäten

In der Literatur wurden auch Mechanismen gefunden, die zwar kein Unkraut jäten, sich jedoch ebenfalls mit dem Greifen oder Ausreißen im Agrarbereich befassen. Punktuelle Ansätze werden zum Ernten von Obst und Gemüse entwickelt, während flächendeckende Apparate beim Ausreißen von Baumwollstängeln eingesetzt werden. Die Analyse solcher Mechanismen und ihrer Leistungsfähigkeit bietet Ansätze zur Weiterentwicklung des maschinellen Jätens und wird kurz behandelt.

Apparate zum Ernten

Der Mangel an Arbeitskräften und die zunehmende Größe landwirtschaftlicher Betriebe erfordern effizientere Arbeitstechniken im Agrarbereich. Die konventionell angewandten Methoden umfassen manuelle Erntearbeiten, die repetitive Tätigkeiten darstellen. So besteht für diese Aufgaben ein Optimierungspotenzial durch den Einsatz von Robotern. Diese Art von Anwendung gewinnt in der Robotik zunehmend an Bedeutung, sodass eine Vielzahl von Robotern mittlerweile kommerziell erhältlich ist. [Bot22]

Die Entwicklung der Technologie tendiert zur Automatisierung des gesamten Ernteprozesses, welcher das Erkennen, Greifen, Abtrennen und Sammeln der Frucht oder des Gemüses inkl. Weiterfahren umfasst. Darum berücksichtigen viele Arbeiten die Anwendung einer mobilen Plattform mit einem Manipulator bzw. einem Ausleger oder Roboterarm und einen Endeffektor, mit dem der Manipulator an einem Ende ausgerüstet ist und einen punktuellen Kontakt mit der Frucht herstellt, Abb. 2.5. [Yan23]

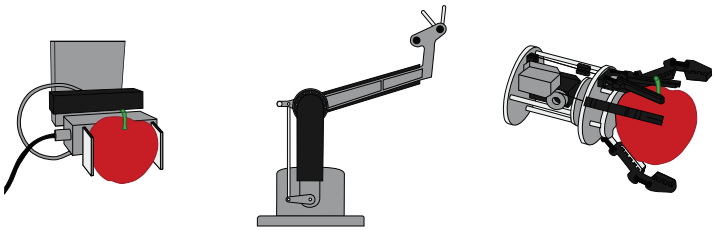
Die Endeffektoren greifen das Objekt und ziehen es entweder direkt von der Stammpflanze ab oder halten es lediglich fest, während sie von einem Schneidmechanismus unterstützt werden. Der Hauptzweck besteht darin, den Prozess durchzuführen, ohne die Frucht zu schädigen oder die Schäden zu minimieren [Dav20]. Daher liegt der Fokus überwiegend in der Ermittlung des erforderlichen Luftdrucks oder der genauen Kraft zum Greifen sowie in der Entwicklung von Endeffektoren aus weichen Materialien, die sich sogar an die Pflanzenform anpassen können [Yan23].

Endeffektoren, die die Lebensmittel direkt aus der Pflanze trennen, arbeiten mechanisch über zwei bis sechs Finger. Zwei-Finger-Greifer bestehen in der Regel aus zwei parallelen Greifbacken, Abb. 2.5.a, [Alj10, Tia18]. In einer weiteren Variante sind die Backen einseitig an einem Gelenk befestigt und erzeugen einen V-Griff, welcher die Frucht greift und so lange dreht, bis der Stiel bricht, Abb. 2.5.b, [Sca09]. Die erzeugten Kräfte zum abtrennen des Objekts liegen

zwischen 1,5 N und 4 N. Die Arbeiten befinden sich in frühen Entwicklungsphasen bzw. berichten über die Ersterprobung der Systemeigenschaften wie bspw. die Messung der Reibung beim Kontakt mit dem Objekt [Tia18], wobei die Effizienz des Gesamtsystems nicht gemessen wurde.

Komplexere Finger-Greifer werden entsprechend des Durchmessers oder der Gestalt der Lebensmittel gefertigt und besitzen oft mehr als 2 Finger, Abb. 2.5.c. Im Gegensatz zu den parallelen Backen oder dem V-Griff befinden sich diese Greifer auch bereits in fortgeschrittenen Entwicklungsphasen, in denen sie unter echten Arbeitsbedingungen erprobt werden [Sak08] oder sich bereits im kommerziellen Einsatz befinden [FFR20]. Die Effizienz hängt von der Frucht sowie vom Bilderkennungssystem ab. Die maximale Effizienz überschreitet 85 % [Sak08, Hai12]. Die Ausreißkraft liegt zwischen 40 N [Sep20] und 150 N [Sak08]. Die nötige Zeit, um die Frucht von der Pflanze zu trennen inkl. Bilderkennung, liegt bei ca. 20 s [Hai12] bis 40 s [Sak08] pro Frucht.

Obwohl die Systeme eine gute Effizienz aufweisen, hängt das effektive Ausreißen von der Fingergestalt des Greifers ab, die der runden Form der Lebensmittel entspricht. Im geraden Zustand sind solche Greifer nicht in der Lage, Unkraut auszureißen. Allerdings können die verwendeten Mechanismen zum Öffnen und Schließen der Finger bei der Entwicklung von Greifern zur Vegetationskontrolle berücksichtigt werden. Dies wäre beispielsweise mechanisch über kleine Zahnräder [Xio19], Seile [Man15] oder durch elektromagnetische [Ant11] oder pneumatische Aktuatoren [Zha18] möglich.



a) b) c)

Abb. 2.5: *Punktuelle Apparate zum Ernten: a) Zwei-Finger-Greifer aus parallelen Blechen [Tia18], b) V-Griff [Sca09], c) Finger-Greifer mit Lebensmittelgestalt [Dav20]*

In dem Fall von den Apparaten, die von Schneidmechanismen unterstützt werden, kann die Frucht sowohl mechanisch mit einem Zwei- bis Sechs-Finger-Greifer als auch über pneumatische Saugdüsen festgehalten werden [Yan23].

Die Apparate selbst erzeugen keine Kraft, um das Obst oder die Kulturpflanze zu ziehen oder zu trennen. Dementsprechend sind die Eigenschaften und Arbeitsparameter dieser Systeme im Rahmen des Jätens wenig anwendbar. Darüber hinaus stellen Saugmechanismen im Bereich der Vegetationskontrolle eine komplizierte Lösung dar, da der allmähliche Abbau des Unterdrucks auf den vielfältigen Formen und dünneren Oberflächen der Pflanzen mehrere Applikatoren unterschiedlicher Größen erfordert. Daher wurden diese Studien in der Analyse nicht weiter berücksichtigt.

Mechanismen zum Ausreißen von Baumwollstängeln

Nach dem Ernten von Baumwolle bleiben die Stängel im Feld stehen. Diese müssen für die nächste Ernte entfernt werden, um Insektenbefall z.B. durch den Baumwollkapselkäfer zu vermeiden [Ahm20]. Die Problematik dieser Käfer liegt nicht nur in der Gefährdung der Ernte, sondern auch in der Bekämpfung der Insekten selbst, da sie sich in den Baumwollkapseln verstecken und bei der Anwendung von Chemikalien nicht sterben. Darüber hinaus enthalten die Baumwollstängel eine hohe Anzahl an Cellulose-Biomasse und können als Brennstoff gebraucht werden [Sum87].

Um die Baumwollstängel auszureißen wurden Apparate entwickelt, die ähnlich zu dem im Abschnitt 2.2.2 gezeigten Mechanismus, Abb. 2.4.c, vertikale Kräfte über rotierende Zylinder oder Luftreifen ausüben und die Pflanzen auszupfen. Die Systeme sind ebenso motorisiert, enthalten ein bis vier Rollenpaaren und werden in meisten Fällen von einem Traktor gezogen. In dem Fall von Luftreifen liegt der Durchmesser bei ca. 400 mm [Sum87] und die Breite zwischen ca. 160 mm und 200 mm [Maj08]. Die Reifen rotieren um die horizontale Achse und werden in einem Winkel zur Vertikalen positioniert. Stängel mit Durchmessern von ca. 9 mm und Höhen ab ca. 100 mm über dem Boden können von den Reifen gegriffen werden [Sum87].

Im Unterschied zu der Anwendung bei Unkraut, berichten die Arbeiten hier eine Effizienz zwischen 70 % [Maj08] und 97 % [Sum87], welche von Faktoren wie Fahr- sowie Drehgeschwindigkeit abhängt. Der Erfolg des Apparats ist von der richtigen Kombination der Kenngrößen abhängig. Damit beschäftigen sich die Arbeiten [Kem82, Sum87, Ram10, Man04], bei denen neben der Effizienz der Fokus auf der Ermittlung geeigneter Arbeitsparameter liegt.

Kemp et al. und Sumner et al. messen die Ausreißkraft und den Energiebedarf in Bezug auf die Drehgeschwindigkeit und die Presskraft zwischen den Reifen [Kem82, Sum87]. Die Ausreißkraft liegt im Durchschnitt bei 307 N bis 620 N mit einer Eingangsleistung von 1 kW bis 2 kW pro Paar, Drehgeschwindigkeiten zwischen 110 U/min und 160 U/min und einer Presskraft zwischen den

Reifen von ca. 3600 N. Die Drehgeschwindigkeit hat den größten Einfluss auf den Energiebedarf, welcher bei 270 U/min auf 6,4 kW ansteigt. Eine weitere wichtige Erkenntnis ist der einzelne Antrieb eines Rades jedes Paares statt einen Motor für die ganze Reifenreihe einzusetzen. Das beseitigt die Verdrehung des Antriebs durch die Relativbewegung zwischen den Reifen wegen der Unterschiede in Rollradien, Reifendruck und Profiltiefen [Kem82].

Weiterhin untersuchten Manian et al. und Ramadan den Winkel der Reifenposition, der in Versuchen zwischen 10° und 65° variiert wurde [Man04, Ram10]. Am effektivsten zeigte sich in beiden Arbeiten der Bereich zwischen 20° und 45°. Andere Winkelpositionen wie 10° und 65° zeigten im Vergleich zum Ausreißen ohne Winkel keinen Unterschied oder verringern die Effizienz des Apparats. Darüber hinaus berücksichtigte Ramadan in seiner Versuche die Feuchtigkeit der Pflanzen sowie des Bodens [Ram10]. Die Bodenfeuchtigkeit lag bei 11 %, 19 % und 26 %, während die Pflanzenfeuchtigkeit 22 %, 38 % und 60 % betrug. Die höchste Effizienz wurde bei 19 % Boden- und 38 % Pflanzenfeuchtigkeitsgehalt ermittelt.

Allgemein wurden in allen Arbeiten Fahrgeschwindigkeiten zwischen 1 km/h und 8 km/h und Drehgeschwindigkeiten von 100 U/min bis zu 450 U/min erprobt. Die höchsten Effizienten wurden bei Drehgeschwindigkeiten zwischen 110 U/min und 180 U/min in Kombination mit Fahrgeschwindigkeiten von 3 km/h bis zu 4,7 km/h festgestellt.

2.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Literaturrecherche

Aus der Literaturrecherche wurden insgesamt 26 Systeme identifiziert und analysiert: zehn punktuell und drei flächendeckend wirkende Apparate zum maschinellen Jäten, acht Mechanismen zum Ernten, die das Obst oder Gemüse ohne zusätzliche Anlage greifen und abtrennen, und fünf Apparate zum Ausreißen von Baumwollstängeln. Die Eigenschaften und der Entwicklungszustand der Systeme sind in den Tabellen 2.1 bis 2.4 zusammengefasst.

Die Veröffentlichungen bezüglich des Ausreißens von Baumwollstängeln enthalten die meisten Informationen über die Funktionsweise und die effizienten Arbeitsparameter der Apparate, Tab. 2.4, während bei den anderen Systemen mehrere Informationslücken erkennbar sind. Dies spiegelt sich teilweise in den leereren Zellen der Tabellen 2.1 bis 2.3 wider.

In den Arbeiten wird die Größe und der Entwicklungszustand der Systeme dokumentiert. Es wird beobachtet, dass diese Eigenschaften auf den Reifegrad der Technologie hinweisen. Da das Ausreißen des Unkrauts auf großen Flächen im Zweck des maschinellen Jätens ist, erfüllen große Apparate den Zweck

in höherem Grad als Handapparate. Daher wird die Größe in aufsteigender Reihenfolge in Handapparat, Klein- und Großapparat unterteilt. Darüber hinaus müssen kommerzielle Apparate bestimmte Effizienzkriterien aufweisen, um sich auf dem Markt zu positionieren. Obwohl ein System mit kommerziellem Einsatz kein Synonym für fortgeschrittene Entwicklung ist, deutet dieser Zustand in der Regel auf einen höheren Technologiereifegrad hin als bei Apparaten in den ersten Erprobungsphasen. Daher wird der Entwicklungszustand in aufsteigender Reihenfolge von Erprobung im Labor über Erprobung im Feld bis hin zu kommerziell erhältlich angeordnet.

Als Handapparate werden nicht motorisierte Mechanismen bezeichnet, die von Hand betrieben werden. Kleine Apparate sind Systeme, deren Größe und Arbeitsbereich beispielsweise für kleine Flächen oder dünne Einzelpflanzen ausreichend ist. Große Apparate beziehen Systeme ein, die im Gewächshaus oder im Feld für mehrere Stunden arbeiten können. Sie werden häufig von einer mobilen Plattform oder einem Traktor gezogen. Die meisten kleinen und großen Apparate wurden im Labor oder Feld erprobt, und nur etwa 25 % sind kommerziell verfügbar.

Wie in der Tabelle 2.1 dargestellt, befinden sich die Handapparate in einem kommerziellen Zustand. Allerdings ist die Reichweite dieser Mechanismen nur so groß, wie es die menschliche Kraft erlaubt. Die Motorisierung dieser Apparate erfordert die Erprobung von kleinen und großen Systemen, d.h., in diesem Fall entspricht der kommerzielle Zustand keinem hohen Reifegrad des maschinellen Jätens.

Die Apparate zeigen unterschiedliche Arbeitsgeschwindigkeiten. Die Ermittlung eines Bereichs ist wegen der abweichenden Einheiten und Funktionsweisen der Systeme schwierig. Bei den punktuell arbeitenden Apparaten wird die Anzahl der Pflanzen pro Minute oder Sekunde gezählt. Darüber hinaus ist an manchen Stellen der Zeitaufwand zur Bilderkennung zu berücksichtigen. Im Durchschnitt benötigen diese Apparate sowohl zum Jäten als auch zum Ernten 50 s, um das Objekt abzutrennen. Die maximale Geschwindigkeit ist jedoch weit höher als der Durchschnitt (im Schnitt 0,5 s pro Pflanze) und wird von einer kommerziellen Anwendung erreicht [B.V25], welche bis zu 12 Hektar pro Tag in ihrer maximalen Kapazität jätet. Die flächendeckenden Apparate wurden bisher mit Fahrgeschwindigkeiten von 0,64 km/h bis 8 km/h erprobt. Der Durchschnitt liegt bei ca. 3 km/h und die maximale effektive Arbeitsgeschwindigkeit bei 8 km/h [Sum87].

Obwohl wenige Daten bezüglich der Ausreißkraft vorliegen, kann eine große Abweichung zwischen den Angaben ermittelt werden. Die Apparate zum Ernten verweisen auf Kräfte unter 10 N, während die Systeme zum Ausreißen der Baumwollstängel Kräfte von 138 N bis 870 N zeigen. Hier spielt die Pflanzenart

die Hauptrolle. Außerdem wird, wie zuvor bereits erwähnt, die Kraft auf Obst und Gemüse präzise aufgebracht, um Schäden an den Lebensmitteln zu vermeiden.

Zum Energiebedarf wird häufig die Art der Energieversorgung erwähnt, es liegen jedoch wenige Leistungsangaben dazu vor. Es ist zu beobachten, dass viele kleine Apparate vollständig von einer elektrischen 12- oder 24-V-Batterie versorgt werden, was von einem geringen Energiebedarf spricht. Flächendeckende Apparate, die am Traktor montiert sind, werden häufig über die Zapfwelle angetrieben. Geht man davon aus, dass Landmaschinen Diesel als Kraftstoff nutzen, können die angegebenen Liter pro Hektar in MJ pro Hektar umgerechnet werden. Der Durchschnitt liegt hier bei ca. 54 MJ/ha, mit einem Maximum von ca. 80 MJ/ha und einem Minimum von ca. 30 MJ/ha. Für die Berechnung wurde ein Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors von 0,4 und der Energiegehalt von Dieselkraftstoff von 32 MJ angenommen [Sch21]. Im Vergleich zu thermischen Verfahren benötigt das maschinelle Jäten 100- bis 1.000-mal weniger Energie und liegt im Bereich der Laser-Unkrautkontrolle [Col19]. Im Vergleich zu Herbiziden ist der durchschnittliche Energiebedarf des maschinellen Jätens hingegen 3- bis 4-mal höher.

Für die Systeme zum Jäten kommen nur krautige Pflanzen – Pflanzen ohne verholzte Teile – in Frage. Im Gegensatz dazu werden von den Apparaten zum Ausreißen von Baumwollstängeln verholzende bis verholzte Pflanzen behandelt. Im ersten Blick wird das Pflanzenspektrum von den genannten Apparaten vollständig abgedeckt, allerdings erschwert die hohe Anzahl an Wachstums- und Lebensformen der Pflanzen die erfolgreiche Behandlung aller Pflanzenarten. Dieses Thema wird im Abschnitt 2.3.2 weiter erläutert.

Die gesamte Effizienz der Apparate, sowohl beim Jäten als auch bei anderen Anwendungen, wird anhand der erfolgreich ausgerissenen oder abgetrennten Objekte gemessen. Der Durchschnitt liegt bei 85 % mit einem Minimum von 30 % bei der Erprobung eines Systems im Feld [Sim19] und einem Maximum von 100 % bei Laborversuchen [Hai12]. Diese Ergebnisse verdeutlichen den Unterschied zwischen der Erprobung unter kontrollierten Bedingungen im Labor und der Evaluierung eines Systems unter realen Umgebungsbedingungen. Ohne die Laborwerte liegt die Effizienz der Systeme im Durchschnitt bei 81 %. Die Apparate, die am häufigsten auf ihre Effizienz getestet wurden, sind diejenigen zum Ausreißen von Baumwollstängeln. Mehrere Veröffentlichungen berichten von einer Effizienz über 90 % in Feldversuchen [Kem82, Sum87, Ram10].

Tab. 2.1: *Eigenschaften der punktuellen Apparate zum maschinellen Jäten*

Quelle	Werkzeug	Zu-stand	Größe / Gewicht	Arbeits-geschwindigkeit	Zug-kraft	Energie-bedarf	Pflanzengruppe	Effi-zienz
[B.V25]	Drei-FG	K	Groß, bis drei Greifer auf mobiler Plattform, Greifer: 700x700x700 mm, 20 kg	2 Pflanzen/s, 1 - 12 ha/Tag	-	Gesamt 95 W	-	-
[Vis23]	Zwei-FG	EF	Groß, Greifer auf mobiler Plattform, Gesamt: 800×800×500 mm, Greifer: 0,78 kg	6 - 10 Pflanzen/min inkl. Bilderkennung, bis 1,8 km/h	-	Gesamt 24 V	Krautig, 20 - 150 mm, 28,6 - 37,5 Pflanzen/m^2	85% - 92%
[Mic23]	Gabel mit Metallfuß	K	Handapparat	-	-	NM	-	-
[Mic23]	Zwei- bis Fünf-FG	K	Handapparat, 865x180x50 mm, Gewicht: 1,1 kg	-	-	NM	-	-
[Gok19]	Zwei-FG	EL	Klein, Greifer auf mobiler Plattform	-	-	Gesamt 12 V	-	-
[The15]	Zwei-FG	K	Handapparat, 600 - 1430 mm, 2 - 8,4 kg, Greifhöhe: ca. 100 mm	-	-	NM	Verholzt bis ca. 80 mm dick	-
[Erg15]	Feder-Stahl-Spiralen	K	Handapparat, Draht Ø 5 mm, 914 - 1524 mm	-	-	NM	Krautig	-
[Sha15]	Zwei-FG	EF	Klein, Roboterarm auf mobiler Struktur	65 - 258 s/Pflanzen inkl. Bilderkennung	-	-	-	90%
[Kon04]	Zwei FG	EL	Klein, Greifer auf mobiler Plattform	Bis 6,5 km/h	-	-	-	-
[Soo01]	Zwei-FG	K	Handapparat	-	-	NM	Verholzt (Wan-delröschen)	-

Begriffserläuterung: FG = Finger-Greifer; EL = Erprobung im Labor; EF = Erprobung im Feld; K = Kommerziell; NM = Nicht motorisiert

Tab. 2.2: Eigenschaften der flächendeckenden Apparate zum maschinellen Jäten

Quelle	Werkzeug	Zustand	Größe	Arbeitsgeschwindigkeit	Zugkraft	Energiebedarf	Anwendung	Effizienz
[Ima24]	Drehmechanismus mit Pinzetten und Feder, Rotation um horizontale Achse	EF	Klein, von Struktur gezogen, Mechanismus Ø 90 mm, Pinzettenlänge: 37 mm, Max. Öffnungsweite: 6,8 mm, 2,6 kg	1740 U/min	Linear, abhängig von Öffnungsweite: 3,5 N bis 6,5 N	Batterie 12 V	Pflanzendurchmesser: 2 - 3 mm	Meiste Pflanzen abgerissen. Schwierigkeiten beim Greifen, wenn die Pflanzen nicht direkt vor den Pinzetten stehen
[Kum23]	Drei drehende Rotoren mit jeweils acht Klingen, Rotation um vertikale Achse	EF	Groß, vom Traktor gezogen, Rotordurchmesser: 300 mm, Klinge: 80x21 x3,5 mm	180 U/min bei 1,3 - 2,5 km/h	285 N	3,5 L/h inkl. Traktor, 23,2 kW von Zapfwelle	Durchschnittliche Bodenfeuchtigkeit: 17%	84,2% bei 1,3 km/h und 78,8% bei 2,5 km/h.
[Sim19]	Acht Paaren gegenläufige Gummireifen mit Rotation um horizontale Achse	K	Groß, vom Traktor gezogen	50 U/min - 0,64 km/h, 29 U/min - 1,28 km/h	-	-	Krautige Pflanzen: weißer Gänsefuß (1300 - 1500 mm), zurückgebogene Amarant (700 - 1100 mm)	Im Durchschnitt 30%, Max. 48% bei weißem Gänsefuß

Begriffserläuterung: EL = Erprobung im Labor; EF = Erprobung im Feld; K = Kommerziell

Tab. 2.3: *Eigenschaften der Apparate bzw. Endeffektoren zum Ernten*

Quelle	Werkzeug	Zu-stand	Größe	Arbeits-geschwindigkeit	Zug-kraft	Energie-bedarf	Anwendung	Effi-zienz
[FFR20]	Mehrere Drei-FG mit Fruchtdurch-messer	K	Groß, Roboterarm auf mobiler Plattform	-	-	-	Äpfel	-
[Dav20]	Drei-FG mit Fruchtdurch-messer	EF	Klein, nur Roboterarm. Greifer Ø 80 mm, Länge nach Zeigefinger, 0,4 kg	-	ca. 7 N pro Finger	12 V	Äpfel < 0,7 kg	-
[Sep20]	Drei-FG mit Fruchtdurch-messer	EF	Klein, nur Roboterarm (4,4 kg) mit Greifer (Ø 45 - 100 mm, 0,73 kg)	Gesamtzeit: 26 s	40 N	25 W	Aubergine	91,7 %
[Tia18]	Zwei-FG aus Platten	EF	Groß, Roboterarm auf mobiler Plattform	-	1,5 N und 4 N	-	Äpfel, Tomaten, u.a.	-
[Hai12]	Zwei-FG mit Fruchtdurch-messer	EF	Klein, nur Greifer: ca. 90 mm lang, 135 mm breit	Gesamtzeit: 21 - 24 s	-	-	Ananas, Ø 92,4, 134 mm, 0,85 - 1,915 kg	100% (La-bor)
[Alj10]	Zwei-FG	EF	Groß, Roboterarm auf Teleskoplader, Roboterarm: 517 mm lang, 5 kg	Plattform 7 km/h	4 N	Greifer: 96 W	Dattelpalme	-
[Sca09]	Vier V-förmige Greifer	EF	Groß, Roboterarm auf mobiler Plattform, Gesamtsystem: 2300 x 2000 mm, 1500 kg	Plattform 6 km/h, Pflücken: 1 s	-	7 kW, Benzin	Kiwis	-
[Sak08]	Fünf-FG mit Fruchtdurch-messer	EF	Groß, Plattform: 490 x 820 mm, 145 kg, Manipulator: 90 kg, 2800 mm Reichweite	Pflücken 40 s + Ablegen 14 s	Max. 150 N	-	Wassermelone, 6 - 12 kg	86,7%

Begriffserläuterung: FG = Finger-Greifer EL = Erprobung im Labor; EF = Erprobung im Feld; K = Kommerziell

Tab. 2.4: *Eigenschaften der Apparate zum Ausreißen von Baumwollstängeln*

Quelle	Werkzeug	Zu-stand	Größe	Arbeits-geschwindigkeit	Zugkraft	Energie-bedarf	Anwen-dung	Effizienz
[Ram10]	Ein Paar Walzen, 20°, 45° und 65° zur Vertikalen	EF	Klein, manuell geschoben, 75 kg	3,5 - 4 km/h, 180 - 450 U/min	Presskraft über zwei Feder	7,35 kW, 4,7 - 5,5 l/ha	BW, Feuchtig-keit 22 - 60 %	96 % bei 3,5 km/h, 180 U/min, 19 % Boden- und 38 % Pflanzenfeuchtig.
[Maj08]	Luftreifen	K	Groß, vom Traktor gezogen, Reifenbreite: 165 - 205 mm	1,6 - 3,6 km/h, 200 - 270 U/min	-	-	BW	71,22 % bei 270 U/min, 1,6 km/h, 205 mm Breite
[Man04]	Ein Paar Luftreifen, 10°, 20° und 30° zur Vertikalen	EF	Groß, vom Traktor gezogen, Jätsystem: 1050x1575x1150 mm, 232 kg	1,2 - 2 km/h, 140 - 220 U/min	Luftdruck: 2 bar	Von Zapfwelle	BW	86,63 % bei 1,2 km/h, 140 U/min und 30°
[Sum87]	Zwei Paare Luftreifen, 20° zur Vertikalen	EF	Groß, vom Traktor gezogen, Ø 410 mm, 200 mm breit	3,2 - 8 km/h, 110 - 270 U/min	0,138 - 0,614 kN, Luftdruck: 0,69 - 1,24 bar, Presskraft: 2,7 - 3,6 kN	6,4 kW bei 270 U/min und 3,6 kN Presskraft	BW, Ø 9 mm, Greifhöhe: 100 - 150 mm	97 % bei 8 km/h und 270 U/min
[Kem82]	Vier Paare Luftreifen, 45° zur Vertikalen, Einzelmotor	K	Groß, vom Traktor gezogen, Ø 300 mm	4,7 km/h, 135 - 160 U/min, 1,5 - 2,2 ha/h	0,46 - 0,87 kN, Luftdruck: 3,4 - 4,8 bar	6,8 - 15,3 kW, 2 l/ha	BW	>95 %

Begriffserläuterung: EL = Erprobung im Labor; EF = Erprobung im Feld; K = Kommerziell; BW = Baumwollstängel

2.3 Rahmenbedingungen zur Entwicklung eines Systems zum Vegetationsmanagement auf Gleisanlagen

2.3.1 Beschreibung des Gleisbereiches

Der Arbeitsraum für die Vegetationskontrolle im Gleisbereich ist, anders als auf landwirtschaftlichen Flächen, durch die Bahninfrastruktur bzw. das Gleisbett und die Sicherheits- und Kommunikationstechnik definiert. Das entwickelte Jätsystem muss Kollisionen mit im und am Gleis verbauten Bahnkomponenten vermeiden, um sowohl diese als auch sich selbst zu schützen.

Das Gleis hat die Aufgabe, die Fahrzeuge sicher zu führen. Aus dem Zusammenwirken von Fahrzeug und Gleis entstehen Kräfte in vertikaler Richtung durch das Fahrzeuggewicht bzw. die Achslasten und in Längsrichtung durch das Beschleunigen und Bremsen der Fahrzeuge sowie durch Temperaturänderungen der Schienen. In Querrichtung wirken Kräfte durch den Wellenlauf des Radsatzes, Anregungen aus der Gleislage, das Anfahren in Bögen und die Windlasten. Der Gleiskörper muss so dimensioniert und gebaut werden, dass diese dynamischen und statischen Kräfte aufgenommen werden. [Men24]

Das Gleisbett setzt sich, wie in Abb. 2.6 gezeigt, aus Oberbau, Unterbau und Untergrund zusammen. Zum Oberbau gehören die Schienen, Schwellen, Befestigungselemente sowie eine Schicht aus Schotter oder eine feste Fahrbahn aus Beton oder Asphalt [Men24]. Allgemein sind feste Fahrbahnen von der chemischen Vegetationskontrolle ausgenommen und gelten sogar als bauliche Maßnahmen zur Hemmung des Vegetationswachstums [Deu18, Nol18]. Aus diesem Grund werden sie in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Der Unterbau besteht aus der Planums- und der Frostschutzschicht. Die gesamte Konstellation aus Ober- und Unterbau fungiert aus fahrzeugdynamischer Sicht als Feder-Masse-System, in dem das Schotterbett für die Gleiselastizität zur Minimierung der dynamische Kräfte sorgt. Außerdem hat das Schotterbett die Aufgaben, den Schwellendruck möglichst gleichmäßig auf den Untergrund zu übertragen und gleichzeitig einen ausreichenden Widerstand gegen Längs- und Querverschiebungen der Schwellen zu gewährleisten. Darüber hinaus soll das Schotterbett die einfache Wiederherstellung der Gleislage nach einer Veränderung dieser ermöglichen und für die notwendige Luft- sowie Wasserdurchlässigkeit sorgen, um die Tragfähigkeit des Untergrunds zu erhalten. [Lic10]

Die Materialien, Abmessungen und Geometrien der Gleiselemente sind durch Gesetze und Verordnungen geregelt, die abhängig von ihrer Bauart und Betriebsform der Eigentumsverhältnisse und der Verkehrsform variieren [Men24].

Wichtig für die Durchführung der Vegetationskontrolle mittels maschinellem Jäten ist es, die Geometrie der Bereiche sowie die Materialien der Komponenten zu berücksichtigen, um die Pflanzen in den entsprechenden Flächen zu bekämpfen, ohne dabei die Bahnelemente zu schädigen.

In Abb. 2.6 wird der ideale Querschnitt einer eingleisigen Strecken ohne Überhöhung zusammen mit der Fahrzeugbegrenzungslinie G1 und G2 gemäß §22 Abs.1 S.1 EBO dargestellt. Diese Linien geben die Grenze für Fahrzeuge, die sowohl im grenzüberschreitenden Verkehr (G1) als auch im nationalen Verkehr (G2) eingesetzt werden, vor. Alle Anbauten der Fahrzeuge, einschließlich der Aggregate zum Vegetationsmanagement, müssen sich innerhalb dieser Linien befinden, um Kollisionen mit der Umgebung zu vermeiden. Obwohl sich die Linien G1 und G2 unterscheiden, weisen sie im dargestellten Bereich die gleichen Abmessungen auf.

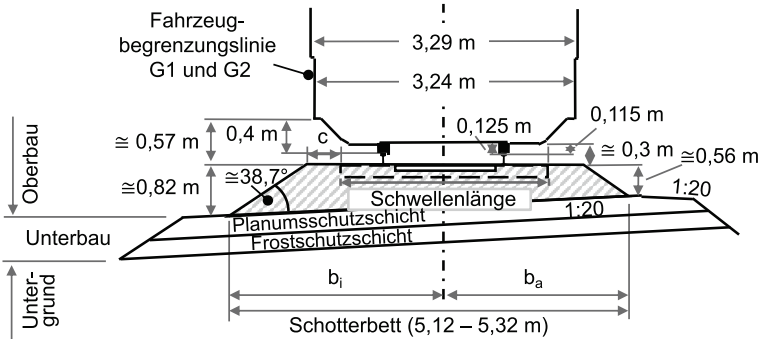


Abb. 2.6: *Aufbau des Gleisbettes mit Fahrzeugbegrenzungslinie in Bezug auf den Gleiskörper einer eingleisigen Strecke. (Eigene Darstellung nach [Men24] und §22 Abs.1 S.1 EBO.)*

Die Abmessungen des Schotterbettes werden nach Geschwindigkeiten unterteilt und orientieren sich an der Schwellenlänge, Tab. 2.5. Der Gleisrost oder Bereich A – nach der UIC-Aufteilung, Abb. 2.1 – hat bei einer Schwellenlänge von 2,6 m eine Breite von ca. 3,2 m bis zu 3,6 m. Die Schotterflanken bzw. Bereich B weisen eine Neigung zwischen 33,7 ° und 38,7 ° auf, was eine Breite von ca. 0,7 m bis zu 1 m und eine Höhe von ca. 0,55 m bis 0,8 m ergibt. Insgesamt beträgt die Breite des Schotterkörpers 5,12 m bis 5,32 m. [Men24]

Die Schwellen können aus Holz, Stahl, Beton oder neuerdings aus Kunststoff bestehen [Men24]. Früher wurden Holzschwellen als Standardbau angewendet, die bei der Deutschen Bahn die Form „B 58“ (Länge: 2,40 m) hatten [Men24]. Mittlerweile werden ausschließlich Betonschwellen eingebaut, die eine längere

Tab. 2.5: *Abmessungen des Schotterkörpers einer eingleisigen Strecke*

v (km/h)	l_{Sch}* (m)	c (m)	b_i (m)	b_a (m)	Gleisbreite (m)
≤ 160	2,6	0,4	2,72	2,4	5,12
> 160	2,6	0,5	2,82	2,5	5,32

*l_{Sch}: Schwellenlänge – Betonschwelle „B 70“ ausgewählt

Lebensdauer und Liegezeit sowie einen höheren Querverschiebewiderstand als Holzschwellen aufweisen [Jä21, Lic10]. Ein Oberbau für hochbelastete Gleise in Deutschland bzw. Gleise mit hohem Verkehr und/oder schwere Zuglasten besteht aktuell aus Betonschwellen der Form „B 70“, deren Länge 2,6 m und Breite 280 mm betragen, Abb. 2.7 [Lic10]. In diesen Gleisen werden die Schwellen mit einem Abstand von 600 mm voneinander positioniert, während der Schwellenabstand in Nebengleisen bei Geschwindigkeiten von bis zu 80 km/h bis zu 700 mm beträgt [Jä21].

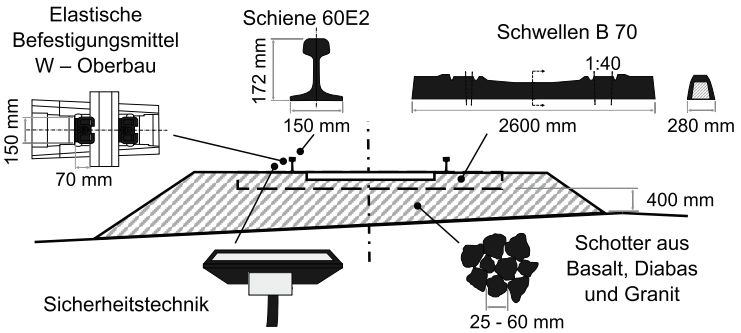


Abb. 2.7: *Komponenten des Oberbaus einer hochbelasteten eingleisigen Strecke. (Eigene Darstellung nach [Men24, Lic10, Fen19].)*

Die Schienen werden auf den Schwellen im Abstand der Spurweite befestigt, die bei den bundeseigenen Bahnen in Deutschland 1435 mm (Normalspur) beträgt. Zusätzlich zur Normalspur können nichtbundeseigene Bahnen eine Schmalspur (750 mm bzw. 1000 mm) besitzen, die häufig unter beengten Bedingungen bei der Trassierung ausgewählt wurde [Men24]. Darüber hinaus werden die Schienen im Gleis nach innen geneigt eingebaut. Als Standardneigung wird in Deutschland 1:40 verwendet, was eine Spurweite von 1435^{-0+3} mm ergibt [Lic10]. In Deutschland sind hauptsächlich die Schienenprofile „UIC 60“, „S 54“ und „S 49“ verbaut, deren Zahlen das Gewicht pro Meter (kg/m) angeben [Jä21]. Das Profil „UIC 60“ weist eine Fußbreite von 150 mm und eine Höhe von 172 mm auf, während die Profile „S 54“ und „S 49“ eine Fußbreite von

125 mm und eine Höhe von 154 mm bzw. 149 mm haben. Auf Hochgeschwindigkeitsstrecken kommt das Schienenprofil des Typs „60 E2“ zum Einsatz, das die gleiche Fußbreite und Höhe wie das Profil „UIC 60“ hat [Fen19]. In den meisten anderen Europäischen Ländern wird in Hauptbahnen weiterhin das Profil UIC 60 verwendet, allerdings unter der neuen Bezeichnung „60 E1“ [Men24]. Schienen werden aus dem so genannten „Schienenstahl“ gefertigt, welcher für die Gleise der Deutschen Bahn mit einer Mindestzugfestigkeit von 880 N/mm^2 (Stahl 900A) gefordert wird [Men24].

Die Schienen werden auf den Schwellen über Schienenbefestigungssysteme angebracht, welche die Schienen gegen Verrutschen und Verformung sichern und die wirkenden Kräfte zur Schwelle übertragen. Auch diese Elemente sind in mehreren Formen und Aufbauten zu finden. Eine wichtige Unterteilung erfolgt in starre und elastische Verbindungen. Eine elastische Befestigung der Schienen sorgt einen hohen Durchschubwiderstand, der der Widerstand in Gleislängsrichtung zwischen Schiene und Schwelle ist. Starre Schienenbefestigungen neigen bei den wirkenden Kräften zur Verformung. Daher werden elastische Elemente bevorzugt. Bei der Anwendung von Betonschwellen werden verdrehfeste und elastische Schienenbefestigungen des Typs „W-Oberbau“ verbaut, die sich aus einer Stahlspannklemme und einer Gummizwischenlage zusammensetzen. Sie belegen am Schienenfuß einen Raum von ca. 70 x 70 x 150 mm (Angabe selbst gemessen). Elastische Verbindungen werden bei Holzschwellen durch den „KS-Oberbau“ erstellt, der ebenfalls eine Stahlspannklemme verwendet. In Deutschland sind jedoch Befestigungssysteme des Typs „K-Oberbau“ (Vorgänger des KS-Oberbaus) bei Strecken mit Holzschwellen weit verbreitet, die aufgrund der Verwendung von Klemmplatten anstelle von Spannklemmen grundsätzlich starr sind. Diese belegen einen Raum am Schienenfuß von ca. 110 x 105 x 160 mm (Angabe selbst gemessen). [Lic10, Kup04, Jä21]

Der Schotter muss ebenso Anforderungen erfüllen, u.a. Wetterbeständigkeit und eine große Druckfestigkeit, und aus scharfkantigem Gestein bestehen. Geeignete Materialien sind Basalt, Diabas und Granit. In Hauptgleisen und Nebengleisen in Deutschland liegt die Größe des Schotters zwischen 25 mm und 60 mm bzw. zwischen 15 mm und 30 mm. Die Bettungsdicke, also der Abstand von der Schwellenunterkante zum Unterbau, hängt vom Schwellenabstand, der Schwellenbreite und dem Reibungswinkel des Schotters ab. Bestehende Strecken haben eine Mindestdicke von 0,3 m, während bei Neubaustrecken eine Dicke von 0,35 m bis zu 0,4 m eingebaut wird. Eine Dicke von 0,4 m ist auf hochbelasteten Strecken vorhanden. [Lic10]

Zusätzlich zu den Bauelementen befinden sich Komponenten der Leit- und Sicherheitstechnik im Gleis. Es handelt sich um Signal- und Erdungskabel, Gleismagnete, linienförmige Zugbeeinflussungssysteme (LZB-Linienleiter), Achszäh-

ler, Gleisstromkreise usw., die allgemein robust und wetterfest sind. Allerdings sind sie nicht nur in unterschiedlichen Geometrien und Größen ausgeführt, sondern oft auch an nicht genau bekannten Positionen im Gleis verbaut. Wichtig ist es, sie zu identifizieren und sie abhängig von der angewendeten Technik zur Vegetationskontrolle zu berücksichtigen.

2.3.2 Unkraut verstehen

Die Bezeichnung von Pflanzen als Unkraut ist in der Agrar- und Unkrautwissenschaft nicht einheitlich. Üblicherweise werden unerwünschte Pflanzen oder Pflanzen, die Schaden verursachen, als Unkraut bezeichnet [Mer19]. Allerdings kann die gleiche Pflanze je nach Bedingungen gewünscht oder unerwünscht sein. Ein deutliches Beispiel dafür sind die Brombeeren *(Rubus fruticosus)*, die im Gleisbereich als Unkraut zählen [Egg01], während sie ebenfalls als Lebensmittel verwendet werden.

Die Bekämpfung der Pflanzen und somit die Entwicklung von Verfahren zur Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen benötigt Verständnis über das Pflanzensystem. Besonders wichtig ist die Kenntnis über die Entstehung, das Wachstum und die Ernährung der Pflanzen, vor allem spezifisch im Gleisbereich.

Struktur und Lebensformen der Pflanzen

Pflanzen besitzen vielfältige Gestalten. Die Makromorphologie beschäftigt sich mit der Studie der Pflanzenformen und deren äußeren Organen. Dabei erfolgt die Kategorisierung der Gestalte durch die Gruppierung der übergeordneten Gemeinsamkeiten. Der grundlegende Aufbau der Pflanzen, ausschließlich der Moospflanzen, besteht aus drei Grundorganen: Wurzel, Spross und Blatt. Dabei bildet die Wurzel das Wurzelsystem und somit einen Ernährungskanal der Pflanze für Wasser und Mineralien aus dem Boden. Der zweite Ernährungskanal entsteht aus dem Sprosssystem, das von der Sprossachse und den Blättern gebildet wird und die Aufnahme von CO_2 aus der Luft und Licht ermöglicht. Bis auf wenige Ausnahmen sind Pflanzen auf beide Systeme angewiesen, da die Systeme nicht ohne einander überleben können. [Nic21, Urr19]

Das Wachstum findet in mehreren Phasen statt. So heißen Blätter in den frühen Wachstumsphasen Keimblätter oder Kotyledonen (aus dem griech. *kotylédon*, Vorwölbung, Abb. 2.8). Pflanzen entwickeln sich aus einem Keimblatt oder aus zwei oder mehreren Keimblättern. Einkeimblättrige Pflanzen werden auch als Monokotyledone bezeichnet, bekommen parallele Blätter und verbleiben in der Regell als Krautpflanzen bzw. entwickeln keine verholzten Teile. Als typisches Beispiel sind Gräser zu nennen. Zweikeimblättrige Pflanzen werden auch als Dikotyledonen bezeichnet. Die Blätter enthalten zwei Oberflächen, die sich in

der Mitte treffen und sich in Aussehen und Struktur voneinander unterscheiden, so wie ein gewöhnliches Blatt. Dykotyledone wachsen sowohl krautig als auch verholzt. [Nic21, Urr19]

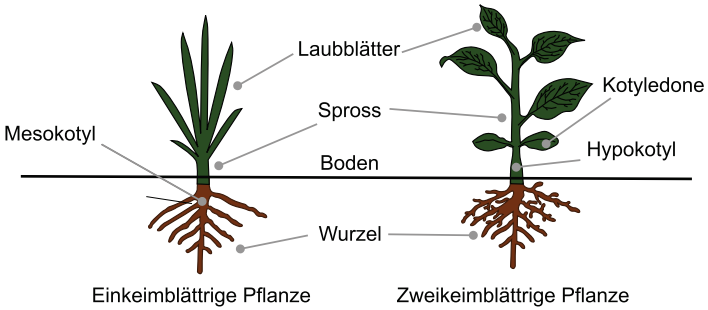


Abb. 2.8: *Ein- und Zweikeimblättrige Pflanzen im vegetativen Stadium (Eigene Darstellung nach [Nic21, Mer19])*

Sowohl bei Monokotyledonen als auch bei Dykotyledonen werden Spross und Wurzel durch den Wurzelhals verbunden. Zwischen dem Wurzelhals und den Kotyledonen befindet sich bei einkeimblättrigen Pflanzen das Mesokotyl bzw. bei zweiblättrigen Pflanzen das Hypokotyl. Werden diese Organe beschädigt, werden Wurzel- und Sprosssystem voneinander getrennt und die Pflanze stirbt ab. [Nic21, Mer19]

Darüber hinaus werden Pflanzen auch nach ihrem Lebenszyklus unterteilt. Dieser umfasst die Keimung, die Wachstumsphase, die Blüte, den Samenansatz und das Absterben. Pflanzen, die ihren Lebenszyklus in weniger als einem halben Jahr bzw. in einer Vegetationsperiode abschließen, werden als einjährige Pflanzen bezeichnet. Die Überlebensstrategie dieser Arten ist ihre massive Samenproduktion. Wenn der Lebenszyklus über zwei Vegetationsperioden stattfindet bzw. der Lebenszyklus eine vegetative Überwinterungsphase enthält, werden die Pflanzen zweijährig genannt. Ähnlich wie bei den einjährigen Pflanzen findet hier eine hohe Samenproduktion zur Ausbreitung der Arten statt. Pflanzen, deren Lebenszyklus innerhalb einer Vegetationsperiode durchlaufen wird, jedoch nicht absterben und mehrere Jahre leben, werden als ausdauernd bezeichnet. Beispiel dafür sind viele Gräser, aber auch alle Holzgewächse, also Bäume und Sträucher. [Mer19, Urr19]

Zusätzlich zu der Länge des Lebenszyklus liegt die Widerstandsfähigkeit der Pflanzen an der Position des Hypokotyls oder des Mesokotyls. Bei einjährigen Pflanzen ist das Hypokotyl während des gesamten Lebenszyklus in der

Pflanzenoberfläche vorhanden, während ein deutlich definiertes Hypo- oder Mesokotyl bei vielen zweijährigen und den meisten ausdauernden Pflanzen verschwindet, sobald die Pflanze wächst. Daher sind einjährige Arten bei mechanischen Vegetationskontrollen besonders empfindlich. [Mer19]

Wachstumsbedingungen im Schotterbett und Entwicklung der Pflanzenarten

Neben den Pflanzenmerkmalen hängt das Pflanzenwachstum vom Standort ab. Das Schotterbett bietet durch die Wasserdurchlässigkeit seiner Materialien einen trockenen Standort. Außerdem enthält der Unterbau des Gleisbettes ein Quergefälle von 5 % und wird mit der Planums- und der Frostschutzschicht gebaut, die etwa 90 % des Oberflächenwassers zur Seite ableitet und wasserempfindliche Untergründe schützt, Abb. 2.6. Darüber hinaus verhindert diese Schicht die Vermischung des Schotters mit dem Unterbau und das Aufsteigen von Feinmaterial in den Schotter. [Men24, Lic10]

Deshalb etablieren sich auf dem Schotterkörper nur anpassungsfähige Pflanzenarten mit geringen Nährstoffansprüchen, da Nährstoff nur in geringen Mengen aus der Atmosphäre, der Alterung der Bahninfrastruktur und aus durch Wind und Niederschlag herausgelösten Materialien entsteht und zusätzlich vom Niederschlag selbst ausgewaschen wird. Allerdings steht durch die Mineralisierung von Pflanzenresten im Schotterbett neuer Nährstoff zur Verfügung. [Egg01, Fen19]

Eggers et al. haben 187 verschiedene Arten identifiziert, von denen 84 auf der Fläche zwischen den Schienen, 113 auf den Schotterbänken und 166 auf dem Weg neben dem Schotterbett registriert wurden [Egg01]. Davon waren 26,7 % einjährige Pflanzen, 2,1 % zweijährige Pflanzen, 56,1 % krautige ausdauernde Pflanzen und 15 % Holzgewächse (auch ausdauernde Pflanzen). Da die mechanischen Eigenschaften der Pflanzen den Erfolg des maschinellen Jätens beeinflussen und je nach Pflanzenart variieren, soll die Pflanzenart daher bei der Bewertung der Systemperformanz berücksichtigt werden [Arc23].

3 Zielsetzung und Methodik

Das maschinelle Jäten ist ein herbizidfreies Verfahren, das auf ein breites Spektrum von Pflanzengrößen und -arten anwendbar ist. Das Verfahren ermöglicht die Wirkung auf die Wurzeln, ohne dass ein Eingriff des Mechanismus im Boden erforderlich ist, und es zeigt einen geringeren Energiebedarf als thermische Verfahren. Diese Eigenschaften machen das maschinelle Jäten geeignet für die Behandlung von Pflanzen im Schotterkörper.

Im Kapitel 2 wurden die unterschiedlichen Apparate zum maschinellen Jäten sowie die Rahmenbedingungen für das Vegetationsmanagement auf dem Schotterbett behandelt. Im Folgenden werden die Ziele und das Vorgehen dieser Arbeit vorgestellt, wobei die Auswahl des zu entwickelnden Systems begründet und die Konstruktionsmethode erläutert wird.

3.1 Aufgabenstellung und Vorgehen

Wie in den Abschnitten 2.2.1 bis 2.2.3 gezeigt wird, können in der Literatur unterschiedliche Ansätze des maschinellen Jätens gefunden werden, allerdings findet keiner Einsatz im Eisenbahnbereich. Die Apparate zum maschinellen Jäten werden punktuell oder flächendeckend in der Landwirtschaft angewendet. Ein System, das eine Effizienz zwischen 70 % bis 97 % beim Ausreißen von Baumwollstängeln erreicht, besteht aus gegenläufig rotierenden Luft- oder Gummireifen, die das Unkraut ausreißen, Abb. 2.4.c. Durch die kontinuierliche und flächendeckende Rotation der Reifen wird im Vergleich zu punktuellen Jätsystemen, z. B. robotischen Greifern, eine höhere Arbeitsgeschwindigkeit ermöglicht. Darüber hinaus ist der Aufbau der Maschine robust und die Steuerung unkompliziert. Da die Vegetationskontrolle im Gleisbereich über viele Kilometer und bei unterschiedlichen Wetterbedingungen mit geringem Wartungsaufwand durchgeführt werden muss, sind diese Eigenschaften des Systems von Vorteil. Dementsprechend wird im Rahmen dieser Arbeit dieser Apparat zur Entwicklung des maschinellen Jätens im Gleisbereich ausgewählt.

Die ausgewählte Technologie behandelt hauptsächlich Baumwollstängel auf dem Erdboden, und ihre Arbeitsparameter sind für diese Anwendung effektiv. Die Entwicklung des Apparates für den Gleiskörper erfordert die Erprobung des Wirkprinzips nicht nur mit verholzten Pflanzen wie Baumwollstängeln, sondern auch mit krautiger Vegetation, die innerhalb eines Jahres gewachsen ist und andere mechanische Eigenschaften aufweist (Abschnitt 2.3.2). Sie kann

einen anderen Effekt beim Zupfen haben und dementsprechend andere Arbeitsparameter erfordern. Darüber hinaus, wie im Abschnitt 2.3.1 beschrieben, setzt sich das Gleisbett aus Schotter zusammen, der tiefe Pflanzenwurzeln ermöglicht und teilweise die Pflanzensprosse begräbt sowie vor dem Jäten schützen könnte. Außerdem weist der Schotterkörper eine definierte Geometrie und dort installierte technische Komponenten auf, die bei der Behandlung der Vegetation nicht beschädigt werden dürfen.

Daher ist das Ziel dieser Arbeit, das Verfahren des maschinellen Jätens in Form von gegenläufig drehenden Rollen für die Vegetationskontrolle im Schotterkörper (Bereiche A und B in Abb. 2.1) zu entwickeln und auf seine Effizienz und Eignung gegenüber der unterschiedlichen Vegetation und Infrastruktur des Gleisbereiches zu erproben und zu bewerten. Ebenfalls soll die langfristige Wirksamkeit des Verfahrens in Versuchen evaluiert werden, um eine erste Einschätzung der Anwendungsfrequenz für den Einsatz des Verfahrens zu geben.

Entsprechend dieser Ziele erfolgt im Weiteren die Entwicklung eines Apparats zum maschinellen Jäten auf dem Schotterbett. Im ersten Schritt der Verfahrensentwicklung erfolgt die Auslegung des Systems (Kapitel 4). Dazu wird der Produktentwicklungsprozess nach Pahl und Beitz [Ben21] angewendet (Abschn. 3.2) und durch experimentelle Untersuchungen der Arbeitsparameter des Systems ergänzt. Es wird ein Kleinprobenprüfstand für die Erprobung der Technologie im Labor und auf dem Gleis gebaut. Der Prüfstand ermöglicht es, das Verfahren in unterschiedlichen Einstellungen, beispielsweise Höhe, Position und Drehgeschwindigkeit der Rollen, zu evaluieren.

Anschließend wird mit den gewonnenen Erkenntnissen ein Erprobungsträger für flächendeckende Versuche im Gleisbereich entwickelt (Kapitel 5). Dieser ist nicht nur für die Erprobung der Rollen zum maschinellen Jäten geeignet, sondern auch für das Elektroweeding und das Verfahren des Hochdruckwasserstrahls – die zwei weiteren herbizidfreien Verfahren, die zusammen mit dem maschinellen Jäten innerhalb des Projekts „Entwicklung eines Alternativverfahrens zur chemischen Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen“ untersucht wurden [Arc26]. Das Jätsystem wird in unterschiedlichen Einstellungen, wie beispielsweise mehreren Arbeitsgeschwindigkeiten im Gleis, erprobt. Die Ergebnisse der Systemwirkung sowie die Bewertung weiterer Aspekte wie Energiebedarf, Einfluss auf Infrastruktur, Arbeitsschutz werden ebenfalls in diesem Kapitel beschrieben. Die Ergebnisse zur Erprobung des Elektroweedings sowie des Wasserstrahls sind im Abschlussbericht des Projekts dokumentiert.

Weiterhin wird eine dreijährige Beobachtung des Pflanzenwachstums im Gleisbereich zur Einschätzung der Anwendungsfrequenz und der langfristigen Wirksamkeit der Technologie durchgeführt. Diese wird im Kapitel 6 erläutert. Dafür

werden unterschiedliche Pflanzenarten und Flächen des Schotterbettes ausgewählt und manuell ausgerissen oder geschnitten, sobald die Pflanzen eine bestimmte Höhe erreichen. Die Dokumentation des Pflanzenwachstums wird monatlich durchgeführt.

Insgesamt werden bei den Versuchen im Gleisbereich (Kapitel 4,5 und 6) fünf Streckenabschnitte innerhalb eines Radius von ca. 50 km von Aachen benötigt, deren Eigenschaften sowie die wachsende Vegetation regelmäßig beobachtet werden. Abb. 3.1 zeigt die Standorte der Versuchsstrecken.

Kapitel 7 fasst die relevanten Aspekte und Ergebnisse der Systementwicklung zusammen und gibt einen Ausblick auf die Optimierungsmöglichkeiten des maschinellen Jätens für seine weitere Anwendung.

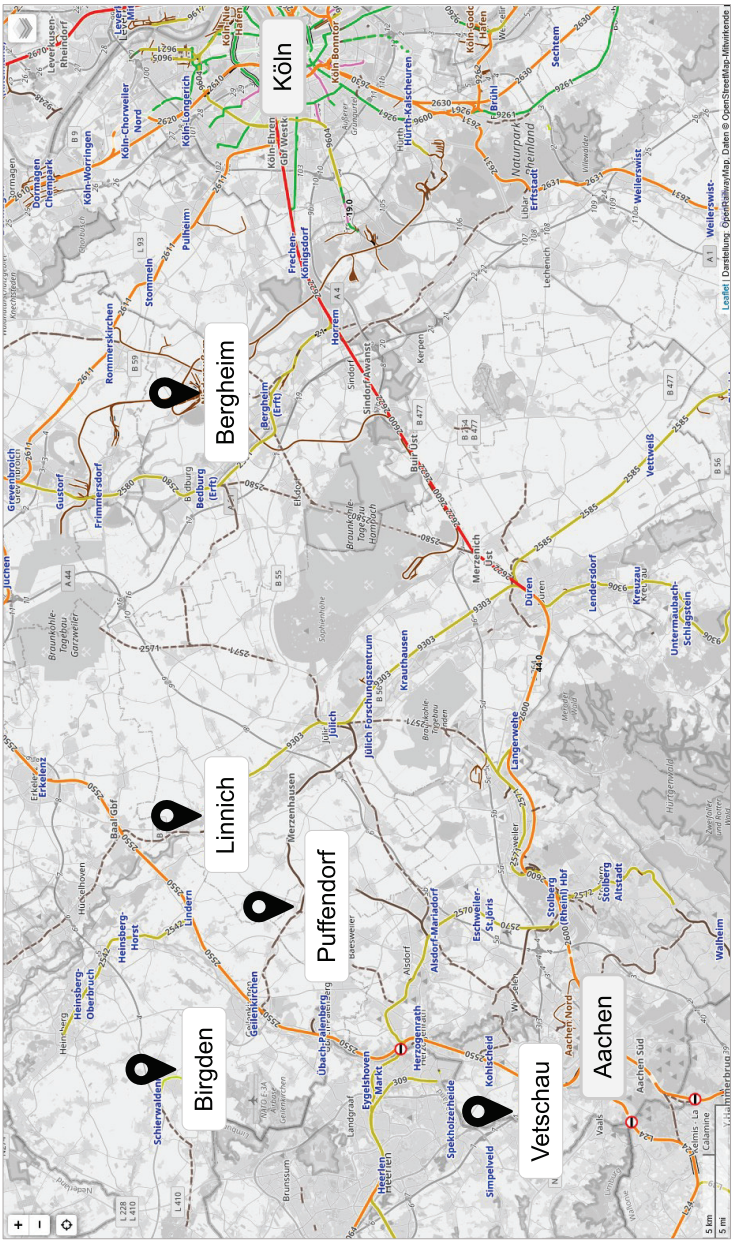


Abb. 3.1: Standorte der Versuchsstrecken zur Untersuchung des maschinellen Jätens

3.2 Methodik der Arbeit - Grundlage des methodischen Konstruierens

Bei der Entwicklung des Systems zum maschinellen Jäten wurde der Prozess nach Pahl und Beitz [Ben21] angewendet. Ein solcher systematischer Ansatz während der Entwicklung unterstützt dabei, Entscheidungen zu treffen und Ergebnisse zu bewerten. Dies hat sowohl eine technische als auch eine wirtschaftliche Bedeutung. Ca. 70 % der Produktkosten werden während der Entwicklung und Konstruktion festgelegt, während durch diese Arbeitsschritte nur etwa 9 % der Gesamtkosten entstehen [Ehr20]. Auch Fehler, die insbesondere in den Entwicklungs- und Konstruktionsphasen auftreten, zeigen sich häufig erst in späteren Phasen der Produktentwicklung. Sie führen zu Änderungen oder Reparaturen von Unzulänglichkeiten, die ebenso die Kosten erhöhen können [Rei96].

Im Gegensatz zu anderen Entwicklungsprozessen bietet der Prozess nach Pahl und Beitz ein übersichtliches Vorgehen und eine einfache Verknüpfung der Arbeitsschritte. Der Prozess besteht aus vier Phasen und liefert in jeder Phase ein Arbeitsergebnis, das als Basis für die nächste Phase dient. Abb. 3.2 zeigt die Arbeitsschritte, die sich in die *Spezifikationsphase*[1], die *Konzeptphase*, die *Gestaltungsphase*[2] und die *Ausarbeitungsphase* aufteilen. Eine strikte Trennung der Arbeitsphasen ist im Prozess nicht vorgegeben. Nicht optimale Ergebnisse werden durch einen Iterationsprozess verbessert, das heißt, es wird zwischen den Arbeitsschritten vor- und zurückgesprungen.

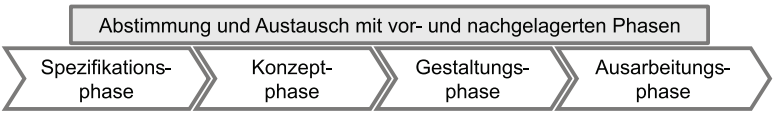


Abb. 3.2: *Phasen des Produktentwicklungsprozesses nach Pahl und Beitz [Sch12, Ben21]*

In der *Spezifikationsphase* wird die Aufgabe geklärt und präzisiert. Als erster Schritt werden der Produktzweck sowie die Rahmenbedingungen für die Entwicklung des neuen Produkts formuliert. Wie im Kapitel 2 gezeigt wird, haben bisher Rollen zum maschinellen Jäten ausschließlich ihre Anwendung in der Landwirtschaft gefunden. Diese Ansätze haben den Zweck, Unkraut zu entfernen und Kulturpflanzen zu schützen oder verholzende Baumwollstängel auszureißen, wobei Umgebungsbedingungen wie Bodenbeschaffenheit berücksichtigt werden. Deshalb wird die Aufgabe in der Spezifikationsphase

[1] Bei Pahl/Beitz: Planungs- und Klärungsphase
[2] Bei Pahl/Beitz: Entwurfsphase

für den Gleisbereich neu definiert. Mit der Formulierung des Zwecks und der Vorgaben für den Einsatz auf dem Schotterkörper wird die *Anforderungsliste* erstellt (siehe Abschnitt 4.2).

In der *Konzeptphase* wird nach Lösungen für die gestellte Aufgabe gesucht und ein Konzept bzw. eine Prinziplösung erarbeitet. Daher ist in dieser Phase ein hohes Maß an Kreativität erforderlich. Auf Basis des Produktzwecks und der Anforderungsliste werden die Systemfunktionen weiter präzisiert und in Teilfunktionen gegliedert. Die gesamte Konstellation wird in einer Funktionsstruktur zusammengefasst. Diese bietet die Möglichkeit, jede Teilfunktion separat zu betrachten und passende Teillösungen dafür zu finden. Die Lösungssuche kann von recherchierenden Methoden, wie der Analyse bekannter technischer Systeme, heuristischen Methoden, wie dem Brainstorming, und diskursiven Methoden, wie der Anwendung von Konstruktionskatalogen unterstützt werden. [Sch12]

Im Abschnitt 4.3 beschäftigt sich diese Arbeit mit der Konzeptionierung eines Apparates zum maschinellen Jäten, der in Versuchen auf dem Gleis erprobt werden soll. Die Teillösungen werden anhand der Anforderungsliste und experimenteller Untersuchungen bewertet. Daraus wird eine Gesamtlösung ausgewählt und mithilfe von Skizzen konzipiert. Anforderungen, die bislang unzureichend definiert sind, werden experimentell ermittelt und anschließend präzisiert. Dabei werden sowohl Anforderungen an die geeigneten Arbeitsparameter als auch an die Umsetzung des Arbeitsprinzips des maschinellen Jätens einbezogen.

In der *Gestaltungsphase* wird das Konzept vollständig konstruiert und sukzessive mit den zugehörigen Berechnungen und/oder Versuchen verifiziert [Sch12]. Dazu gehört die Modellierung von Baugruppen und Bauteilen sowie deren logische Verknüpfung über die Produktstruktur. Die Produktgestaltung ist ein iterativer Prozess, der grob beginnt und schrittweise verfeinert wird. Nach der Gestaltung folgt die *Ausarbeitungsphase*, in der die technischen Unterlagen zur Fertigung, Montage sowie zum Transport und Betrieb erstellt und für die Produktion bzw. Beschaffung freigegeben werden [Ben21]. In dieser Arbeit wird das in der Konzeptphase festgelegte Modell des maschinellen Jätens zusammen mit einer tragenden Struktur vollständig konstruiert und durch Berechnungen überprüft. Weiterhin wird die Produktdokumentation zur Fertigung ausgearbeitet.

4 Entwicklung des Systems zum maschinellen Jäten

Ein systematisches Vorgehen während der Produktentwicklung unterstützt die Bewertung von Lösungen und somit die Entscheidungsfindung während des Konstruktionsprozesses. Daher erfolgt in diesem Kapitel die Entwicklung des Systems zum maschinellen Jäten nach dem Vorgehen des methodischen Konstruierens von Pahl und Beitz [Ben21], wobei zunächst die Funktionsweise des zu entwickelnden Apparats erläutert und danach die Bearbeitung der ersten beiden Phasen des Prozesses im Detail erklärt wird. Die Entwicklung umfasst die experimentelle Erprobung der Systemfunktionen im Labor und auf dem Gleisbett. Am Ende des Kapitels wird das Gesamtkonzept für die weitere Gestaltung und den Bau vorgestellt.

4.1 Funktionsweise des Jätsystems

Der Mechanismus zum maschinellen Jäten besteht aus zwei rotierenden gegenläufigen Rollen. Abb. 4.1 zeigt das Arbeitsprinzip. Durch das Zusammenwirken der Rotation der Rollen und der Presskraft F_N zwischen ihnen wird eine Zugkraft F_Z über Reibung μ auf das Unkraut ausgeübt. Der Punkt, an dem sich die Rollen berühren, dient als Greifpunkt der Pflanzen, d. h., das Unkraut muss diese Höhe erreichen, um von dem System eingezogen zu werden.

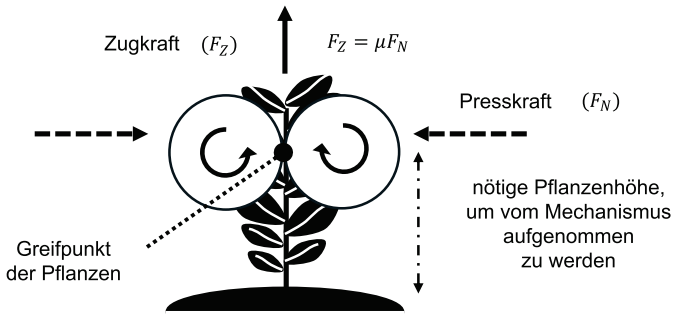


Abb. 4.1: *Darstellung des Arbeitsprinzips des maschinellen Jätens*

Neben den Zug- und Presskräften sowie dem Reibungskoeffizient sind für das Ausreißen auch die Dreh- und Fahrgeschwindigkeiten sowie die Position und Größe der Rollen, wie beispielsweise Neigungswinkel, Breite und Durchmesser

wichtig. Laut [Ram10, Kem82, Sum87, Man04] liegt der Erfolg der Methode daran, eine geeignete Kombination der technischen Parameter auszuwählen, die auch von der Pflanzen- und Bodenfeuchtigkeit beeinflusst werden [Ram10]. Diese Parameter sowie ihre Einsatzwerte werden für die Entwicklung des Systems berücksichtigt und erprobt.

4.2 Spezifizierung der Systemanforderungen

Im Rahmen des Entwicklungsprozesses werden in der Spezifikationsphase der Zweck des Produkts und die Anforderungen festgelegt [Ben21]. Das System hat den Zweck, das Unkraut im Gleis mit drehenden Rollen zu jäten. Daher ergeben sich die Anforderungen für die Entwicklung des maschinellen Jätens aus den zu bekämpfenden Pflanzen, dem Arbeitsumfeld und der Funktionsweise des Systems.

Im Abschnitt 2.3.2 wurde die sich im Schotterbett auf deutsche Gleise befindliche Vegetation beschrieben. Diese besteht aus sowohl krautiger als auch verholzenden bis verholzten Pflanzen, deren Höhe von unterhalb der Schienenoberkante (172 mm über Schwelle bei Schienenprofil 60E2) bis etwa 1 m reicht. Obwohl Unkräuter auf Bahngleisen große Pflanzenhöhen erreichen können, kann eine Höhe von über 0,3 m bereits problematisch sein, da die Pflanze in die Fahrzeugbegrenzungslinie hineinragen könnte, Abb. 2.6. Daher werden die Pflanzen klein gehalten, sodass in der Systementwicklung auch geringere Wuchshöhen berücksichtigt werden müssen.

Im Bezug auf das Arbeitsumfeld wurden im Abschnitt 2.3.1 die technischen Gegebenheiten des Schotterbettes erläutert. Hier sind die Abmessungen der baulichen Komponenten des Schotterbettes sowie deren Materialien, die entscheidenden Aspekte für die erste Erprobung der Systemfunktion. Obwohl die Eisenbahninfrastruktur eine Vielzahl elektrischer Komponenten sowie Sicherheits- und Kommunikationstechnik umfasst, spielen diese für die erste Systemerprobung eine untergeordnete Rolle. Dies liegt daran, dass Anschlussgleise, Museumsbahnen und stillgelegte Strecken als Teststrecken genutzt werden, wobei in der Regel keine oder nur wenige Signal- und Sicherheitseinrichtungen vorhanden sind.

An sich gibt es keine gesetzlichen Vorschriften für das Vegetationsmanagement im Gleisbereich. Eisenbahnen sind gemäß § 4 Abs. 3 S. 2 AEG verpflichtet, die Eisenbahninfrastruktur sicher zu bauen und in einem betriebssicheren Zustand zu halten. Daher gelten nationale (in diesem Fall deutsche) und europäische Normen und Verordnungen für den Bahnbetrieb, wie der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung [EBO] aber auch interne Richtlinien abhängig vom Eisenbahnbetreiber. Zusätzlich werden Anforderungen zum Schutz der Mitarbeitende

und der Umwelt, beispielsweise durch das Arbeitsschutzgesetz [Arb] und das Bundesnaturschutzgesetz [BNa], vorgegeben.

Allgemein sollte bei der Entwicklung die Fahrzeugbegrenzungslinie gemäß §22 Abs.1 S.1 EBO berücksichtigt werden, da sie die Sicherheit des an das Gleis grenzenden Raums und des fahrenden Systems gewährleistet. Dennoch stellt sie eine Herausforderung für die Ermittlung der Wirksamkeit des maschinellen Jätens sowie allgemein der Alternativverfahren dar, da das Wirkprinzip dieser Verfahren den Kontakt oder einen kurzen Abstand zu den Pflanzen erfordert. Daher wird die Fahrzeugbegrenzungslinie in dieser Arbeit zunächst nicht berücksichtigt, damit die Systemfunktionen sowie der Einfluss der Methode auf die Infrastruktur untersucht werden können.

Ebenfalls wurden die Arbeitsparameter aus der Literatur [Ram10, Kem82, Sum87, Man04] als Referenz herangezogen und in der Anforderungsliste aufgeführt. Diese werden in den folgenden Bereichen erprobt [Pan23]:

- Zugkraft von 138 N bis 870 N
- Presskraft von 270 N bis 360 N
- Fahrgeschwindigkeit von 1 km/h bis 8 km/h
- Drehgeschwindigkeit von 100 U/min bis 450 U/min
- Rollendurchmesser größer als 300 mm
- Neigungswinkel zur Vertikalen zwischen 10° und 65°
- Rollenbreite von 160 mm bis 200 mm

Als Hilfemaßnahme zur Ermittlung von Anforderungen wurden die Methoden der Szenariotechnik sowie der Hauptmerkmale genutzt, bei denen der Produktlebenszyklus sowie die Systemeigenschaften analysiert und daraus Anforderungen ermittelt werden [Ben21]. Weiterhin wurden sie detailliert und quantifiziert. Die vollständige Liste besteht aus etwa 50 Anforderungen und befindet sich im Anhang A.

Für die weitere Entwicklung des Systems wurden die Kriterien in Forderungen und Wünsche unterteilt. Forderungen sind zwingende Anforderungen, die von den vorgeschlagenen Lösungen erfüllt werden müssen, andernfalls können diese Lösungen bei der Systementwicklung nicht berücksichtigt werden. Die Forderungen resultieren häufig aus gesetzlichen Vorgaben oder Normen oder dienen der Sicherheit der Mitarbeitende sowie der Erfüllung der Grundfunktionen der Anlage. Im Gegensatz dazu müssen Wünsche nicht vollständig von den Lösungen erfüllt werden, dennoch trägt ihre Berücksichtigung zum Erfolg des

Tab. 4.1: *Systemanforderungen zur Wirksamkeit (Wi) und technischen Umsetzbarkeit (Tk)*

No.	Anforderung
Wi01	Bekämpfung von Vegetation mit einer Pflanzenhöhe unter und über der Schienenoberkante
Wi02	Bekämpfung von Wurzeln und Pflanzenteile
Wi03	Wirksamkeit gegenüber krautiger Vegetation
Wi04	Wirksamkeit gegenüber verholzenden bis verholzten Pflanzenteilen
Wi05	Wirksamkeit unabhängig von Wetterlagen und Jahreszeiten
Tk01	Flächendeckende Behandlung des Schotterbettes
Tk02	Flexibilität in der Anwendung auf enger Arbeitsbreite
Tk03	Behandlung von unebenen Flächen
Tk04	Geringer Energiebedarf
Tk05	Geringe Anwendungsfrequenz
Tk06	Hohe Arbeitsgeschwindigkeit
Tk07	Berücksichtigung der Gegebenheiten im Bahnsteigbereich
Tk08	Behandlung des Schotterbettes vom Fahrzeug aus möglich, ohne die Fahrzeugbegrenzungslinie zu verletzen
Tk09	Erzeugung einer genügend großen Ausreißkraft
Tk10	Eingriff des Mechanismus möglichst nah am Boden
Tk11	Verstellbarer Winkel des Rollenarms
Tk12	Einstellbare Drehgeschwindigkeit der Rollen
Tk13	Genügend Rollenbreite, um die Pflanzen zu erfassen
Tk19	Einfache Montage und Tausch von Teilen (vor allem von Rollen)
Tk20	Berücksichtigung der Geometrie der Schienen für die Konstruktion des Trägermoduls und die Anordnung der Applikatoren
Tk23	Einheitliche Steuergrößen für verwendete Aktuatoren
Tk24	Verwendung von möglichst recyclebaren Materialien
Tk25	Genauigkeit in der Anwendung trotz Fahrdynamik und Trassierung
Tk26	Zweirichtungsbetrieb ermöglichen
Tk27	Mögliche Ausschaltung des Verfahrens bei Flächen ohne Vegetation

Systems bei. Diese Wünsche stehen oft im Einklang mit der Funktionalität des entwickelten Systems und dienen als Maßstab für die Bewertung der Lösungen. Tabelle 4.1 präsentiert die Anforderungen in vereinfachter Form, die als Wünsche klassifiziert wurden. Sie entsprechen der gewünschten Wirksamkeit „Wi“ und der technischen Umsetzbarkeit „Tk“ des Systems.

4.3 Konzeptionierung des Jätsystems

4.3.1 Funktionsstruktur des Jätsystems

Aus der Anforderungsliste werden die Kriterien extrahiert, die eine Funktion entsprechend dem Systemzweck vorgeben. Das sind beispielsweise „Tk09 - Erzeugung einer genügend großen Ausreißkraft“ oder „Tk12 - einstellbare Drehgeschwindigkeit der Räder“. Die Funktionen werden gesammelt und anhand des Arbeitsablaufs oder der Produktstruktur angeordnet und dargestellt. Die Konstellation wird Funktionsstruktur genannt [Ben21]. Für den Apparat zum maschinellen Jäten wurde diese in Abb. 4.2 als Baumdiagramm definiert.

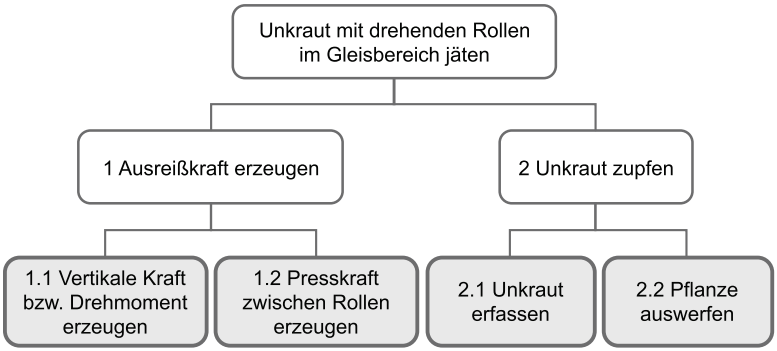


Abb. 4.2: *Funktionsstruktur des maschinellen Jätens*

In diesem Fall umfasst die Funktionsstruktur drei Ebenen. Auf der ersten Ebene steht der Zweck des Apparats zum maschinellen Jäten, der im Rahmen der Funktionsstruktur als Gesamtfunktion bezeichnet wird. Weiterhin wird die Gesamtfunktion in Teilfunktionen unterteilt, welche hier gemäß dem Arbeitsablauf des Jätens angeordnet sind: Ausreißkraft erzeugen und anschließend die Pflanze zupfen.

Eine Funktionsstruktur kann eine beliebige Anzahl von Ebenen und Teilfunktionen enthalten. Für die Konstruktion ist es wichtig, dass die Struktur übersichtlich und lösungsneutral definiert wird, um Objektivität und Flexibilität für

die nächsten Schritte, beispielsweise die Lösungssuche, zu gewährleisten. Zur Entwicklung des Systems zum maschinellen Jäten werden geeignete Teillösungen für die Teilfunktionen der tiefsten Ebene gesucht, bewertet und ggf. bei offenen Fragen experimentell getestet und ausgewählt.

Die Teilfunktion *1.1 Vertikale Kraft bzw. Drehmoment erzeugen* weist auf die Drehung der Rollen hin, die initiiert werden soll und mit ausreichend Drehmoment erfolgen muss, um das Unkraut auszureißen. Hier werden Antriebsmöglichkeiten sowohl hinsichtlich der Art der Antriebe als auch ihrer physikalischen Anordnung im System vorgeschlagen. Zu diesem Teil sind die Informationen aus der Literatur ausreichend, sodass keine Versuche unternommen werden müssen. Allerdings wird die erforderliche Ausreißkraft typischer Pflanzen des Gleisbereiches experimentell ermittelt, um einen Motor mit genügend Drehmoment auszuwählen.

Bei der Durchführung der Teilfunktion *1.2 Presskraft zwischen Rollen erzeugen* handelt es sich darum, den Kontakt zwischen den Rollen während des gesamten Unkrautzupfprozesses aufrechtzuerhalten. Verlieren die Rollen den Kontakt, wird keine Zugkraft zum Ausreißen der Pflanze erzeugt. Flexible oder starre Verbindungen sind denkbar, jedoch hängen sie von der Dicke und der Flexibilität der Pflanzen sowie von der Geometrie und dem Material der Rollen ab. Daher sollen die Lösungsauswahl und die Ermittlung der erforderlichen Presskraft auf Basis von Versuchen getroffen werden.

Die Teilfunktion *2.1 Unkraut erfassen* wird hauptsächlich von den Rollen ausgeübt. In der Literatur werden für diese Aufgabe fast ausschließlich Luft- oder Gummireifen eingesetzt [Sim19, Kem82, Sum87, Man04], allerdings sind sie nur mit relativ großem Durchmesser auf dem Markt erhältlich und können dementsprechend nur mit einem großen Abstand zum Boden positioniert werden, was ungünstig ist, um Unkraut mit niedriger Wuchshöhe zu zupfen. Darüber hinaus sind beim Ausreißen nicht nur der Durchmesser der Rollen wichtig, sondern auch deren Breite, Material und Formschluss. Eine geeignete Auswahl der Rollen erfordert experimentelle Erprobungen, die das Verhalten der genannten Faktoren im Zusammenhang mit dem Unkraut zeigen.

Bezüglich der Teilfunktion *2.2 Pflanze auswerfen* enthalten die bisher entwickelten Systeme keine Aggregate, die das Auswerfen der Pflanzen aus dem System unterstützen. Es scheint, als stelle das Verlassen der Pflanzen aus dem System kein Problem dar. Im Rahmen dieser Arbeit werden dennoch Lösungen vorgeschlagen und während der Versuche das Verhalten des Unkrauts nach dem Zupfen beobachtet.

Da viele Informationslücken identifiziert wurden, wird die Suche nach Lösungen durch Versuche im Labor und im Gleisbereich ergänzt. Daher wird in den

kommenden Abschnitten die Entwicklung eines Prüfstands beschrieben, der das Testen des Arbeitsprinzips der drehenden Rollen ermöglicht. Im Anschluss erfolgt die Lösungsauswahl. Die gesamte Konstellation aus den ausgewählten Teillösungen bildet das Gesamtkonzept, welches am Ende der Systementwicklung konstruiert und umgesetzt wird.

4.3.2 Entwicklung und Bau eines Prüfstands zur Erprobung des maschinellen Jätens

Ermittlung der Ausreißkraft typischer Pflanzenarten im Gleisbett

Um die Komponenten des Prüfstands richtig auszulegen, wurde experimentell die erforderliche Kraft ermittelt, um typische Pflanzenarten aus dem Gleis auszureißen. Zu diesem Zweck wurde ein Werkzeug aus zwei Holzbrettern gebaut, mit dem die Pflanzen geklemmt und gezogen wurden. An den Holzbrettern wurde eine Handwaage mittels eines Stahlkabels befestigt, mit der die benötigte Kraft beim Ausreißen gemessen wurde, Abb. 4.3.



Abb. 4.3: *Messung der Ausreißkraft unterschiedlicher Pflanzenarten im Gleis [Arc23]*

Bei der Kraftmessung wurde deutlich, dass der Erfolg des Ausreißens nicht allein von der aufgebrachten Kraft abhängt. Entscheidend sind auch der geklemmte Anteil der Pflanze, die Geschwindigkeit des Herausziehens und die Widerstandsfähigkeit des Stammes.

Die Pflanzenhöhe zeigt weniger Einfluss auf das Experiment als die Pflanzenart. Aufrechte Trespe mit einer Höhe zwischen 300 mm und 400 mm wurde bei weniger als 100 N vollständig ausgerissen, während Brombeeren derselben Größe bis zu 341 N benötigten, Tabelle 4.2. Um Brombeeren mitsamt ihrer Wurzeln auszureißen, ist ein langsames Ausreißen nötig, um zu verhindern, dass der

Stamm abreißt. Bei anderen Pflanzenarten wie z.B. dem Ackerschachtelhalm, lassen sich nur wenige Zentimeter der Pflanze aus dem Schotter entfernen, da sein verzweigtes Wachstum lediglich das Ausreißen einzelner Sprosse und Rhizome ermöglicht. Ähnlich verhält sich das Ruprechtskraut. Der zentrale Stamm wird abgerissen, wobei dafür nur eine geringe Kraft von bis zu 40 N erforderlich war. Nach Ausschluss des niedrigsten und höchsten Messwerts des Versuchs liegt die erforderliche Ausreißkraft der Pflanzen zwischen 23 N und ca. 150 N.

Tab. 4.2: *Ermittelte Ausreißkraft unterschiedlicher Pflanzenarten [Arc23]*

Pflanzenart	PH (mm)	Zugkraft (N)	Mit Wurzel?	Schotter verschoben?
Aufrechte Trespe *(Bromus erectus)*	300 bis 400	58 bis 96	Vollständig bei 4 von 5 Pflanzen	Ja, bei 3 von 5 Pflanzen
Ackerschachtelhalm *(Equisetum arvense)*	150 bis 270	23 bis 110	Teilweise bei 4 von 7 Pflanzen	Nein
Ruprechtskraut *(Geranium robertianum)*	150 bis 300	15 bis 37	Teilweise bei 3 von 6 Pflanzen	Nein
Brombeeren *(Rubus fruticosus)*	200, 250, 300, 400	62, 146, 103, 341	Vollständig bei 1 von 4 Pflanzen	Ja, bei 1 von 4 Pflanzen

Begriffserläuterung: PH = Pflanzenhöhe

Eine Mobilisierung der oberen Schotterschichten (50 mm bis max. 100 mm) wurde nur beim Ausreißen von starken, tiefen Wurzeln beobachtet, wie sie bei der Brombeere oder der Aufrechten Trespe vorkommen. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass sich die Pflanzen am besten zupfen lassen, wenn sie vom Mechanismus möglichst nah am Boden gegriffen werden.

Aufbau des Kleinprobenprüfstands

Basierend auf der ermittelten Ausreißkraft wurde ein Kleinprobenprüfstand entwickelt, um weitere Arbeitsparameter zu ermitteln und mögliche Lösungen zur Erfüllung der Systemfunktionen zu testen, Abb. 4.4. Das System besteht aus einem Paar parallel rotierender Rollen, die von einer Aluminiumstruktur getragen werden. Eine der Rollen ist angetrieben und überträgt das Drehmoment auf die andere Rolle durch den Kontakt der Oberflächen. Die Drehbewegung der Rollen wird durch einen Elektromotor mit einer zugeführten Leistung von

130 W erzeugt. Die maximale Drehzahl des Motors mit Übersetzung beträgt 200 U/min. Das maximale Drehmoment des System liegt bei ca. 9,7 Nm.

Im Prüfstand können sowohl Lufträder als auch Rollen aus Vollmaterial erprobt werden, deren Durchmesser zwischen 100 mm und 450 mm liegt bzw. deren Radius zwischen 50 mm und 225 mm beträgt. Bei diesem Radius r und dem genannten Drehmoment M entspricht die Zugkraft F_Z [Eic23]:

$$F_Z = \frac{M}{r} \tag{4.1}$$

194 N bzw. 43 N, wobei bei kleineren Durchmessern höhere Zugkräfte erzeugt werden. Somit kann der Prüfstand in dem im Kraftmessversuch ermittelten Kraftbereich (23 N bis 150 N) arbeiten.



Abb. 4.4: *Kleinprobenprüfstand zur Erprobung des maschinellen Jätens*

Der Prüfstand ermöglicht verschiedene Positionen der Rollen. Die Höhe zur Schotteroberfläche kann von 0 mm bis 450 mm eingestellt werden, während der Winkel auf 0°, 10°, -10° relativ zur Horizontalen verstellt werden kann. Der Abstand zwischen den Rollen und ihre Querposition im Gleis kann ebenfalls verändert werden. Das gesamte System ist auf einer Plattform mit Schienenrädern montiert, sodass es entlang des Gleises geschoben werden kann.

Auslegung der Rollen

Wie bereits erwähnt, steht die behandelte Pflanzenhöhe in direktem Zusammenhang mit dem Durchmesser der Rollen. Theoretisch ist für das Ausreißen von Pflanzenhöhen zwischen 100 mm und 300 mm ein Rollendurchmesser von

etwa 200 mm und 600 mm geeignet. Jedoch wurde bei der Ermittlung der Ausreißkraft beobachtet, dass die oberen Pflanzenteile schwächer als die unteren sind. Deshalb können die Pflanzenteile auf einer Höhe von etwa 300 mm brechen und das Herausziehen der gesamten Pflanze unmöglich machen. Daher sollte die Pflanze möglichst nah am Boden erfasst werden. Als quantifizierter Wert würde in dieser Arbeit eine Höhe von etwa 100 mm über dem Schotter ausgewählt, was einem maximalen Rollendurchmesser von 200 mm entspricht. Außerdem muss ein Abstand zur Schieneninfrastruktur eingehalten werden, um Kollisionen zu vermeiden.

Ein kleiner Rollendurchmesser birgt ebenso den Vorteil einer höheren Vertikalkraft bei gleichem Drehmoment. Außerdem können bei kleineren Durchmessern aufgrund des Abstands zwischen den Schienen mehr Rollenpaare in einer Reihe angeordnet werden, wodurch mehr Pflanzen gleichzeitig erfasst werden können.

Als erste Lösung dieser Funktion wurden die üblichen Luft- und Vollgummireifen betrachtet, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Sie können auf dem Markt allerdings nicht in geeigneter Größe für diese Aufgabe gefunden werden. Reifen mit dem erforderlichen Durchmesser von 200 mm sind zwar verfügbar, jedoch ist ihre Breite niedriger als 100 mm. Im Vergleich zu den in der Literatur angegebenen Werten (160 mm bis 200 mm, s. Absch. 4.2) ist dies deutlich geringer. Aus diesem Grund wurde auf dem Prüfstand untersucht, ob auf jeder Achse zwei montierte Lufträder die geringe Reifenbreite ausgleichen können. Allerdings weisen sie eine ballige Form auf, sodass das Ausreißen ausschließlich über einen dünnen Streifen des Reifens erfolgt und Lücken zwischen den Rädern entstehen, durch manche Pflanzen entweichen, Abb. 4.5,a. Daher erweist sich die Lösung als ungenügend und wurde verworfen.

Eine weitere berücksichtigte Option sind Hubwagenrollen aus Polyamid, Abb. 4.5.b. Sie haben Durchmesser zwischen 80 mm und 250 mm und Breiten von ca. 120 mm. Im Gegensatz zu Luftreifen haben Hubwagenrollen eine zylindrische Form, sodass das Platzieren von zwei Rollen auf jeder Achse zur Kontaktflächenvergrößerung möglich ist. Die Oberfläche bietet jedoch keinen Formschluss, der das Unkraut wie bei den Luftreifen einklemmt, sondern das Ausreißen der Pflanzen muss ausschließlich über Reibung mit der flachen Oberfläche bewerkstelligt werden. Darüber hinaus wurde bei der Erprobung der Hubwagenrollen im Prüfstand beobachtet, dass sich das Material weniger verformt als Gummi. Diese Eigenschaften beeinträchtigen nicht nur die Fähigkeit des Systems, die Pflanzen hochzuziehen, sondern behindern auch das Erfassen des Unkrauts aufgrund des harten Materials und des engen Raums zwischen den Rollen. Auch diese Lösung wurde als ungeeignet verworfen.

Als weitere Möglichkeit wurden die in Abb. 4.5.c dargestellten Industriewalzen

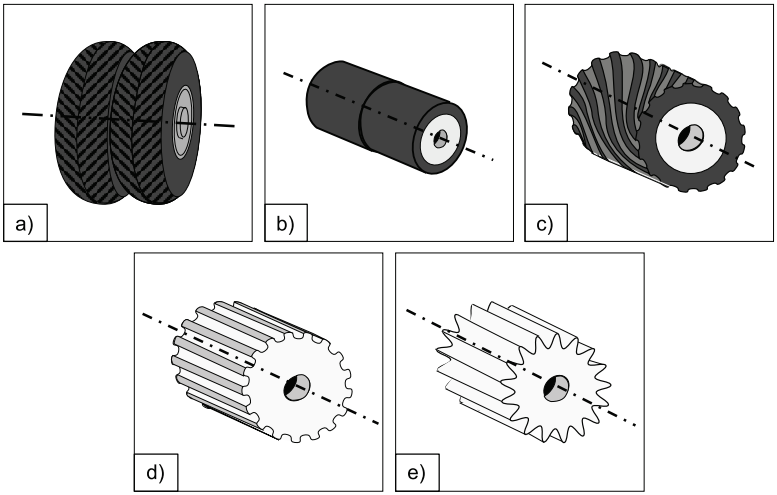


Abb. 4.5: *Reifen und Rollen für das maschinelle Jäten: a) Gummireifen b) Hubwagenrollen c) Industriewalzen d) Zahnradgeometrie e) Sterngeometrie [Arc25]*

in Betracht gezogen. Sie können nach Maß hergestellt und mit einer Gummischicht und Rillen beschichtet werden. Zwei weitere Geometrien, die ebenfalls in geeigneten Abmessungen hergestellt werden können, sind in Abb. 4.5.d und 4.5.e dargestellt. Es handelt sich um Rollen aus Polyamid PA 66, auch bekannt als Nylon 66, mit Zahnrad- oder Sterngeometrie. Die Zähne des Zahnrades in Abb. 4.5.d. sind nach der DIN 3967 gefertigt [Deu78], während die Geometrie in Abb. 4.5.e als Sternspitze vereinfacht ist. Da die Zahnrad- und Sternzähne tiefer als die Rillen der Industriewalzen hergestellt werden können, wodurch die Zugkraft des Systems und die Möglichkeit, die Pflanzen zu klemmen, erhöht werden, wurden diese beide Geometrien ausgewählt und in weiteren Versuchen evaluiert. Die Breite der Rolle wurde auf 200 mm und der Außendurchmesser auf 115 mm festgelegt, da das die kleinste geeignete Größe gemäß des Übertragungssystems und des Zahnradmoduls ist. Ausgehend von einem Drehmoment von 9,7 Nm entspricht die Zugkraft bei diesem Außendurchmesser der Rollen 176 N.

Verbindung der Rollen

Die Presskraft zwischen den Rollen kann über eine starre oder eine flexible Verbindung der Rollen ausgeübt werden. Zu einer starren Verbindung gehören

Befestigungsmittel wie Schrauben, Klammern, Spannschlösser, usw., während eine flexible Verbindung mit Hilfe von Zugfedern hergestellt werden kann. Auf dem Prüfstand wurde festgestellt, dass eine flexible Verbindung zwischen den Walzen erforderlich ist, damit unterschiedliche Pflanzendurchmesser und -formen den Mechanismus durchlaufen können. Daher wird eine Zugfeder im Prüfstand integriert. Die nötige Presskraft wird in den folgenden Abschnitten ermittelt.

4.3.3 Vorversuche im Labor

Im Labor wurden die Press- und die Zugkraft im Zusammenhang mit der Drehzahl und der Rollengeometrie bestimmt. Zusätzlich wurde der Einfluss des Pflanzeneintrags auf die Press- und Vertikalkraft auf Basis des Pflanzendurchmessers evaluiert, da die Rollen während des Ausreißens proportional zur Eintragung des Pflanzenmaterials getrennt werden und somit ein anderes Verhalten aufweisen.

Wie in Abb. 4.6 gezeigt, besteht der Versuchsaufbau aus dem gebauten Kleinprobenprüfstand mit Zahnrad- oder Sterngeometrie. Als Pflanzen wurden Brombeerranken von 250 mm Länge mit Durchmessern von 4 mm bis 10 mm verwendet. Um die Wurzelkraft darzustellen, wurde ein Eimer mit Gewicht an einer Seite des Probekörpers durch eine Schnur befestigt. Bei den Versuchen wurde die Probe unter die rotierenden Rollen positioniert und an die Kontaktzone angenähert, bis sie von den Rollen nach oben gezogen wurde.



Abb. 4.6: *Versuchsaufbau zur Ermittlung der Press- und Vertikalkraft im Labor [Arc25]*

Die Presskraft wurde durch die Zugfeder des Prüfstands hergestellt, die die Rollen zusammenzieht. Die Feder ist an einem Ende fixiert, während das

andere Ende mit einer Schraube verbunden ist. Durch Anziehen oder Lösen der Schraube kann die Feder ge- oder entspannt und damit die Federkraft erhöht oder verringert werden. Die Federrate beträgt 18,16 N/mm und die Vorspannung liegt bei 120 N. Die Versuche wurden mit der Federvorspannung begonnen.

Die Presskraft wurde als angemessen betrachtet, wenn die Probe und der Eimer hochgezogen wurden. Wenn die Probe stecken blieb oder aus dem Mechanismus nach unten rutschte, wurde die Feder um 1 mm weiter gespannt, wodurch sich die Presskraft um 18,16 N erhöht. Die Federspannung wurde weiter erhöht, bis die Probe und der Eimer erfolgreich angehoben wurden. Jeder Test, unabhängig davon, ob er erfolgreich war oder nicht, wurde dreimal mit einer neuen Probe wiederholt. Dies hat den Grund, dass sich die Eigenschaften der Brombeerranken ändern, wenn sie von den Rollen zusammengequetscht werden. Wenn der Test dreimal erfolgreich abgeschlossen wurde, wurde das Gewicht des Eimers um 2 kg (19,62 N) erhöht und der Test mit der höheren Masse erneut durchgeführt. Das Ausgangsgewicht betrug 2 kg.

Aufgrund der ungleichmäßigen Dicke entlang der Länge der Brombeerranken wurde das Masse-Längen-Verhältnis der Proben berechnet. Darüber hinaus wurden die Proben nach dem Versuch bei Umgebungstemperatur vollständig getrocknet und das Trockengewicht bestimmt. Es zeigt die tatsächliche Biomasse der Brombeerranken und gibt Aufschluss über ihre Stärke.

Pflanzendurchmesser

Bei der Evaluierung der Press- und Vertikalkräfte unter Variation des Pflanzendurchmessers wurden als Proben Brombeerreben mit Durchmessern von 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm verwendet. Das Masse-Längen-Verhältnis nimmt mit dem Durchmesser zu und betrug im Durchschnitt 0,12 g/cm, 0,21 g/cm, 0,35 g/cm bzw. 0,45 g/cm. Die Versuche wurden mit der Sterngeometrie (s. oben Abb. 4.5.e) und eine Drehgeschwindigkeit von 200 U/min.

Abb. 4.7 zeigt die graphische Darstellung der erfolgreichen Versuche für jeden Durchmesser der Brombeerranken. Insgesamt wurden Versuche mit etwa 130 Proben durchgeführt.

Erwartungsgemäß erhöht sich mit zunehmendem Pflanzendurchmesser die notwendige Presskraft. Die Presskraft zwischen den Rollen erzeugt jedoch einen Rotationswiderstand, der sich gleichzeitig auf das erforderliche Drehmoment zur Ausführung der Rotationsbewegung auswirkt. Dies kann im Diagramm bei den Proben mit 8 mm und 10 mm Durchmesser beobachtet werden. Obwohl die Feder höhere Presskräfte ausüben konnte, wurde die Gewichtszunahme durch das Drehmoment des Systems begrenzt. Es reichte nicht aus, um die

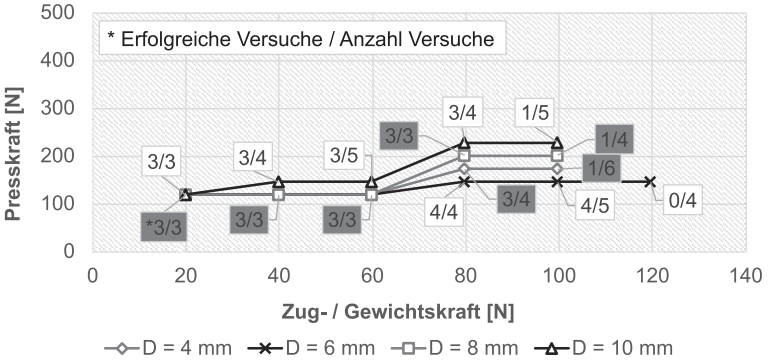


Abb. 4.7: *Evaluierung der Press- und Zugkräfte bei der Variation des Pflanzendurchmessers mit Sterngeometrie*

Proben mit mehr als 100 N anzuheben. Im Gegensatz dazu werden 6 mm dicke Ranken, die eine geringere Presskraft zum Greifen benötigen, erfolgreich mit einer Kraft von 100 N gezogen.

Auf der anderen Seite erfordern kleinere Pflanzendurchmesser zwar weniger Presskraft, jedoch rissen die Ranken mit einem Durchmesser von 4 mm bei einer Anwendung von 100 N ab, was ebenfalls zu erfolglosen Versuchen führte. Die besten Ergebnisse wurden mit 6 mm dicken Proben erzielt, die ein angemessenes Verhältnis zwischen dem Pflanzendurchmesser und dem Systemdrehmoment zum Zupfen aufwiesen.

Insgesamt liegt die erforderliche Presskraft zwischen 120 N und 230 N zum Anheben von Gewichten von 20 N bis 100 N. Bei der Berechnung des Verhältnisses zwischen Zug- und Presskraft liegt dieser Wert im Durchschnitt bei 0,37, mit einem Maximum von 0,67. Die Werte der Sterngeometrie wurden anschließend mit denen der Zahngeometrie verglichen und werden im Folgenden betrachtet.

Rollengeometrie

Zur Bewertung der Rollengeometrie wurden die vorherigen Versuche wiederholt, diesmal jedoch mit der Zahnradgeometrie (s. oben Abb. 4.5.d). Dazu wurden wieder Brombeerranken mit Durchmessern von 4 mm, 6 mm, 8 mm und 10 mm als Probekörper verwendet. Ausgehend von den genannten Durchmessern betrugen die entsprechenden Masse-Längen-Verhältnisse 0,08 g/cm, 0,19 g/cm, 0,31 g/cm bzw. 0,43 g/cm. Da die Masse-Längen-Verhältnisse des Frischgewichts niedriger waren als bei den Versuchen mit der Sterngeometrie,

wurden diese mit dem Trockengewicht erneut berechnet.

Die Masse-Längen-Verhältnisse nach Pflanzentrocknung zeigten keinen regelmäßigen Trend. Die Proben mit einem Durchmesser von 4 mm wiesen bei den Versuchen mit der Sterngeometrie ein 15 % niedrigeres Verhältnis auf. Dagegen zeigten die Proben mit einem Durchmesser von 6 mm und 8 mm ein um 16 % bzw. 6 % höheres Verhältnis. Bei den Probekörpern mit einem Durchmesser von 10 mm gab es keinen Unterschied. Daraus lässt sich nicht schließen, dass die Brombeerreben in einem Versuch robuster waren als in dem anderen.

Beim Vergleich von Abb. 4.8 mit Abb. 4.7 zeigt sich, dass die Sterngeometrie eine geringere Presskraft der Feder erfordert, wodurch das System schwerere Gewichte heben kann. Obwohl die Eigenschaften der Brombeerranken in beiden Versuchen etwas voneinander abweichen, können die Ergebnisse nicht auf diesen Faktor zurückgeführt werden, da das Masse-Längen-Verhältnis keinen klaren Trend zeigte.

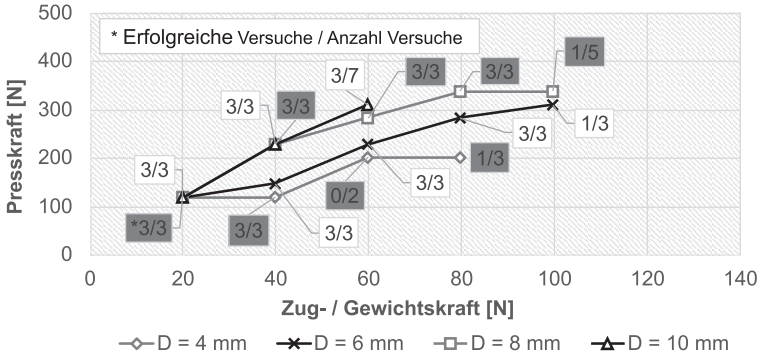


Abb. 4.8: *Evaluierung der Press- und Zugkräfte bei der Variation des Pflanzendurchmessers mit Zahnradgeometrie*

Die erreichte Zugkraft mit der Zahnradgeometrie liegt im Durchschnitt bei 70 N, während mit der Sterngeometrie einen Durchschnitt von 85 N erreicht wird. Dieser Unterschied ist besonders bei dicken Stämmen mit starken Wurzeln von Bedeutung, wo eine hohe Zugkraft erforderlich ist und die Systemperformance maximiert werden soll. Hinsichtlich des Verhältnisses von Vertikal- zu Presskraft ergeben die berechneten Werte einen Mittelwert von 0,24 mit einem Maximalwert von 0,32, was 13 % unter den Werten der Sterngeometrie liegt. Außerdem hat die Sterngeometrie Vorteile bei der Herstellung. Da die Geometrie der Sternzähne einfacher ist als die der Zahnradzähne, werden sowohl die Herstellungszeit als auch die Kosten mit dieser Geometrie reduziert.

Drehgeschwindigkeit

Der Einfluss der Drehgeschwindigkeit beim Hochziehen der Pflanzensprosse wurde mit zwei Drehzahlen von ca. 100 U/min und 200 U/min evaluiert. Ebenfalls wurden Brombeerranken gebraucht, jedoch mit einem konstanten Durchmesser von etwa 4 mm. Das Masse-Längen-Verhältnis betrug bei beiden Drehzahlen im Durchschnitt 0,08 g/cm.

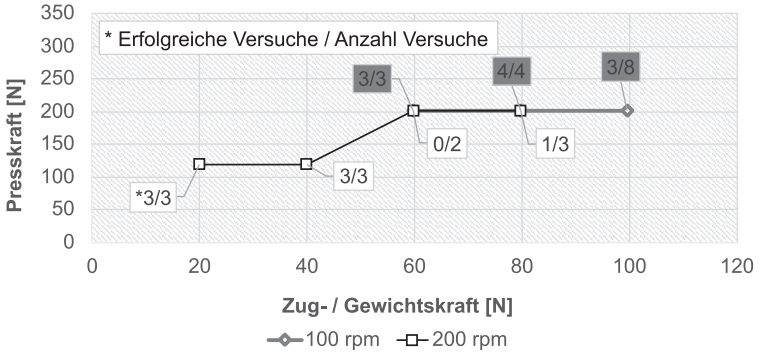


Abb. 4.9: *Evaluierung der Press- und Zugkräfte bei der Variation der Drehzahl*

Wie in Abb. 4.9 zu sehen ist, ermöglicht die niedrige Drehzahl von 100 U/min mehr Gewicht zu heben, ohne dass die Probe abreißt. Die maximale Gewichtskraft, die bei einer Drehzahl von 100 U/min angehoben wurde, beträgt 80 N, während bei 200 U/min maximal 40 N gehoben wurden. Dies entspricht einer Verringerung um 50 % der gehobenen vertikalen Kraft. Bei vertikalen Kräften von 60 N und 80 N und einer Drehzahl von 200 U/min rissen die Probekörper ab. Daraus lässt sich schließen, dass niedrigere Drehzahlen für das Ausreißen dünner Pflanzenstängel effektiver sind, da die Pflanzensprossen weniger abreißen.

4.3.4 Vorversuche auf Gleisanlagen

Für die vorläufige Evaluierung des Systems auf Gleisanlagen wurden die Teststrecken Puffendorf, Linnich und Vetschau genutzt, Abb. 3.1 in Kapitel 3. Dabei wurden Gleisabschnitte mit gleichmäßiger Vegetationsdichte ausgewählt. Der mobile Kleinprobenprüfstand wurde auf dem Gleis montiert und manuell entlang der Schienen mit verschiedenen Parametereinstellungen geschoben. Die Performanz des Systems wurde mit einer Kamera aufgezeichnet. Anschließend wurde anhand der aufgenommenen Videos die Anzahl der ausgerissenen, abgerissenen und unbehandelten Pflanzen gezählt. Die ersten bewerteten

Parameter waren die Dreh- und Fahrgeschwindigkeit. In weiteren Schritten wurden die Rollengeometrie, der Rollenwinkel, die Presskraft, die Höhe des Greifpunktes und der Einfluss der Pflanzenart bewertet.

Dreh- und Fahrgeschwindigkeit

Um das optimale Verhältnis zwischen Dreh- und Fahrgeschwindigkeit zu ermitteln, wurden Versuche mit 1 km/h und 3 km/h Fahrgeschwindigkeit sowie 100 U/min und 200 U/min Drehgeschwindigkeit durchgeführt. Die Rollengeometrie, die Presskraft und die Greifhöhe wurden konstant gehalten. Als Rollengeometrie wurde die Zahnradgeometrie verwendet. In Analogie zu den Systemen der Literatur [Pan23] wurden die Rollen mit einem Anstellwinkel positioniert. Dieser wurde hier zu -10° zur Horizontalen gewählt, um den Greifpunkt der Rollen möglichst nah am Schotter zu platzieren, Abb. 4.10.a. Bei einem Winkel von 10° zur Horizontalen weist der Greifpunkt des Systems einen größeren Abstand zum Schotter auf, da die Maschinenelemente des Systems (z.B. Getriebe, Motor usw.) sonst mit dem Schotter kollidieren, Abb. 4.10.b. Daher scheidet diese Einstellung aus. Darüber hinaus ergibt sich bei der Berechnung der Kraftvektoren die gleiche vertikale Kraft für beide Winkel, sodass diesbezüglich beide Optionen die gleichen Ergebnisse aufweisen würden.

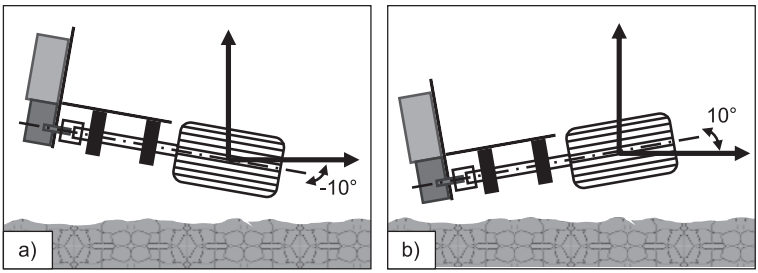


Abb. 4.10: *Darstellung des Rollenwinkels zur Horizontalen: a) -10°; b) 10°*

Die Presskraft wurde auf 300 N eingestellt, da dies der benötigte Wert ist, um mit dieser Rollengeometrie im Labor 100 N zu heben, Abb. 4.8. Die Greifhöhe betrug 110 mm, um einen Abstand von ca. 50 mm zur Infrastruktur einzuhalten. Aufgrund der Unebenheiten des Schotterbettes war es riskant, diesen Abstand zu verringern.

Um unterschiedliche Vegetation zu behandeln, wurden die Versuche auf den Streckenabschnitten Puffendorf und Linnich durchgeführt. In Puffendorf handelt es sich um ein stillgelegtes Gleis der Rurtalbahn GmbH, das größtenteils mit Aufrechter Trespe (Gras - krautige Pflanze) zugewachsen ist, während

der Abschnitt in Linnich ein Abstellgleis der Rurtalbahn GmbH mit gemischter Vegetation ist. In diesem Bereich ist eine hohe Anzahl an Brombeeren (verholzende Pflanzen), Ruprechtskraut und Aufrechter Trespe (krautige Pflanzen) vorhanden. Die Versuchsabschnitte waren jeweils etwa 70 m lang, was ungefähr 40 Schwellenfächern (Fläche zwischen den Schwellen, ca. 450 mm lang) entspricht. Wenn einige Bereiche keine Vegetation enthielten, wurde die Länge des behandelten Abschnitts entsprechend verlängert.

Die Experimente wurden zweimal im Jahr 2023 durchgeführt: im Mai zu Beginn der Vegetationszeit und im September am Ende der Saison. Die Pflanzenhöhe variiert je nach Pflanzenart, war jedoch in beiden Experimenten und an beiden Standorten ähnlich. Bei der Aufrechten Trespe lag die Höhe zwischen 500 mm und 800 mm, während sie bei Brombeeren und Ruprechtskraut jeweils etwa 400 mm und 300 mm betrug. Die Temperatur lag im Mai zwischen 14 °C und 18 °C sowie im September zwischen 17 °C und 25 °C

Abb. 4.11 zeigt die Ergebnisse. Der Zeitpunkt der Behandlung innerhalb der Vegetationsperiode zeigt keinen Trend. Daher sind die Ergebnisse von Mai und September in einem Diagramm pro Versuchsstrecke zusammengefasst.

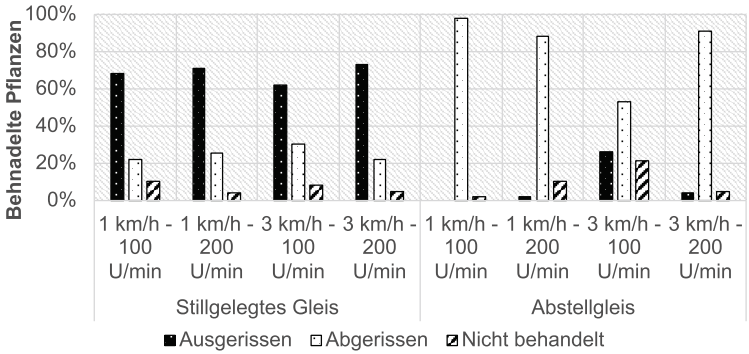


Abb. 4.11: *Verhältnis der Dreh- und Fahrgeschwindigkeit auf stillgelegtem Gleis mit Aufrechter Trespe (Puffendorf) und auf Abstellgleis mit gemischter Vegetation (Linnich)*

Obwohl das Verhältnis der Dreh- und Fahrgeschwindigkeiten unterschiedliche Ergebnisse zeigt, wird eine stärkere Diskrepanz hinsichtlich der Pflanzenarten und der Teststrecken beobachtet. Insgesamt wurde auf der Teststrecke Puffendorf, die mit Gras bedeckt ist, ein Ausreißen von 68 % der Pflanzen festgestellt, während die gemischte Vegetation des Abstellgleises Linnich zu 83 % abgerissen und nahezu nicht ausgerissen wurde. Beim Ziehen der Pflanzen flog weder Schotter weg noch wurde das Schotterbett destabilisiert. Gelegentlich

wurde der Schotter in der oberen Schotterschicht, innerhalb der ersten 50 mm bis 100 mm, aufgewühlt.

Bei den Pflanzenarten wurde beobachtet, dass die langen Grashalme sich um die Rollen wickeln. Zudem erleichtert die vertikale Wachstumsrichtung des Grases das Greifen und Ziehen mehrerer Halme gleichzeitig, während die Brombeersprossen eine bestimmte Höhe erreichen und dann horizontal weiterwachsen. Dadurch werden manchmal nur einzelne Blätter von den Rollen aufgenommen, was nicht ausreicht, um die Pflanze auszureißen. Wenn lange Brombeerranken gegriffen werden, wickeln sich die Ranken, wie die Gräser, um die Rollen ein, sodass ein erheblicher Teil der Pflanze herausgezogen wird. Beim Ruprechtskraut sind die Stängel verzweigt und die Blätter dünn. Dieses Unkraut wird nur dann ausgerissen, wenn der Mechanismus die Pflanze fast vollständig erfasst.

Darüber hinaus kann eine niedrige Qualität des Schotterbettes dem stillgelegten Gleis in Puffendorf zugeschrieben werden, da eine hohe Menge an feinem Material zwischen dem Schotter beobachtet wurde, was dies einen lockeren Sitz verleiht. Zudem waren die Wurzeln der Gräser auf der Oberfläche des Schotterbettes zu sehen. Diese Faktoren können das Ausreißen des Unkrauts begünstigen.

Obwohl die Kombination aus der Fahrgeschwindigkeit von 3 km/h und einer Drehzahl von 100 U/min das effektivste Ausreißen auf dem Abstellgleis zeigte, führte sie auch zu der höchsten Menge unbehandelter Flächen (ca. 20 %). Dies kann dem geringen Verhältnis zwischen Dreh- und Fahrgeschwindigkeit zugeschrieben werden, da in diesem Fall etwa 0,9 Umdrehungen pro Schwellenfach erfolgten. Das bedeutet, dass die Rollen keine vollständige Umdrehung pro Schwellenfach abschließen, bevor sie den nächsten Bereich erreichen. Bei allen anderen Kombinationen lag dieses Verhältnis bei mindestens 1,8 Umdrehungen pro Schwellenfach, was die Chancen erhöht, die Pflanzen zu erfassen.

Weitere Arbeitsparameter

Da die Erprobung der Arbeitsparameter durch die Gleisqualität beeinflusst werden kann, wurde das Verfahren auf einem dritten Gleis angewendet, das sowohl Gras als Brombeeren enthält. Dieser Streckenabschnitt ist Teil der Museumsbahn Miljoenenlijn der Stiftung Zuid-Limburgse Stoomtrein Maatschappij (ZLSM), Niederlande, und befindet sich auf der deutschen Seite in Vetschau, Abb. 3.1. Die Strecke wird im Allgemeinen nur mechanisch behandelt, da der Einsatz von Herbiziden hier schon länger verboten ist. Die zu bewertenden Parameter und ihre Werte sind:

- Rollengeometrien: Stern- und Zahnradgeometrie

- Winkel: 0 ° und -10 ° relativ zur Horizontalen
- Höhe des Greifpunkts: 140 mm (minimale Höhe aufgrund von Gleisunebenheiten) und 200 mm über dem Schotter
- Presskraft: 300 N und 450 N
- Pflanzenarten: Aufrechte Trespe (Gras) und Brombeeren.

Die in vorherigen Experimenten verwendeten Dreh- und Antriebsgeschwindigkeiten wurden erneut angewendet. Die Leistung des Systems wurde auch hier mit einer Kamera aufgezeichnet und anhand der den aufgenommenen Videos ausgewertet. Die durchschnittliche Anzahl behandelter Schwellenfächer für jeden Parameter betrug 350, was ungefähr 200 m entspricht.

Die Versuche wurden im August 2024 durchgeführt. Die Pflanzenhöhe lag zwischen 300 mm und 400 mm für Gras und zwischen 200 mm und 300 mm für die Brombeeren. Die Temperatur betrug etwa 30 °C.

Während der Experimente rissen die meisten Unkräuter eher ab statt aus. Daher wurde die Systemleistung anhand des Verhaltens der Rollen bewertet. Zu diesem Zweck wurden vier Kategorien festgelegt: normales Drehen, langsames Drehen, kurze Blockade und permanente Blockade. Das normale Drehen entspricht der Rollendrehung mit Startgeschwindigkeit, die die Pflanzen kontinuierlich behandelt. Als langsames Drehen wird eine Reduzierung der Drehgeschwindigkeit durch die Verstopfung von Pflanzenmaterial bewertet, ohne dass die Drehung der Rollen aufhört. Bei einer kurzen Blockade stoppen die Rollen für ein paar Sekunden, aber das System schafft es, sich mit Hilfe der Vorwärtsfahrt zu befreien. Im Gegensatz dazu bleiben die Rollen trotz Vorwärtsfahrt bei einer permanenten Blockade stehen.

Die Ergebnisse sind gemäß der bewerteten Parameter in Abb. 4.12 dargestellt. Die Veränderungen im normalen Drehen, sei es als langsames Drehen, kurze Blockade oder permanente Blockade, traten aufgrund der Menge an Pflanzenmaterial auf, die im System gesammelt wurde. Dazu gehören Gras oder Brombeeren, die sich in den Mechanismus einrollen. Beim Auftreten von permanenten Blockaden wurde beobachtet, wie der Mechanismus versuchte, weiterhin zu rotieren. Es lässt sich daher feststellen, dass dieser Effekt mit einem unzureichenden Drehmoment des Systems zusammenhängt. Permanente Blockaden traten auch auf, weil sich verholzende bis verholzte Pflanzen zwischen den Rollenzähnen einklemmten. Dies ist ein Problem, das mit der Rollengeometrie verbunden ist. Insgesamt passierten permanente Blockaden nur zu 4 %, während langsames Drehen und kurze Blockaden jeweils zu 26 % und zu 24 % auftraten. Dies deutet darauf hin, dass ein Motor mit höherem Drehmoment die Gesamtsystemperformanz erheblich verbessern würde.

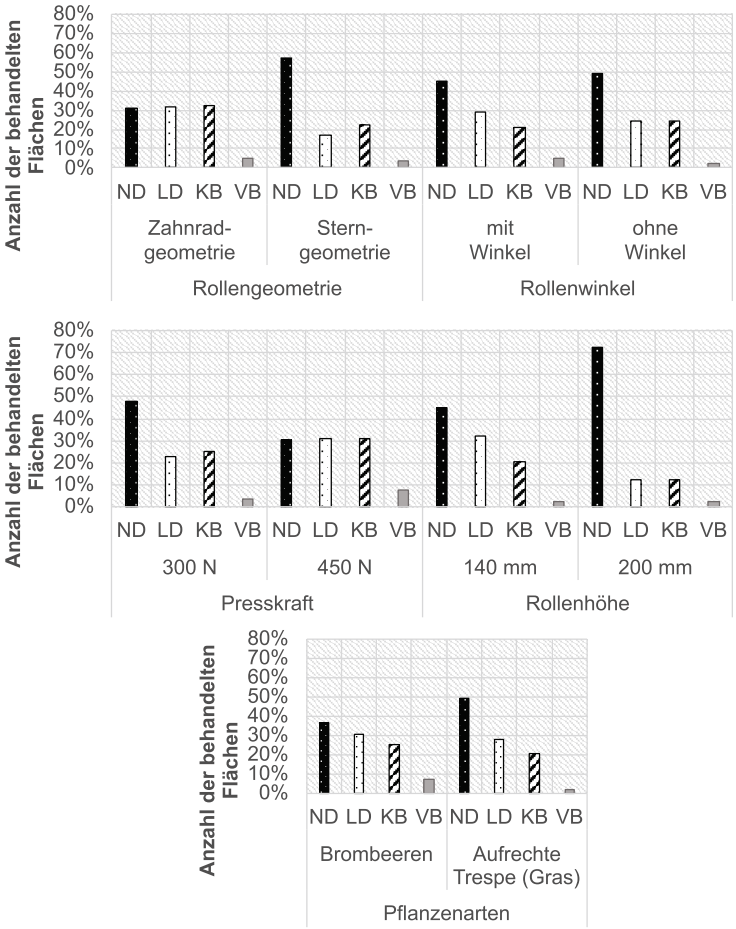


Abb. 4.12: *Evaluierung weiterer Arbeitsparameter im Gleis*

Begriffserläuterung: ND = normales Drehen; LD = langsames Drehen; KB = kurze Blockade; PB = permanente Blockade

Rollengeometrie Wie in Abb. 4.12 gezeigt, wurde mit Sterngeometrie fast 60 % normales Drehen erreicht, während die Zahnradgeometrie nur die Hälfte davon zeigte. Darüber hinaus traten das langsame Drehen und die kurze Blockaden der Zahnradgeometrie mit ähnlicher Häufigkeit wie das normale Drehen auf. Obwohl dieser Effekt durch die behandelten Pflanzen beeinflusst wird, welche ähnlich, aber nicht identisch sind, stimmen die Ergebnisse mit den Laborergebnissen überein. Diese deuten darauf hin, dass die Zahnradgeometrie bei gleichen Presskräften niedrigere Zugkräfte erzeugt als die Sterngeometrie. Folglich wäre eine größere Motorleistung erforderlich, um dieselbe Aufgabe mit der Zahnradgeometrie auszuführen.

Winkel Die Positionierung der Rollen in einem Winkel von -10° zur Horizontalen oder ohne Winkel zeigt laut Diagramm kaum Einfluss auf das Drehverhalten. Die maximale Veränderung beim Vergleich der Kategorien beträgt 4 %. Die Integration des Winkels in der Konstruktion des Systems ist aufwändiger als ohne diesen. Angesichts der Tatsache, dass der Winkel nur einen geringen Unterschied in der Leistung bewirkt, wird entschieden, das System ohne Winkel zu konstruieren.

Presskraft Im Diagramm wird beobachtet, dass bei einer Presskraft von 300 N ca. 50 % normales Drehen erreicht wurde, während bei 450 N nur 30 % normales Drehen erzielt wurde. Darüber hinaus nahmen sowohl das langsame Rollen als auch die Blockaden bei 450 N um fast 10 % im Vergleich zu denen bei 300 N zu. Der Effekt bei beiden Presskräften ist ähnlich, was darauf hindeutet, dass 450 N nicht nötig sein könnten, um das Unkraut abzureißen. Allerdings steigert, basierend auf den Ergebnissen der Vorversuche im Labor 4.3.3, eine Erhöhung der Presskraft ebenfalls das mögliche gehobene Gewicht. So können theoretisch bei 450 N Pflanzen mit stärkeren Wurzeln hochgezogen werden als bei 300 N, was nicht nur die Pflanzenhöhe, sondern auch die Vegetationsdichte reduziert. Daher sollte, obwohl eine Presskraft von 300 N als geeignet für die Vorversuche angesehen wird, höhere Presskräfte erprobt werden.

Trotz der hohen Presskräfte wird die Erfassung der Pflanzen nicht behindert, sowohl die Zahnrad- als auch die Sterngeometrien ziehen weiterhin die Pflanzenstängel.

Höhe Wie in Abb. 4.12 gezeigt, erzielte die Positionierung des Greifpunkts der Rollen in einer Höhe von 200 mm über dem Schotter über 70 % normales Drehen, den höchsten Wert unter allen getesteten Parametern. Im Gegensatz dazu führte eine Höhe des Greifpunkts von 140 mm nur zu 45 % normalem Drehen, mit höherem Anteil an langsamem Drehen und kurzen Blockaden. Diese

Abweichung könnte auf die Eigenschaften der Pflanzen zurückgeführt werden. Wie bereits erwähnt, sind die oberen Pflanzenteile schwächer als die unteren Pflanzenteile. Darüber hinaus ermöglicht das Greifen der unteren Pflanzenteile das Ausreißen der gesamten Pflanze, was zu höherem Widerstand gegen das Ziehen führt. Daher erfordert die Anwendung der Rollen näher am Schotter mehr Kraft, um die Pflanzen zu ziehen, erhöht jedoch die Wahrscheinlichkeit des Ausreißens der ganzen Pflanze.

Wenn das Unkraut vom Mechanismus ausschließlich abgerissen wird, führt die Positionierung des Greifpunkts bei 200 mm über dem Schotter außerdem dazu, dass die Pflanzenhöhe nach der Behandlung schneller die Fahrzeugbegrenzungslinie (ca. 300 mm über dem Schotter) erreicht, als wenn der Greifpunkt bei 140 mm liegt. Folglich ist es ratsam, die Pflanzen näher am Schotter effektiv zu behandeln.

Pflanzenarten Bei der Behandlung von Gras wird in der Abbildung ein etwa 10 % höherer Anteil an normalem Drehen im Vergleich zur Behandlung von Brombeeren beobachtet. Obwohl beide Arten starke Sprosse haben, sind die Grashalme flexibel, während die Brombeeren verholzen und das System verlangsamen oder blockieren können. Jedoch ist die Anzahl an langsamem Drehen und kurzen Blockaden für beide Arten ähnlich hoch. Wiederum sind höhere Zugkräfte erforderlich, um diese Pflanzenarten zu bekämpfen. Da diese Arten häufig auf Bahngleisen vorkommen, ist es wichtig, diese Anforderung in zukünftigen Entwicklungen zu berücksichtigen.

Zusätzliche Beobachtungen wurden hinsichtlich der Arbeitsbreite der Rollen gemacht. Diese Kenngröße hängt nicht unbedingt von den Abmessungen der Rollen ab, sondern vielmehr von der Pflanzenmorphologie. Wenn die Pflanzen breit wachsen und vollständig von den Rollen erfasst werden, ist der behandelte Bereich breiter als bei Pflanzen, die aus einem einzelnen vertikalen Spross entstehen.

4.3.5 Lösungssuche zur Erfüllung der Teilfunktionen des Jätsystems

Mit der Ersterprobung des Systems und der Ermittlung von Arbeitsparametern werden Wissenslücken bezüglich des zu erwartenden Verhaltens des zu entwickelnden Systems geschlossen, sodass die Suche und Auswahl der Lösungen für jede Teilfunktion präziser durchgeführt werden können als zuvor.

Im Folgenden werden Lösungen für die im Abschnitt 4.3.1 ermittelten Teilfunktionen vorgeschlagen sowie ihre Vorteile und Nachteile bei Ausführung der Funktionen erläutern.

Funktion 1.1 Vertikale Kraft bzw. Drehmoment erzeugen

Zur Erfüllung der Funktion 1.1 gehören Antriebe, die in erster Linie die Anforderungen an Drehmoment, Drehzahl und verfügbare Leistung erfüllen. Außerdem sind mehrere Rollenpaare nötig, um die gesamte Breite des Schotterbettes zu behandeln. Daher sollen hier ebenfalls Lösungen für das Übertragungssystem der Rollenpaare analysiert werden.

Antriebsart Bei den Vorversuchen ließ sich feststellen, dass das Drehmoment des Systems von 9,7 Nm zu klein für die Behandlung von verholzenden Brombeeren und hohen Gräsern ist. Daher soll ein Motor mit höherem Drehmoment ausgewählt werden. Als Drehzahlen wurden Versuche mit 100 U/min und 200 U/min durchgeführt. Außerdem wurde ein geeignetes Verhältnis zwischen Dreh- und Fahrgeschwindigkeit beobachtet. Entsprechend sollte die Drehzahl proportional zur Fahrgeschwindigkeit erhöht werden. Ein Faktor geringer als eine Umdrehung pro Schwellenfach, wie bei der Kombination von 3 km/h und 100 U/min, ist für eine kontinuierliche Behandlung der Pflanzen nicht ausreichend. Aus dem Grund ist es ratsam, Drehzahlen auch über 200 U/min zu wählen, um eine Fahrgeschwindigkeit über 3 km/h zu erproben.

Für diese Aufgabe können elektrische, hydraulische und pneumatische Motoren eingesetzt werden. Verbrennungsmotoren haben ein großes Gewicht und benötigen viel Bauraum. Außerdem sind sie in ihren Kenngrößen wie Drehzahl und Drehmoment für das Betreiben der Rollen überdimensioniert. Zusätzlich muss bei ihrer Anwendung die Einhaltung von Immissionsschutzrichtlinien berücksichtigt werden [Seb17]. Aus diesen Gründen werden keine Verbrennungsmotoren als Lösung berücksichtigt.

Rotierende Elektromotoren wandeln elektrische in mechanische Energie um. Daher bestehen sie aus zwei Hauptelementen: dem Stator und dem Rotor. Der Stator ist ein nicht beweglicher Teil, der aus Blechpaketen mit verlegten Drahtwicklungen besteht. Der Rotor ist, wie der Name schon sagt, der Teil, der sich dreht und mit der Welle verbunden ist. Er besteht aus Stahlblechen mit Rotorwicklungen. Die Bauart des Stators, des Rotors und weiterer Komponenten des Motors hängt davon ab, ob der Elektromotor mit Gleich- oder Drehstrom arbeitet. Das Funktionsprinzip aller Bauarten basiert jedoch auf der Erzeugung von Magnetfeldern durch angelegte Spannung an die Stator- und Rotorwicklungen. Das Anziehen und Abstoßen der Magnetfelder führt zur Bewegung des Rotors bzw. der Motorwelle. [Ber22]

Hydraulische Motoren wandeln hydraulische Leistung bzw. hydraulischen Druck in mechanische Leistung um [Wil11]. Dazu benötigen sie eine hydraulische Pumpe, eine Anordnung von hydraulische Leitungen und Ventilen sowie eine

Steuer- und Regeleinrichtung. Hydraulische Motoren sowie Pumpen arbeiten nach dem Verdrängerprinzip: Das zu fördernde Fluid wird in einen Raum geleitet, der durch die Drehung der Maschinenwelle geometrisch vergrößert und wieder verkleinert wird. Das Fluid wird aus dem verkleinerten Raum herausgedrückt, um weitere mechanische oder hydraulische Energie bereitzustellen. Dabei können Größen wie Drehmoment, Drehzahl, Kraft und Geschwindigkeit zwischen Ein- und Ausgang der Maschine verändert werden. Es gibt Maschinen mit festem Verdrängungsvolumen pro Umdrehung, wie Zahnrad- und Schraubenmaschinen, die als Konstantmaschinen bezeichnet werden. Außerdem gibt es Maschinen, die sowohl mit konstantem als auch mit verändertem Hubvolumen betrieben werden, diese nennt man Verstellmaschinen. Dazu gehören Flügelzellen-, Radialkolben- und Axialkolbenmaschinen. [Fel18]

Im Unterschied zu hydraulische Motoren, die häufig Öl als Fluid zur Energieübertragung nutzen, arbeiten pneumatische Antriebe in der Regel mit Druckluft. Mehrere Bauarten der pneumatischen Motoren basieren, wie bei hydraulischen Antrieben, auf dem Verdrängerprinzip. Drehmotoren werden bevorzugt in Form von Flügelzellen- oder Zahnradmotoren konstruiert. [Fel20]

Elektrische, hydraulische sowie pneumatische Motoren werden abhängig vom Zweck und den Anforderungen mit unterschiedlichen Drehzahlen und -momenten gebaut. Tanaka et al. fassen die Kenngrößen von 765 elektrischen Motoren und 404 verschiedenen Arten von Fluidtechnikmotoren, sowohl hydraulischen als auch pneumatischen zusammen [Tan13]. Abb. 4.13 stellt das Drehmoment der Motoren im Bezug auf ihre Masse (ohne weitere Systemkomponenten) dar. Der Drehmomentbereich, in dem die Rollen zum maschinellen Jäten arbeiten, ist in blau markiert. Dabei kann visualisiert werden, dass die Luft-Lamellenmotoren, Luft-Radialkolbenmotoren, Öl-Schrägscheibenmaschinen, Wechselstromservomotoren und AC-Direktantriebe als Antrieb des maschinellen Jätens in Frage kommen.

Die Studie wurde von Samaka et al. erweitert [Sak22]. Hier wurde das Drehmoment im Bezug auf die Drehzahl der Motoren dargestellt, Abb. 4.14, jedoch bezieht dieses Diagramm keine pneumatischen Motoren ein.

Ebenfalls ist in der Abbildung der Arbeitsbereich der Rollen des maschinellen Jätens blau markiert. In diesem Fall entsprechen nur Wechselstrommotoren dem markierten Bereich. Auch wenn die obengenannten geeigneten pneumatischen Antriebe mit der erforderten Drehzahl arbeiten können und diese laut Abb. 4.13 weniger Masse als Wechselstrommotoren besitzen können, erfordert die Verwendung eines pneumatischen Motors eine große Anzahl zusätzlicher Komponenten wie Kompressor und Ventile. Im Gegensatz dazu benötigen Wechselstrommotoren weniger Zusatzkomponenten und werden daher als Lösung zur weiteren Entwicklung des Systems bevorzugt.

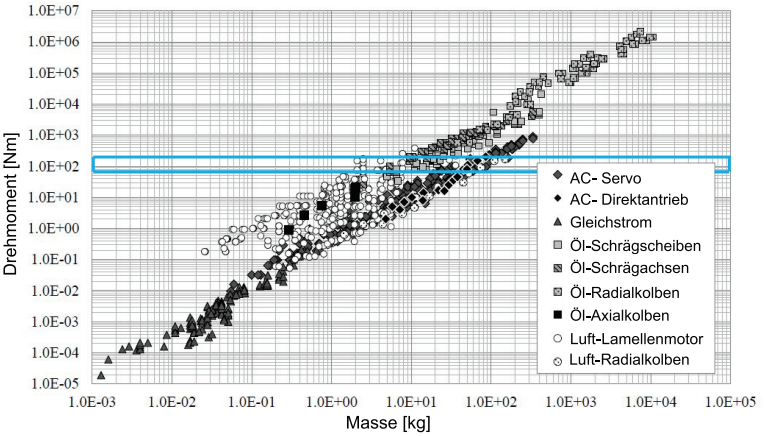


Abb. 4.13: *Drehmoment-Masse-Vergleich von elektrischen, hydraulischen und pneumatischen Motoren ([Tan13] modifiziert)*

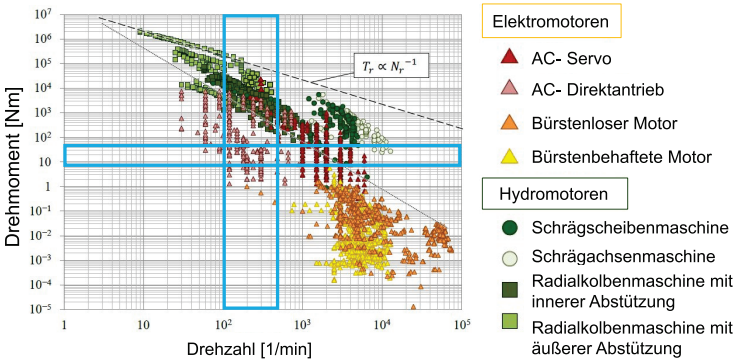


Abb. 4.14: *Drehmoment-Drehzahl-Vergleich von elektrischen und hydraulischen Motoren ([Sak22] modifiziert)*

Übertragungssystem Bei der Anwendung mehrerer Rollenpaare kann das Drehmoment auf verschiedene Weise übertragen werden. Abb. 4.15 zeigt drei Varianten, die ebenso in der Literatur [Sim19, Kem82] gefunden werden. Die angetriebenen Rollen sind mit dem Zeichen „+“ in der Achse markiert. Um eine lange Reihe von Rollen anzutreiben, kann das Drehmoment entweder auf jedem Rollensatz, Abb. 4.15.a, an jedem Ende der Reihe, Abb. 4.15.b, oder dazwischen nach einer bestimmten Anzahl von Rollen bei langen Rollenreihen übertragen werden, Abb. 4.15.c. Es ist zu beachten, dass in der Option „a)“, bei der jedes Rollenpaar angetrieben wird, ein Abstand zwischen den Rollenpaaren einzuhalten ist.

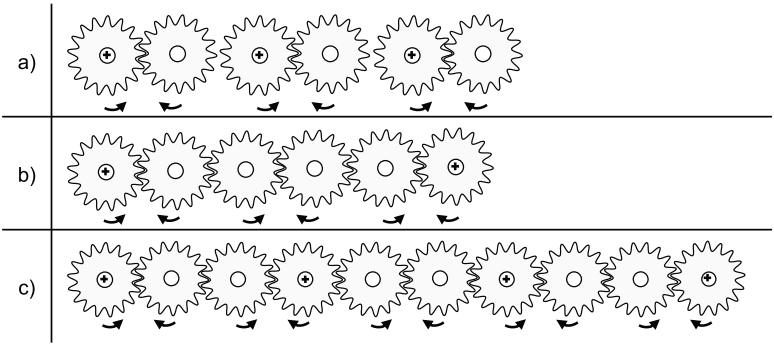


Abb. 4.15: *Mögliche Varianten zur Übertragung des Drehmoments*

Der Antrieb an jedem Ende der Reihe oder dazwischen, wie in Abb. 4.15.b und 4.15.c dargestellt ist, kann eine Überbestimmung des Übertragungssystems erzeugen, da die Drehungen der Wellen nicht vollständig synchronisiert sind. Zusätzlich ist mit Leistungsverlust aufgrund von Reibung und Kräften zwischen den Rollen zu rechnen, die durch die Trennung der Rollen durch die Pflanzen unregelmäßig ausgeübt werden. Dies verursacht Vibrationen und Verschleiß und führt zu einem erhöhten Wartungsbedarf [Kem82]. Darüber hinaus ist die Einzeleinstellung der Rollenpaare begrenzt, wenn alle Rollen miteinander verbunden sind. Fehlfunktionen der Einzelpaare können nur schwer behoben werden und können auf weitere Systemkomponenten übertragen werden. Daher wird trotz höherer Kosten und zusätzlicher Ausrüstung die Option „a“ gewählt, das Drehmoment an jedem Rollensatz einzusetzen.

Funktion 1.2 Presskraft zwischen Rollen erzeugen

Die Presskraft zwischen den Rollen kann durch starre oder flexible Elemente eingestellt werden. Bei den meisten aus der Literatur bekannten Arbeiten

[Man04, Sim19], werden die Rollen fest eingestellt und die Presskraft über den Luftdruck der Reifen justiert. Weitere Arbeiten [Sum87, Kem82] stellen eine zusätzliche Presskraft zum Reifendruck zur Verfügung. Wichtig ist, dass die Aufnahme der Pflanzen in den Mechanismus nicht durch die Presskraft bzw. die Verbindung verhindert wird.

Bei den Stern- und Zahnradgeometrien ist eine flexible Verbindung zwischen den Rollen nötig, um die Pflanzen in das System aufzunehmen. Daher wurde in dem Prüfstand eine Zugfeder eingebaut, die durch eine Schraube verspannt wird. Da die Anwendung der Zugfeder eine einfache Konstruktion und Einstellung des Systems ermöglicht, wird diese Lösung beibehalten.

Weiterhin kann die Presskraft entweder an einem Ende der Rollen, wie im entwickelten Prüfstand, oder zweiseitig aufgebracht werden. Obwohl die einseitige Verbindung die Übertragung des Drehmoments von der Antriebsrolle zur Laufrolle ermöglicht, wurde nach den Vorversuchen eine leichte Verbiegung der Trägerstruktur festgestellt, welche die Parallelität der Drehachsen beeinträchtigt. Dies kann einen unregelmäßigen Kontakt zwischen den Rollen sowie eine ungleiche Aufteilung der Kräfte verursachen. Beide Nachteile können durch eine zweiseitige Verbindung kompensiert werden. Dabei werden nicht nur die Ausreißkräfte gleichmäßig verteilt, sondern auch das Gewicht, das ansonsten die Lager und weitere Komponenten asymmetrisch belastet.

Funktion 2.1 Unkraut erfassen

Bei dieser Funktion handelt sich um die Auswahl der Rollen, aber auch um ihre Drehrichtung. Die Geometrie der Rollen wurde in Abschnitt 4.3.2 bei der Entwicklung des Kleinprobenprüfstands angegangen und in den Vorversuchen getestet. Als geeignete Lösung stellte sich die Sterngeometrie heraus und wird weiter verwendet. Der Bereich der Arbeitsparameter des Systems wurde mit dieser Geometrie ermittelt.

Die Drehrichtung der Rollen ist in Abb. 4.16 dargestellt. Aktuell drehen die Rollen um die x-Achse, die parallel zur Fahrtrichtung verläuft. Die erzeugende Ausreißkraft ändert sich nicht, wenn die Drehung der Rollen um die y-Achse stattfindet. Allerdings ist das Verhältnis von Dreh- und Fahrgeschwindigkeit in Bezug auf die y-Achse ungünstig.

Das System funktioniert effektiv, wenn die Pflanzen in einem Schwellenfach von den Rollen erfasst werden, bevor die nächste Fläche erreicht wird. Laut Vorversuchen müssen die Rollen pro Schwellenfach mehr als eine Umdrehung durchführen. Das Verhältnis von Fahr- und Drehgeschwindigkeit wird in diesem Fall durch die Rollenlänge beeinflusst. Derzeit sind die Rollen 200 mm lang. Es sei angenommen, es gäbe ein Rollenpaar mit einer Länge von 1000 mm.

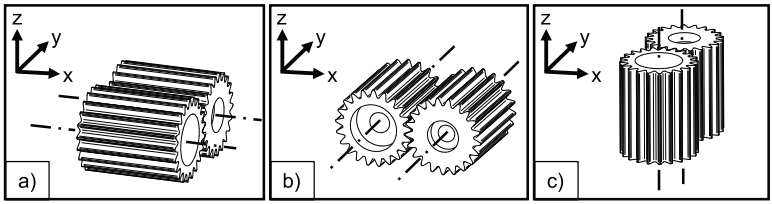


Abb. 4.16: *Mögliche Drehungsrichtungen der Rollen*

Wenn beide Rollenpaare (die kurzen und die langen) mit der gleichen Drehgeschwindigkeit arbeiten, verlassen die kurzen Rollen die Fläche schneller als die langen. Das bedeutet, dass längere Rollen mehr Umdrehungen auf derselben Fläche schaffen als kürzere. Um dies auszugleichen, müssten sich die kurzen Rollen schneller drehen.

Wenn sich die Rollen um die y-Achse drehen, ist nicht deren Länge entscheidend, sondern die Breite der Kontaktfläche, welche viel schmaler ist als die 200 mm Länge der Rollen. Daher müssen sich auch auf der y-Achse rotierende Rollen schneller drehen als diejenigen entlang der x-Achse. Somit ist eine Drehung um die y-Achse nachteilig für das System.

Die Drehung um die z-Achse wurde in den Vorversuchen erprobt. Dabei wurde beobachtet, dass die Pflanzen durch den Mechanismus gezogen, aber weder ab-, noch ausgerissen wurden. Bei der Berechnung der Kraftvektoren ist offensichtlich, dass bei der Drehung der Rollen um die z-Achse keine Kraft in Vertikalrichtung aufgebracht wird. Deshalb wird die Drehung der Rollen weiterhin um die x-Achse durchgeführt.

Funktion 2.2 Pflanze auswerfen

Die Funktion, Unkraut aus dem Mechanismus zu entfernen, kann alleine durch die Drehbewegung der Rollen oder mit Hilfe von Bürsten, Drähten, scharfen Klingen oder anderen Elementen erreicht werden, die während des Betriebs das gezogene oder gemähte Material von den Rollen reinigen oder lösen. Dieser Aspekt wurde während der Vorversuche beobachtet. Nach dem Blockieren des Mechanismus, wurde er durch die Vorwärtsbewegung des Systems wieder befreit. Folglich wird keine zusätzliche Ausrüstung eingesetzt, um den Mechanismus in diesem Aspekt zu unterstützen, stattdessen wird das Unkraut ausschließlich durch die Drehbewegung ausgeworfen.

4.3.6 Morphologischer Kasten und Gesamtkonzept des maschinellen Jätens

Bei der Methode des morphologischen Kastens handelt sich um eine zweidimensionale Matrix, in der die Teilfunktionen und Teillösungen strukturiert und visualisiert werden. Daraus wird für jede Teilfunktion eine Teillösung ausgewählt. Die Verknüpfung der Teillösungen untereinander stellt die Gesamtlösung zusammen und wird für die Gestaltung des Systems weiter gebraucht. [Ben21]

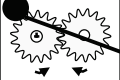
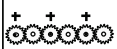
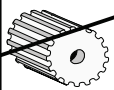
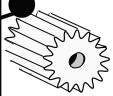
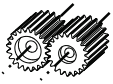
Abb. 4.17 zeigt den morphologischen Kasten des Systems zum maschinellen Jäten. Basierend auf den erhaltenen Ergebnissen der Vorversuche und der Analyse der vorgeschlagenen Teillösungen wird das Gesamtkonzept ausgewählt. Laut des Produktentwicklungsprozesses werden die bevorzugten Gesamtkonzepte anhand der Systemanforderungen bewertet. Wenn viele Teillösungen für eine Funktion verfügbar sind, werden diese ebenfalls evaluiert, um die Auswahl zu reduzieren [Sch12].

Durch die Vorversuche im Labor und Gleisbereich wurden mehrere Teillösungen des maschinellen Jätens erprobt, sodass auch ihre jeweiligen Vor- und Nachteile evaluiert wurden. Für manche Teilfunktionen hat sich ausschließlich eine geeignete Lösung herauskristallisiert. Dadurch ergibt sich ein Einzelgesamtkonzept, wodurch keine weitere Bewertung der Teillösungen nötig ist, wie es üblicherweise im Produktentwicklungsprozess erfolgt. Die ausgewählten Lösungen sind im morphologischen Kasten mit einem Punkt markiert und stellen somit das Gesamtkonzept dar.

Vorstellung des Gesamtkonzepts

Das Gesamtkonzept verwendet elektrische Motoren als Antrieb, deren Drehmoment an jedem Einzelrollenpaar übertragen wird. Bei der Auswahl des Motors muss darauf geachtet werden, dass das Drehmoment im Zusammenhang mit dem Rollendurchmesser Zugkräfte über 180 N erzeugt, um Blockaden während der Pflanzenbehandlung zu minimieren. Darüber hinaus muss das Verhältnis zwischen Dreh- und Fahrgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Ein angemessenes Verhältnis konnte bei 3 km/h – 200 U/min, 1 km/h – 100 U/min und 1 km/h – 300 U/min erreicht werden, wobei das Verhältnis mehr als 1,8 Umdrehungen pro Fläche zwischen den Schwellen überschreitet.

Bei der Erzeugung der Presskraft zwischen den Rollen ist eine flexible Verbindung erforderlich, um die Bearbeitung verschiedener Pflanzengrößen und -formen zu ermöglichen. Da die Anwendung einer Zugfeder eine einfache Konstruktion ermöglicht, wird diese weiter verwendet. Die Einstellung der Presskraft

		Teillösungen				
Teilfunktionen		1	2	3	4	5
1.1 Vertikale Kraft bzw. Drehmoment erzeugen	Antriebsart	Elektrisch	Hydraulisch	Pneumatisch		
	Übertragungssystem	An jedem Rollenpaar 	Am Ende der Reihe 	Mehrere Antriebe 		
1.2 Presskraft in Rollen erzeugen	Verbindungsart	Festgesetzt	Spannschloss	Zugfeder		
	Einbringungsstelle	Einseitig	Zweiseitig			
2.1 Unkraut erfassen	Formschluss	Gummireifen 	Hubwagenrollen 	Industriewalzen 	Zahnradgeometrie 	Sterngeometrie 
	Rotationsachse	x-Achse 	y-Achse 	z-Achse 		
2.2 Pflanze auswerfen		Durch Drehbewegung ohne zusätzliche Anlage	Scharfe Klingen	Tellerbürste	Auswurfmechanismus	

Gesamtkonzept des Jätsystems

Abb. 4.17: *Morphologischer Kasten des Jätsystems*

auf ca. 300 N genügte in den Vorversuchen. Allerdings können bei der Erhöhung des Drucks zwischen den Rollen höhere Gewichte hochgezogen werden, die nicht nur das Abreißen sondern auch das Ausreißen der Pflanzen erzielen könnten. Daher ist es vorgesehen, auch eine Presskraft von 450 N weiter zu testen.

Weiterhin besteht das Gesamtkonzept aus der Verwendung der Sterngeometrie für die Rollen und der Drehung des Mechanismus um die x- Achse ohne Winkel zur Horizontalen oder Vertikalen. Dazu sind kleine Rollendurchmesser vorteilhaft, da höhere vertikale Kräfte aus dem Motormoment als bei größeren Durchmessern resultieren. Ein weiterer Vorteil kleiner Durchmesser besteht darin, dass der Greifpunkt der Rollen nahe am Schotter positioniert werden kann, da das Unkraut so niedrig wie möglich gezogen werden muss, um die Effektivität der Behandlung zu steigern.

Bezüglich des Pflanzenauswerfens wird das System ohne weitere Hilfsausrüstung konstruiert. Stattdessen wird das Unkraut durch die Drehbewegung der Rollen aus dem System ausgeworfen, da diese Lösung in den Vorversuchen effektiv war.

Das Gesamtkonzept wird weiterhin für die Erprobung des Systems in flächendeckenden Versuchen konstruiert und gebaut. Im Kapitel 5 werden das gestaltete CAD-Modell sowie der gebaute Versuchsträger dargestellt.

5 Erprobung des Jätsystems im Gleisbereich

Um das maschinelle Jäten auf seine Effizienz und Eignung auf Gleisanlagen zu prüfen, wurde das im Abschnitt 4.3.6 aufgestellte Gesamtkonzept in Form eines Versuchsträgers konstruiert und gebaut. Im Rahmen des Projekts „Entwicklung eines Alternativverfahrens zur chemischen Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen“, aus welchem teilweise Erkenntnisse für diese Dissertation gewonnen wurden, wurden zusätzlich zu dem maschinellen Jäten das Elektroweeding und das Druckwasserstrahl-Verfahren einzeln und in Kombination im Gleisbereich getestet.

Dementsprechend dient der Versuchsträger der Aufnahme der Applikatoren zur Vegetationskontrolle sowie der Unterbringung von Energie- und Medienversorgung für die drei Systeme, die in ihrem Aufbau Schnittstellen miteinander teilen. Im Folgenden wird ausschließlich der Aufbau des Anlagenteils des maschinellen Jätens und die Ergebnisse dessen Erprobung detailliert beschrieben. Informationen zu den anderen Technologien befinden sich im Abschlussbericht des Projekts [Arc26].

5.1 Vorstellung des Versuchsträgers

Der Versuchsträger besteht aus den Rollen zum maschinellen Jäten (Jätmodul), dem Trägermodul, an dem die Rollen für ihren Einsatz im Gleisbereich eingebaut werden, und aus einem Zugfahrzeug, das das Trägermodul zieht.

Jätmodule

Auf Grundlage des Gesamtkonzepts, das auf verzahnten Kunststoffrollen basiert, wird ein sprechender Apparat für die flächendeckende Anwendung des maschinellen Jätens auf Gleisanlagen realisiert. Wie in Abb. 5.1 gezeigt, werden die Rollen in Modulen mit zwei und drei Paaren eingebaut. Jedes Jätmodul enthält einen Drehstrommotor mit Schneckengetriebe, der über Kettentriebe jeweils eine Rolle eines Rollenpaares antreibt. Das bedeutet, dass jedes Rollenpaar aus einer Antriebsrolle und einer Laufrolle besteht. Der Motor arbeitet mit einer max. Drehzahl von ca. 300 U/min und erzeugt ein max. Drehmoment von 45 Nm, welches für alle Rollenpaare eines Moduls zur Verfügung steht. Die Motorleistung beträgt 1,5 kW.

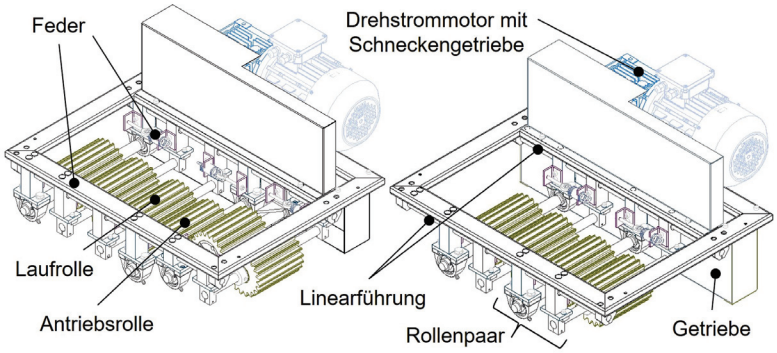


Abb. 5.1: *CAD-Darstellung der Jätmodule mit drei und zwei Rollenpaaren*

Um die Parallelität der Rollen zu gewährleisten, werden diese zweiseitig gelagert. Dabei ist die Antriebsrolle fest am Modulrahmen angeschraubt, während die Laufrolle über eine Linearführung verschoben werden kann. Diese Eigenschaft ist nötig, um Unkraut verschiedener Dicken aufnehmen zu können. Auf jeder Seite des Rollensatzes wird eine Feder zwischen Lauf- und Antriebsrolle angeordnet, die eine gleichmäßige Presskraft zwischen den Rollen erzeugt. Die Federrate beträgt 9,761 N/mm bzw. insgesamt 19,522 N/mm und ermöglicht die erforderliche Presskraft von 300 N und 450 N.

Die Rollen sind mit einer Sterngeometrie und einem Außendurchmesser von 115 mm gefertigt, drehen sich um die x-Achse (Achse in Fahrrichtung) und sind ohne Winkel zur Horizontalen positioniert. Das Unkraut wird ohne Hilfsausrüstung durch die Drehung der Rollen ausgeworfen.

Durch die Anordnung der Rollen wird die Hälfte einer Breite des Bereichs A (ebener Bereich des Schotterbettes, Abb. 2.1) abgedeckt, Abb. 5.2. Da die Vegetation auf dem Schotterbett quer zur Fahrtrichtung häufig homogen wächst, steht bei der Behandlung einer Hälfte der Gleisbreite die andere Hälfte als unbehandelte Kontrollfläche zur Verfügung oder kann zum Vergleich mit der Wirkung anderer herbizidfreier Methoden genutzt werden.

Pro Jätmodul gibt es Bereiche, in denen keine Pflanzen erfasst werden können. Daher sind, wie in Abb. 5.2 gezeigt, für eine intensive Behandlung drei Jätmodule mit versetzten Zahnradpaaren hintereinander in einem Rahmen montiert, was mit allen Steuerungselementen zu einer benötigten Gesamtleistung von maximal 4 kW bis 5 kW pro Rahmen führt. Für die Behandlung der Hälfte des Bereichs A sind zwei Rahmen mit jeweils drei gegeneinander versetzten Jätmodulen vorgesehen. Abb. 5.3.a zeigt die finale Umsetzung des Jätmoduls.

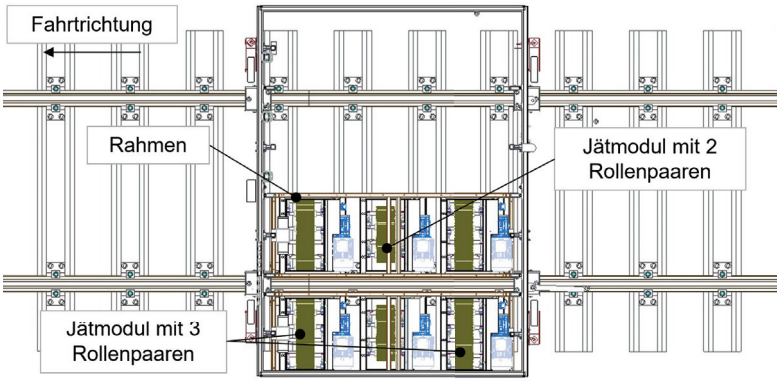


Abb. 5.2: *CAD-Anordnung der Jätmodule auf dem ebenen Bereich des Schotterbettes (Bereich A)*

Trägermodul

Das Trägermodul stellt die Schnittstelle zwischen Zugfahrzeug und dem System zur Vegetationskontrolle dar, Abb. 5.3.b und .c. Es handelt sich um eine Stahlstruktur auf Schienenrollen mit genügend Platz für den Aufbau der Jätmodule, der Applikatoren des Systems Elektroweeding, der Düsen des Druckwasserstrahl-Verfahrens und der Versorgungsleitungen der drei Systeme. Ebenso können die Düsen des Wasserstrahls an der Vorderseite des Fahrzeugs angebracht werden.

Die Rahmen, an die die Module des maschinellen Jätens und des Elektroweedings montiert sind, werden über einen Spindelantrieb angehoben und abgesenkt, sodass sie gezielt mit der Vegetation in Kontakt gebracht werden können. Diese Funktion ist ebenfalls für den Transport auf der Straße sowie für das Ausweichen von Hindernissen im Gleis notwendig. Dabei werden die außerhalb der Fahrzeugbegrenzungslinie arbeitenden Applikatoren zurück in die Linie gehoben. Das Trägermodul ist so konzipiert, dass es für den Straßentransport auf einen Lkw verladen werden kann.

Durch das Drehen des Trägermoduls an der Eingleisstelle ist es möglich, auch die andere Hälfte des Gleisbettes zu behandeln. Zur Behandlung der Schotterflanken kann ein Ausleger ausgefahren werden, der die Vegetation aktuell ausschließlich mit dem System Elektroweeding in diesen Bereichen erfasst.

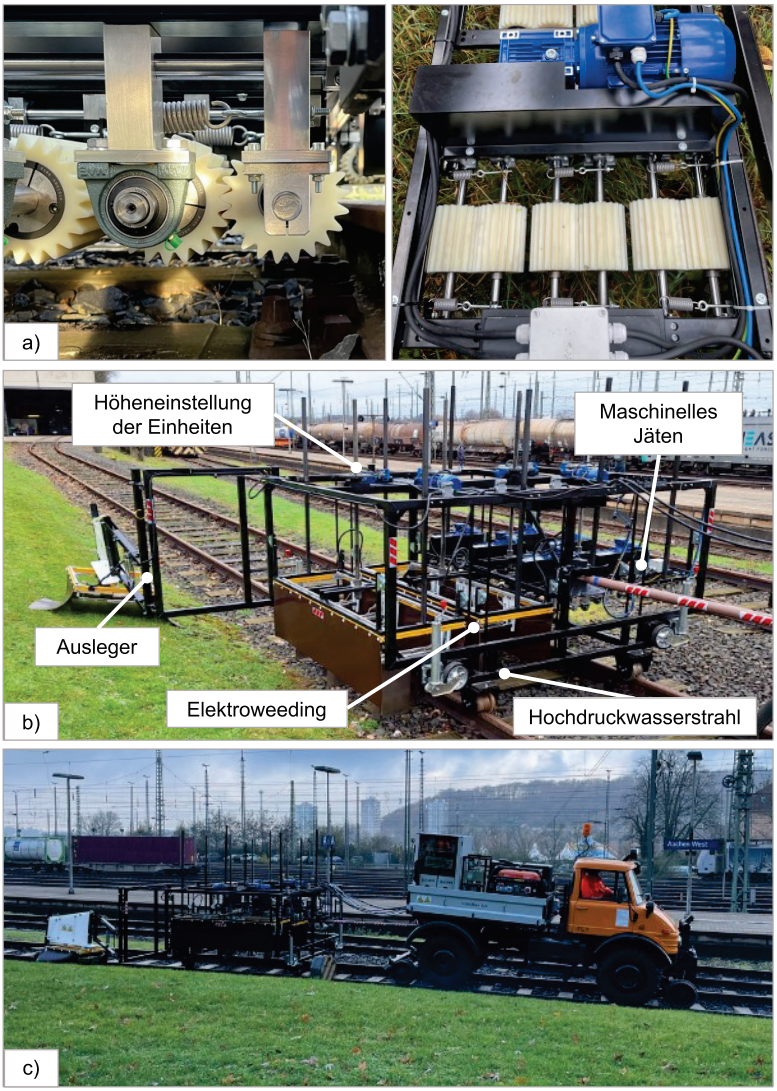


Abb. 5.3: *Versuchsträger zur flächendeckenden Erprobung des maschinellen Jätens im Gleisbereich: a) Jätmodul b) Trägermodul c) Gesamtsystem [Jen24]*

Zugfahrzeug

Wie in der Abb. 5.3.c gezeigt wird, zieht ein Zweiwegefahrzeug das System aus Trägermodul und Module zur Vegetationskontrolle auf dem Gleis. Die Ladefläche des Zugfahrzeugs dient zur Energiebereitstellung, beispielsweise durch Generatoren, oder zur Versorgung mit Betriebsstoffen, wie Wasser für das Druckwasserstrahl-Verfahren. Steuerungsgeräte sind ebenfalls darauf befestigt. Die auf dem Gleis zulässige Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs liegt bei 25 km/h.

Das Zugfahrzeug wird über eine Kuppelstange aus Stahl mit dem Trägermodul verbunden, welche die Zug- und Druckkräfte beim Antreiben und Bremsen überträgt. Um die Sicht des Triebfahrzeugführers nicht zu beeinträchtigen, wird das Trägermodul hinter dem Fahrzeug angeordnet, sodass es von diesem gezogen wird. Dadurch können mögliche Hindernisse besser erkannt werden. Neben der Fahrzeugführung werden die Funktionen der Vegetationskontrollsysteme vom Betriebspersonal manuell aus der Fahrzeugkabine gesteuert.

Für den Erhalt einer Betriebszulassung wurden die Anforderungen der Verordnung über den Bau und Betrieb von Anschlussbahnen (BOA) erfüllt, welche von den Betreibern als ausreichend betrachtet werden. Um die Sicherheit des Personals während des Versuchsbetriebs zu gewährleisten, wurde eine Gefährdungsanalyse durchgeführt und entsprechend Sicherheitsmaßnahmen eingeführt.

5.2 Versuchsvorbereitung

5.2.1 Zielsetzung der Versuche

Die Versuche im Gleis zielten darauf ab, die Wirksamkeit und die Effizienz des maschinellen Jätens zu evaluieren, um eine quantifizierbare Aussage zur Performanz des Vegetationskontrollverfahrens zu ermöglichen. Die Bewertung der Wirksamkeit erfolgt anhand des Störgrads der Pflanzen, weshalb entsprechende Kriterien definiert werden. Die Effizienz wird anhand des direkten Energiebedarfs bewertet.

Außerdem soll bei den Versuchen die Interaktion der Technologie mit dem Betriebspersonal und der Umgebung, insbesondere in Bezug auf die Sicherheit der Mitarbeitenden und mögliche Störungen in der Eisenbahninfrastruktur, beobachtet werden.

Die Versuche wurden in der ersten Hälfte der Vegetationsperiode 2024 im Zeitraum von April bis Juni durchgeführt, um das maschinelle Jäten sowohl auf den neuen Aufwuchs als auch auf die zugewachsene Vegetation zu evaluieren. Der

Effekt der Behandlung wurde bis zu vier Wochen nach dem Versuch dokumentiert, um die anhaltende Wirkung abzubilden. Dies gilt für die Versuche im Juni bis Ende Juli. Nach Ablauf der vier Wochen bis zum Ende des Versuchszeitraums wurden die Flächen weiterhin beobachtet, allerdings ohne systematische Auswertung, um eine mögliche längerfristige Wirkung abzuschätzen. Die genaue Langzeitwirkung des maschinellen Jätens (über ein Jahr oder mehrere Jahre) kann jedoch aus diesen Versuchen nicht abgeleitet werden. Dies erfordert eine Erprobung der Technologie über längere Versuchszeiträume. Eine Erstevaluierung der langfristigen Wirksamkeit wird im Kapitel 6 durchgeführt.

Zu berücksichtigen ist, dass Versuche im Gleisbereich, im Unterschied zu Laborexperimenten, unter keinen standardisierten Bedingungen durchgeführt werden und somit viele Außenfaktoren die Ergebnisse beeinflussen können. Darüber hinaus sind die Pflanzenarten in unterschiedlicher Anzahl vertreten, sodass die Anzahl der möglichen Wiederholungen davon abhängt.

5.2.2 Eigenschaften der Versuchsstrecken

Für die Durchführung der Versuche wurden zwei Teststrecken genutzt. Bei einem Gleisabschnitt handelte sich, wie in den Vorversuchen im Gleis (Abschnitt 4.3.4), um die Strecke in Vetschau, die der Museumsbahn Miljoenenlijn der Stiftung Zuid-Limburgse Stoomtrein Maatschappij (ZLSM) gehört. Der zweite Abschnitt ist Teil des Schienennetzes der Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerks AG (RWE AG) in Bergheim-Niederaußem, Abb. 3.1. Von diesen wurden folgende Eigenschaften erfasst, die der Bewertung der Wirksamkeit dienen:

- Organischer Feinanteil im Schotterbett
- Vegetationsart
- Wuchshöhe und Dichte der Vegetation
- Umliegende Vegetation (Wald, Feld, Gewässer, etc.)
- Beschattung (starker Bewuchs im Randbereich, geringer Bewuchs, etc.)
- Bisherige Vegetationskontrolle
- Anlagennutzung und -alter

Die Menge des organischen Feinanteils im Schotterbett wird optisch ermittelt und in niedrig, mittel und hoch kategorisiert. Ein niedriger Feinanteil liegt vor, wenn in der oberen Schicht des Schotterbettes in bis zu etwa 150 mm Tiefe kaum Feinmaterial vorhanden ist. Die mittlere Stufe wird erreicht, wenn

zwischen den Steinen sichtbar Feinmaterial vorhanden ist. Ein hoher Feinanteil beschreibt den Zustand des Schotterbettes, bei dem das Feinmaterial von oben deutlich sichtbar ist.

Die Vegetationsarten werden in krautige, verholzende bis verholzte Pflanzen und in Gräser unterteilt. Obwohl Gräser zu den krautigen Pflanzen gehören, können sie aufgrund ihrer robusten Wuchsformen höhere Dosis benötigen. Verholzende Pflanzen nehmen im Verlauf des gesamten Versuchszeitraums kontinuierlich zu, was die Unterscheidung zwischen ihnen und verholzten Pflanzen erschweren kann. Daher werden beide Pflanzenarten in eine Gruppe aufgenommen. Abb. 5.4 illustriert die drei Pflanzengruppen.

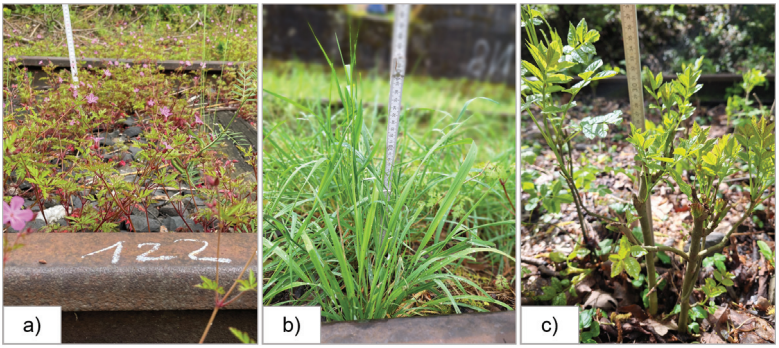


Abb. 5.4: *Wuchsformen zur Aufteilung der Gleisabschnitte: a) Krautig b) Gräser c) Verholzend bis verholzt*

Zu den am häufigsten aufgetretenen krautigen Pflanzen in den Versuchsfahrten, die auch in Vegetationsstudien im Gleisbereich genannt sind [Egg01, Gey08, Büs08], zählen:

- Wilde Möhre *(Daucus carota)*
- Weidenröschen *(Epilobium spec.)*
- Ackerschachtelhalm *(Equisetum arvense)*
- Kletten-Labkraut *(Galium aparine)*
- Storchschnäbel *(Geranium spec.)*
- Gewöhnliches Ferkelkraut *(Hypochaeris radicata)*
- Echtes Leinkraut *(Linaria vulgaris)*
- Spitzwegerich *(Plantago lancelota)*

- Greiskräuter *(Senecio spec.)*
- Ehrenpreis *(Veronica spec.)*
- Wicken *(Vicia spec.)*

Die am häufigsten erfassten Gräser waren:

- Aufrechte Trespe *(Bromus erectus)*
- Taube Trespe *(Bromus sterilis)*
- Land-Reitgras *(Calamagrostis epigejos)*
- Wolliges Honiggras *(Holcus lanatus)*

Auf den Versuchsstrecken häufig auftretende verholzende bis verholzte Pflanzen waren:

- Ahorn-Arten *(Acer spec.)*
- Weißbirke *(Betula pendula)*
- Schmetterlingsflieder *(Buddleja davidii)*
- Hainbuche *(Carpinus betulus)*
- Echtes Johanniskraut *(Hypericum perforatum)*
- Hundsrose *(Rosa canina)*
- Brombeeren *(Rubus fruticosus)*
- Schwarzer Holunder *(Sambucus nigra)*

Die Vegetationsdichte sowie die Wuchshöhe wurden vor und nach den Versuchen erfasst. Die Vegetationsdichte wurde visuell ermittelt, während die Wuchshöhe gemessen wurde. Weitere Informationen zur Erfassung der Vegetationsdichte und der Wuchshöhe sind im Abschnitt 5.2.3 beschrieben.

Die Beschattung wurde in ganztägig beschattete Flächen, teilweise beschattete Flächen und ganztägig sonnenexponierte Flächen unterteilt und entsprechend dem behandelten Abschnitt dokumentiert.

Versuchsstrecke Vetschau

Es handelt sich um einen 1,3 km langen Gleisabschnitt, auf dem keine chemische Vegetationskontrolle erlaubt ist. Stattdessen wird ein jährlicher mechanischer Rückschnitt der Vegetation durchgeführt. Das Gleis wurde 1925 in Betrieb genommen. Daten zur letzten Instandhaltung sind nicht bekannt.

Entlang der Gleise ist überwiegend eine dichte Vegetation aus Büschen und Bäumen vorzufinden, die den Gleisbereich beschattet und zu einem hohen Eintrag von organischem Material führt, Abb. 5.5.a.

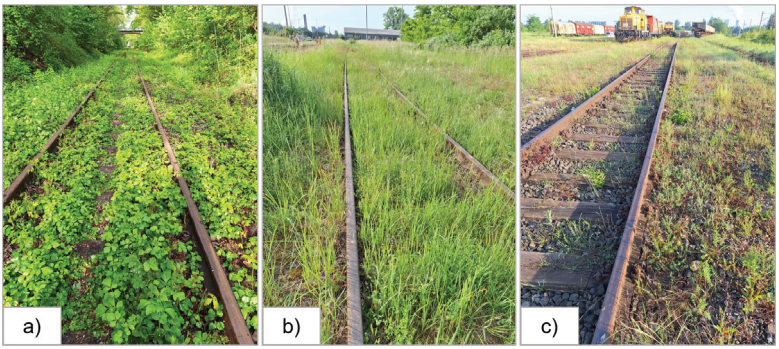


Abb. 5.5: *Fotos der Versuchsstrecken: a) Vetschau - Strecke mit hoher Vegetationsdichte und hohem Feinanteil b) Bergheim - Streckenabschnitt mit hoher Vegetationsdichte und hohem Feinanteil c) Bergheim - Streckenabschnitt mit niedriger Vegetationsdichte und geringem Feinanteil*

Auf der Versuchsstrecke wurden 52 Pflanzenarten identifiziert. Die am häufigsten aufgetretenen Wuchsformen waren krautige Pflanzen (60 %), gefolgt von verholzten Pflanzen und Gräsern, Abb. 5.6.

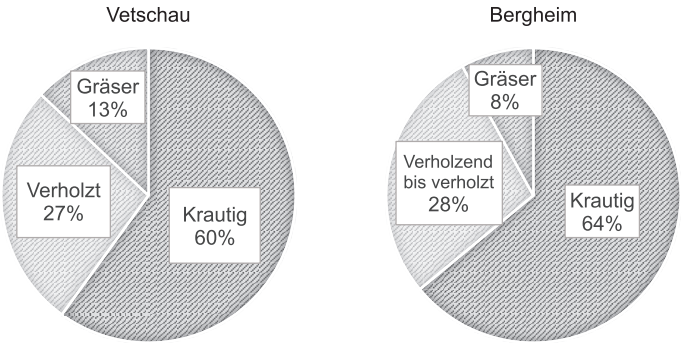


Abb. 5.6: *Erhobene Pflanzenarten der Versuchsstrecken*

Versuchsstrecke Bergheim

Es handelt sich dabei um mehrere Gleisabschnitte, die in zwei Standorte aufgeteilt sind. Am ersten Standort befinden sich sechs Rangier- und Abstellgleise, die weitestgehend frei von größerer Vegetation wie Büschen oder Bäumen im Randbereich sind. Dadurch sind die Gleise stark der Sonne ausgesetzt, erhalten jedoch zeitweise Schatten von abgestellten Wagons. Am zweiten Standort hingegen ist der Randbereich auf einer Seite mit Büschen und Bäumen bewachsen, was zu temporären Beschattungen führt. Auf allen Gleisen, die für die Versuche genutzt werden, erfolgt jährlich eine mechanische Kontrolle der Vegetation. Die Gleise wurden 1955 in Betrieb genommen. Auch hier sind keine Daten zur letzten Instandhaltung bekannt.

Die einzelnen Strecken weisen verschiedene Eigenschaften auf, wie die Vegetationsdichte, den Feinanteil oder die Lage, Abb. 5.5.b und .c. Diese wurden spezifisch bei der Durchführung der Versuche erfasst. Auf den Gleisen wurden insgesamt 61 Arten identifiziert, die hauptsächlich aus krautigen Pflanzen (64 %) bestehen, Abb. 5.6. Verholzende bis verholzte Pflanzen machten 28 % der Gesamtanzahl aus, während Gräser 8 % erreichten.

5.2.3 Aufteilung und Dokumentation der Versuchsabschnitte

Auf den Versuchsstrecken sind Abschnitte mit homogenen Pflanzenarten, Vegetationsdichten und Wuchshöhen erkennbar, Abb. 5.7. Auch wenn innerhalb der Abschnitte unterschiedliche Arten auftreten oder sie nicht vollständig voneinander getrennt sind, ließen sich die Bereiche anhand ihrer durchschnittlichen Eigenschaften einteilen. Die identifizierten Flächen wurden in Gleisabschnitten von 25 m bis 50 m Länge unterteilt, was etwa 40 bis 80 Schwellenfächern entspricht.

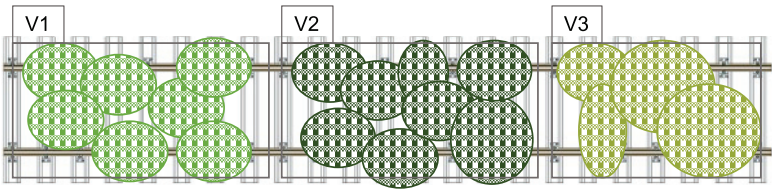


Abb. 5.7: *Darstellung des Vegetationswachstums im Gleis und Aufteilung der Streckenabschnitte*

Danach erfolgte eine Beschriftung der Bereiche, durch Markierung ausgewählter Schwellenfächer (ca. alle 3 m), um den Effekt der Behandlung an immer derselben Stelle zu kontrollieren, Abb. 5.8. Daher wird der Ausgangszustand der

ausgewählten Schwellenfächer vor jeder Behandlung dokumentiert. Dies umfasst die Messung der Wuchshöhe, die visuelle Ermittlung der Vegetationsdichte sowie das Aufschreiben der Pflanzenarten und der Menge des Feinanteils im Schotter. Im verbleibenden Bereich außerhalb der markierten Schwellenfächer erfolgte keine spezifische Auswertung einzelner Pflanzen, stattdessen wurde die Vegetationsdichte geschätzt und die Pflanzenhöhe gemittelt. Die Erfassung des Ausgangszustands wurde anhand von Fotos unterstützt.

Die Behandlungen der Pflanzen fanden im Abstand von ca. 4 Wochen statt. Nach den Versuchen wurden im Abstand von 10 Tagen bis zur nächsten Behandlung die Versuchsabschnitte beobachtet und dokumentiert. Dabei wurden erneut die Pflanzenarten, die Vegetationsdichte und die Wuchshöhe erfasst. Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse zur Wirksamkeit beziehen sich auf die letzte Datenerfassung, also vier Wochen nach dem Versuch.

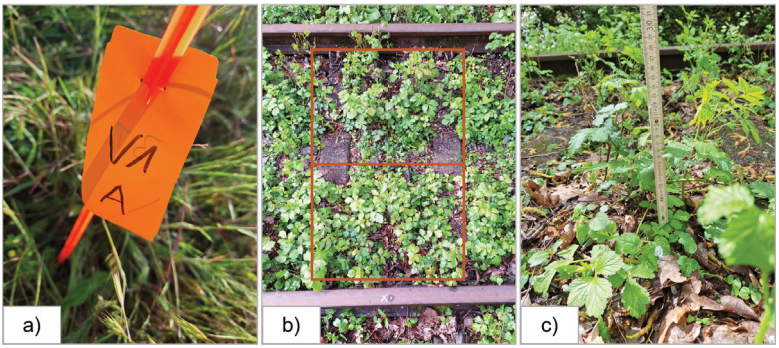


Abb. 5.8: *Dokumentierung der Versuchsabschnitte: a) Markierung der Arbeitsbereiche b) Ermittlung der Vegetationsdichte c) Messung der Pflanzenhöhe*

5.2.4 Bewertungsstufen der Wirksamkeit

Zur Evaluierung der Wirksamkeit wurden fünf Bewertungsstufen festgelegt, mit denen die nach der Behandlung gehobenen Pflanzenzustände kategorisiert wurden. Diese lauten wie folgt:

- Geringe Wirksamkeit: Die Pflanze wächst nach der Behandlung weiter. Einige Pflanzensprossen oder Baumstämme können zwar beschädigt sein, jedoch hat dies keine Auswirkungen auf die weitere Entwicklung der Pflanze.
- Reduziertes Wachstum: Die Pflanze zeigt im weiteren Wuchs eine Reduktion. Im Vergleich zu unbehandelten Pflanzen ist ein Wachstumsrückstand

erkennbar, was dazu führt, dass die Ausbildung von Blüten und Samen vermindert oder ganz ausbleibt. Bei verholzten Pflanzen (Bäumen) erfolgt die Laubbildung verzögert.

- Abgestorbene Pflanze mit Neuaustrieb: Der Großteil der Pflanze ist abgestorben, jedoch zeigt sich ein neuer Austrieb aus den Wurzeln oder der Basis.
- Abgestorbene Pflanze mit reduziertem Neuaustrieb: Die meisten Pflanzen sind abgestorben und nur wenige Pflanzen wachsen neu auf. Bei verholzten Pflanzen (Bäume) erfolgt kaum Laubbildung.
- Vollständig abgestorbene Pflanze: Die Pflanze ist abgestorben und keine neue wächst auf.

5.2.5 Versuchsparameter des maschinellen Jätens

Zusätzlich zur Erprobung des Systems auf unterschiedliche Pflanzenarten wurden vier Arbeitsparameter der Rollen variiert: Die Fahr- und Drehgeschwindigkeit, die Anzahl der Überfahrten und die Presskraft zwischen den Rollen. Tabelle 5.1 gibt den Überblick der Gesamtkenngrößen.

Tab. 5.1: *Versuchsparameter zur Erprobung des maschinellen Jätens*

Arbeitsparameter	Kennzahlen
Fahrgeschwindigkeit (km/h)	1; 2,5; 5; 7,5; 10
Drehgeschwindigkeit (U/min)	100; 200; 300
Anzahl der Überfahrten / vgl. Einheiten im Großgerät	2; 4; 8
Presskraft (N)	150 (April); 300 (Mai); 450 (Juni)

Die Fahrgeschwindigkeit wurde systematisch aufsteigend in fünf Stufen von 1 km/h bis zu 10 km/h getestet, während die Drehgeschwindigkeit in drei Stufen von 100 U/min bis 300 U/min erhöht wurde.

Zur Steigerung der Anwendungsgeschwindigkeiten wurden mehrere Überfahrten durchgeführt, die den Effekt mehrerer hintereinander geschalteter Einheiten des maschinellen Jätens darstellen und die Einschätzung für zukünftige Bauweisen des Systems bietet. Die Anzahl der Überfahrten wurde in drei Stufen getestet: 2, 4 und 8.

Die Presskraft wurde ebenfalls aufsteigend erprobt. Allerdings erforderte die Verspannung der Feder einige Stunden Bearbeitungszeit, was auf Feld nicht

durchgeführt werden kann. Daher erfolgte die schrittweise Erhöhung der Presskraft in den Perioden zwischen den Versuchsreihen: Im April betrug sie 150 N, im Mai 300 N und im Juni 450 N.

Ein weiterer einstellbarer Parameter des Systems ist die Positionierung des Greifpunkts der Rollen, der konstant auf einer Höhe von 200 mm über dem Schotter eingestellt wurde. Aufgrund von Unebenheiten im Schotter und dem Anbau zusätzlicher Komponenten des Versuchsträgers konnte der Greifpunkt der Rollen nicht weiter abgesenkt werden.

5.3 Ergebnisse und Diskussion der Versuche

5.3.1 Wirkung des maschinellen Jätens

Die Versuchsergebnisse sind in Korrelation mit der Pflanzenart, den technischen Parametern und dem Gleiszustand in Tab. 5.2 dargestellt und werden in aufsteigender Reihenfolge in Bezug auf die Fahrgeschwindigkeit gezeigt.

Die Auswertung der Daten erfolgte ausschließlich nach den Pflanzenarten und den technischen Parametern bzw. der Anzahl der Überfahrten, dem Verhältnis zwischen Fahr- und Drehgeschwindigkeit und der Presskraft. Der Gleiszustand bzw. der Feinanteil und die Beschattung waren einigermaßen konstant, sodass diese Merkmale nicht gezielt in den Versuchsplan aufgenommen werden konnten. Ein Einfluss konnte jedoch an manchen Stellen beobachtet werden und wird in diesen Fällen erläutert. Der Feinanteil war meistens hoch und die Beschattung variierte stark zwischen den beiden Standorten. Der Standort Vetschau wies sowohl ganztägig beschattete Flächen als auch teilweise beschattete Flächen auf, während die Strecken in Bergheim nahezu durchgehend sonnenexponiert waren.

Die Ergebnisse unterteilen sich außerdem in zwei Hauptwuchsformen: krautige Pflanzen (einschließlich Gräser) und verholzende bis verholzte Pflanzen. Die Gräser wurden in die Kategorie der krautigen Pflanzen eingeordnet, da ihre Wirksamkeit mehrere Gemeinsamkeiten mit den anderen krautigen Pflanzen aufwiesen. Jedoch unterschieden sich die Gräser vom Rest der krautigen Pflanzen im mechanischen Verhalten des Systems gegenüber den Grashalmen. Diese Besonderheiten wurden dokumentiert und werden in der Analyse näher erläutert.

Außerdem enthält Tab. 5.2 die vor sowie vier Wochen nach dem Versuch gemessene Vegetationsdichte und Pflanzenhöhe. Die Werte wurden aus den insgesamt behandelten Abschnitten gemittelt und die prozentuale Änderung daraus kalkuliert. Darüber hinaus wurde die Entwicklung des Vegetationswachstums nach den im Abschnitt 5.2.4 ermittelten Kategorien bewertet.

Tab. 5.2: *Versuchsergebnisse der flächendeckenden Erprobung des maschinellen Jätens im Gleisbereich*

		Technische Parameter				Gleiszustand		Versuchsergebnisse						
Versuchsnummer	Pflanzenart	Fahrgeschwindigkeit (km/h)	Drehgeschwindigkeit (U/min)	Überfahrten	Presskraft (N)	Feinanteil	Beschattung	VD vor (%)	VD nach (%)	rel. Änderung VD (%)	PH vor (mm)	PH nach (mm)	rel. Änderung PH (%)	Entwicklung
1	Krautig	1	100	2	300	Hoch	kS	90	80	11%	400	250	38%	**RW**
2		1	100	2	450	Hoch	kS	30	20	33%	250	200	20%	**RW**
3		1	100	4	300	Hoch	kS	90	80	11%	400	200	50%	**RW**
4		2,5	100	2	450	Hoch	kS	30	20	33%	250	200	20%	**RW**
5		2,5	100	2	150	Hoch	kS	90	80	11%	400	300	25%	**RW**
6		2,5	100	4	150	Hoch	kS	90	70	22%	400	250	38%	**RW**
7		2,5	200	2	150	Hoch	kS	90	70	22%	400	300	25%	**RW**
8		2,5	200	4	150	Hoch	kS	90	70	22%	400	200	50%	**RW**
9		5	300	2	300	Hoch	S	90	80	11%	400	300	25%	**GW**
10		5	300	4	450	Hoch	kS	80	70	13%	300	250	17%	**RW**
11		5	300	4	300	Hoch	S	70	70	0%	300	250	17%	**GW**
12		5	300	8	300	Hoch	S	70	70	0%	300	200	33%	**GW**
13		7,5	300	2	300	Hoch	S	90	90	0%	300	300	0%	**GW**
14		7,5	300	4	450	Hoch	tS	80	70	13%	300	250	17%	**GW**
15		7,5	300	4	300	Hoch	S	90	90	0%	300	250	17%	**GW**
16		7,5	300	8	300	Hoch	S	90	90	0%	300	250	17%	**GW**
17		10	200	2	150	Hoch	tS	90	90	0%	400	400	0%	**GW**
18		10	200	4	150	Hoch	tS	90	90	0%	400	300	25%	**RW**
1	Zunehmend verholzte Vergetation	1	100	2	300	Mittel	tS	70	60	14%	300	200	33%	**RW**
2		1	100	2	450	Mittel	tS	80	70	13%	300	200	33%	**RW**
3		1	100	2	450	Hoch	tS	90	60	33%	450	250	44%	**RW**
4		1	100	4	300	Mittel	tS	70	60	14%	300	200	33%	**RW**
5		2,5	100	2	450	Mittel	tS	80	70	13%	300	200	33%	**RW**
6		2,5	100	2	450	Hoch	tS	90	60	33%	450	250	44%	**RW**
7		5	300	2	300	Mittel	tS	75	75	0%	300	250	17%	**GW**
8		5	300	4	300	Mittel	tS	75	75	0%	300	250	17%	**GW**
9		5	300	4	450	Mittel	tS	80	70	13%	300	200	33%	**GW**
10		5	300	4	450	Hoch	tS	90	60	33%	450	250	44%	**RW**
11		7,5	300	2	300	Mittel	tS	75	75	0%	300	300	0%	**GW**
12		7,5	300	4	300	Mittel	tS	75	75	0%	300	300	0%	**GW**
13		7,5	300	4	450	Mittel	tS	80	70	13%	300	200	33%	**GW**
14		7,5	300	4	450	Hoch	tS	90	60	33%	450	250	44%	**RW**
15		10	200	4	150	Mittel	tS	70	70	0%	400	250	38%	**RW**
16		10	200	8	150	Mittel	tS	70	70	0%	400	250	38%	**RW**

Begriffserläuterung: VD = Durchschnittliche Vegetationsdichte, PH = Durchschnittliche Pflanzenhöhe, kS = ganztägig beschattete Flächen, tS = teilweise beschattete Flächen, S = ganztägig sonnenexponierte Flächen, GW = geringe Wirksamkeit, RW = reduziertes Wachstum

Wirksamkeit des Systems auf Pflanzengruppen

Unabhängig von der Pflanzenart hat sich gezeigt, dass das System dazu geeignet ist, die Wuchshöhe zu reduzieren. Da der Greifpunkt der Rollen auf etwa 200 mm über dem Schotter positioniert wurde, betrug die Wuchshöhe direkt nach dem Versuch bei den abgerissenen Pflanzen ca. 200 mm. Abb. 5.9 vermittelt einen Eindruck davon im krautigen Bereich.

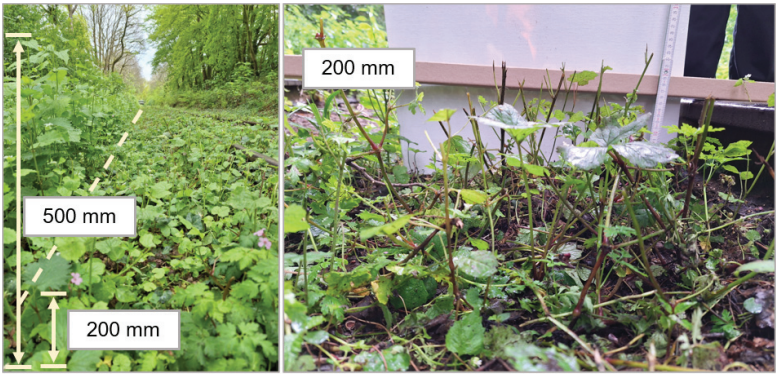


Abb. 5.9: *Reduktion der Wuchshöhe durch die Rollen des maschinellen Jätens im krautigen Bereich [Arc26]*

Vier Wochen nach dem Versuch betrug die maximale Änderung der Pflanzenhöhe 50 % und ist bei krautigen Pflanzen aufgetreten, s. die in Tab. 5.2 grün markierten Werte. Bei beiden Pflanzengruppen wurde eine Änderung in der Vegetationsdichte von maximal 33 % ermittelt. Interessant bei Versuchen mit zunehmend verholzter Vegetation ist, dass ein Einfluss des Feinmaterials beobachtet werden kann. Die Versuche 3, 6, 10 und 14 dieser Gruppe wurden mit identischen Arbeitsparametern und Gleisbeschattung wie die Versuche 2, 5, 9 und 13 durchgeführt, Tab. 5.2. Der einzige Unterschied liegt im Anteil des Feinmaterials. In den vier Fällen wurde die Vegetationsdichte auf dem Abschnitt mit hohem Feinanteil stärker verringert als auf den Strecken mit niedrigem Anteil des Feinmaterials. Dies stimmt mit den Vorversuchen im stillgelegten Gleis mit hohem Feinanteil überein, bei denen das Zupfen von Gräsern eine hohe Quote an entwurzelten Pflanzen erreichte (s. Abschnitt 4.3.4).

Einige verholzte Pflanzen konnten komplett entwurzelt werden, Abb. 5.10.a, während andere von den Rollen erfasst, aber nicht ausgerissen wurden. Trotzdem wies die Rinde starke Beschädigungen auf, sodass das Wachstum beeinträchtigt wurde, aber nicht direkt das Absterben der Pflanze bedeutete, Abb. 5.10.b.

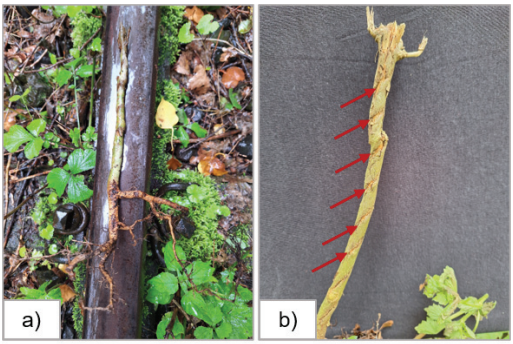


Abb. 5.10: *Effekt des maschinellen Jätens auf verholzend bis verholzte Pflanzen a) Verletzung der Rinde b) Vollständig entwurzelter Baum [Arc26]*

Wenn lediglich die Wuchshöhe bzw. die oberen Pflanzenteile bekämpft werden, bleibt die Pflanze in der Lage, erneut zu wachsen. Daher wird die Entwicklung des Unkrauts mit Stufen „geringe Wirksamkeit“ und „reduziertes Wachstum“ bewertet. Im Vergleich zu unbehandelten Pflanzen ist ein Wachstumsrückstand zu erkennen.

Aus der Tabelle 5.2 wurden die Versuche mit identischen Arbeitsparametern (ohne Berücksichtigung des Gleiszustands) beider Pflanzengruppen verglichen. Die Wirkung des Systems in Bezug auf die Vegetationsdichte war für beide Pflanzengruppen ähnlich. Diese beträgt im Durchschnitt bei den krautigen Pflanzen ca. 14 % und bei den zunehmend verholzten Pflanzen ca. 11 %. Im Gegensatz dazu wurde die Wuchshöhe bei den zunehmend verholzten Pflanzen stärker beeinträchtigt, was in einer langsameren Erholung im Vergleich zu krautigen Pflanzen begründet sein könnte. Hier liegt die Abnahme der Wuchshöhe des zunehmend verholzten Unkrauts bei 33 %, während bei den krautigen Pflanzen die Wuchshöhe im Durchschnitt um 25 % abnimmt.

Es wurde festgestellt, dass das System eine höhere Wirksamkeit auf die Wuchshöhe zunehmend verholzter Vegetation erzielt, aber eine ähnliche Wirkung auf die Vegetationsdichte beider Pflanzengruppen zeigt.

Einfluss der Fahr- und Drehgeschwindigkeit auf die Wirksamkeit

Die Versuchsergebnisse zeigen eine starke Abhängigkeit der Wirksamkeit von der Fahr- und Drehgeschwindigkeit. In den Abb. 5.11 und 5.12 sind die Abnahmen der Pflanzenhöhe bzw. der Vegetationsdichte in krautigen Bereichen nach Fahr- und Drehgeschwindigkeit gruppiert und grafisch dargestellt.

Das Verhältnis zwischen beiden Geschwindigkeiten sowie die Umdrehungen pro Schwellenfach wurden wie bei den Vorversuchen berechnet und in die Abbildungen eingetragen.

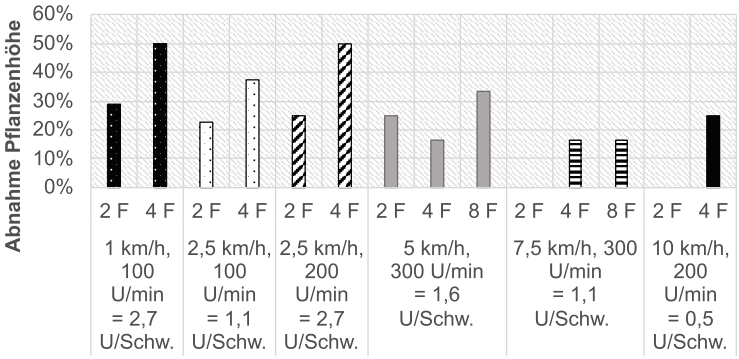


Abb. 5.11: *Abnahme der Pflanzenhöhe in krautigen Bereichen*
Begriffserläuterung: F = Anzahl der Überfahrten, U/Schw. = Umdrehungen pro Schwellenfach

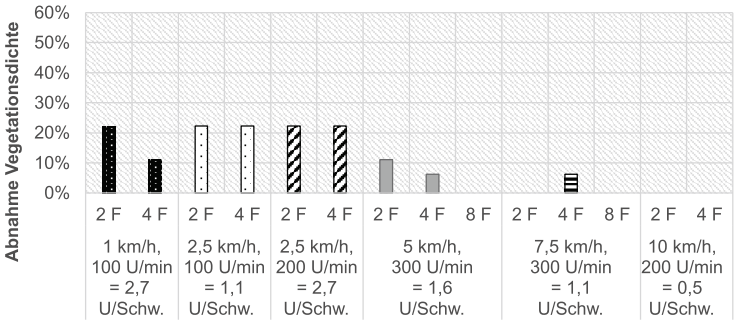


Abb. 5.12: *Abnahme der Vegetationsdichte in krautigen Bereichen*
Begriffserläuterung: F = Anzahl der Überfahrten, U/Schw. = Umdrehungen pro Schwellenfach

Es wurde beobachtet, dass das Jätsystem bei Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 5 km/h die Vegetation auf der gesamten Fläche gleichmäßig erfasst, wobei die Anzahl der Umdrehungen pro Schwellenfach 1,6 erreicht. Bei höheren Geschwindigkeiten (7,5 km/h und 10 km/h) konnte ebenfalls eine homogene Reduktion der Pflanzenhöhe über die gesamte Fläche erzielt werden, jedoch erst ab vier Überfahrten, Abb. 5.11. Bei diesen Geschwindigkeiten zeigte sich

häufig keine Wirkung auf die Vegetationsdichte, Abb. 5.12. Hier beträgt das Verhältnis zwischen Fahr- und Drehgeschwindigkeit maximal 1,1 Umdrehungen pro Schwellenfach. Die Ergebnisse in verholzenden bis verholzten Bereichen weisen ähnliche Tendenzen auf.

Höhere Drehgeschwindigkeiten führen zu einer Steigerung der Anzahl der Drehungen pro Schwellenfach, sodass auch die Fahrgeschwindigkeit erhöht werden kann. Für eine weitere Erhöhung der Drehgeschwindigkeiten muss jedoch untersucht werden, ob das Unkraut weiterhin ausgerissen oder ausschließlich gemäht wird.

Ein weiterer Aspekt sind die Stöße der Rollenpaare gegen die Pflanzensprossen bzw. die verholzten Pflanzenteile. Obwohl die Drehungen pro Schwellenfach bei den Geschwindigkeiten 2,5 km/h mit 100 U/min und 7,5 km/h mit 300 U/min einen Wert von jeweils 1,1 betragen, treten unterschiedliche Effekte bei der Behandlung auf. Allgemein wird die Vegetation von den unteren Teilen des Jätmoduls heruntergedrückt. Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten ist ein größerer Impuls zu erwarten, was zu einer langsameren Wiederaufrichtung des Unkrauts führt. Dadurch können die Pflanzen insbesondere von der hinteren Rollenreihe nicht erfasst werden. Daher tritt bei höheren Geschwindigkeiten eine homogene Erfassung der Vegetation erst nach mehreren Überfahrten auf. Außerdem wird bei niedrigeren Geschwindigkeiten ein stärkerer Effekt auf die Pflanzenhöhe beobachtet.

Wurde die Wuchshöhe insgesamt zu hoch (> 40 cm), wie beispielsweise bei Gräsern, verstärkte sich dieser Effekt. Dies weist auf den Bedarf hin, größere Abstände zwischen den Rollenreihen einzuhalten, damit die heruntergebogen Pflanzen sich wieder aufrichten können. Auf die letzte Rollenreihe könnte möglicherweise verzichtet werden, da sie wenig zur Bearbeitung beiträgt.

Einfluss der Anzahl der Überfahrten auf die Wirksamkeit

Die Wiederholung der Überfahrten steigert die Wirksamkeit des Systems. In Abb. 5.13 sind die Ergebnisse der Versuche mit identischen Arbeitsparametern im krautigen Bereich dargestellt, bei denen lediglich die Anzahl der Überfahrten erhöht wurde.

Die höchste Steigerung der Wirksamkeit kann von zwei noch vier Überfahrten beobachtet werden. Bei einer weiteren Erhöhung der Fahrten von vier auf acht wird jedoch eine Grenze erreicht, da in diesem Fall die Änderungen der Vegetationsdichte und -höhe gering bis vernachlässigbar sind. Der Unterschied in der Reduktion der Pflanzenhöhe zwischen zwei und vier Überfahrten beträgt 12 %, während der Unterschied zwischen vier und acht Überfahrten nur 3 % beträgt.

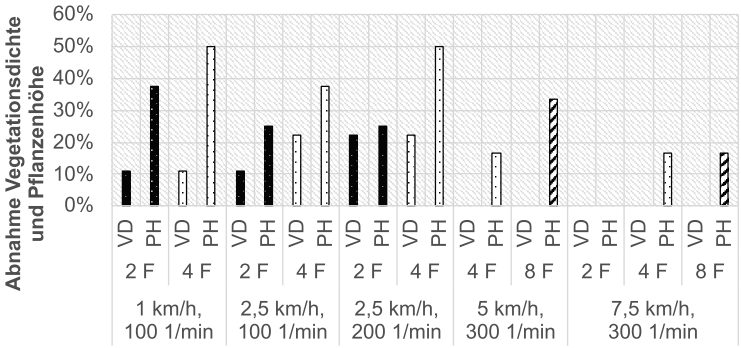


Abb. 5.13: *Abnahme der Vegetationsdichte (VD) der Pflanzenhöhe (PH) in Bezug auf die Anzahl der Überfahrten (F) im krautigen Bereich*

Bei der Abnahme der Vegetationsdichte wurde kein Unterschied zwischen zwei und vier Überfahrten festgestellt, während lediglich ein Unterschied von 3 % zwischen vier und acht Überfahrten vorliegt. Dies deutet darauf hin, dass bei vier Überfahrten die Wirksamkeit des Jätsystems im aktuellen Zustand, vor allem bei hohen Arbeitsgeschwindigkeiten, den besten Kompromiss zwischen Aufwand und Nutzen darstellt.

Auswertung der Presskraft

Im Gegensatz zu den Vorversuchen wurde mit der Einstellung der Presskraft auf 450 N (Versuche im Juni) eine höhere Wirksamkeit als bei 300 N (Versuche im Mai) erzielt, vor allem bzgl. der Abnahme der Vegetationsdichte. Beim Vergleich der Ergebnisse identischer Arbeitsparameter resultiert aus der Presskraft auf 450 N im Vergleich zu 300 N eine 17 % höhere Reduktion der Vegetationsdichte, sowie eine 8 % höhere Reduktion der Pflanzenhöhe. Darüber hinaus tritt, wie in Abb. 5.14 gezeigt, eine Reduktion der Pflanzenhöhe und der Vegetationsdichte bei allen mit 450 N durchgeführten Versuchen auf, während das System bei 300 N fast nur hinsichtlich der Pflanzenhöhe wirksam ist. Hier sind die Versuchsergebnisse mit identischen Arbeitsparametern dargestellt, bei denen nur die Presskraft geändert wurde.

Es ist jedoch zu beobachten, dass die Ergebnisse des maschinellen Jätens im Monat Juni allgemein eine bessere Wirksamkeit als im Mai aufweisen. Ein Grund könnte der hohe Niederschlag im Mai 2024 sein, der die Erholung und das Rückwachstum des Unkrauts unterstützt haben könnte. Im Kreis Aachen lag der durchschnittliche Niederschlag im Mai bei 219 l/m^2 und im Kreis Köln bei 158,8 l/m^2, während der durchschnittliche Niederschlag im Juni ca. 57 %

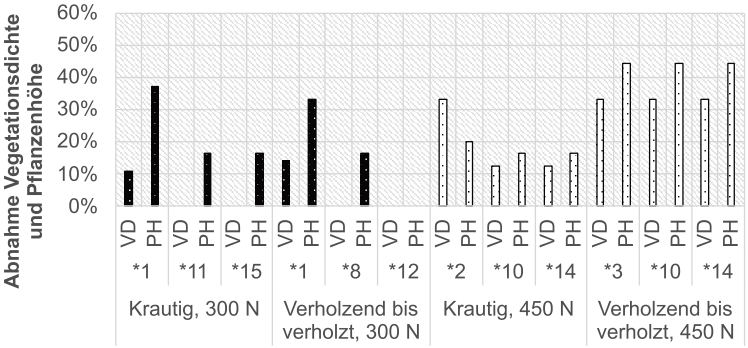


Abb. 5.14: *Abnahme der Vegetationsdichte (VD) und Pflanzenhöhe (PH) abhängig von der Presskraft 300 N und 450 N*

Begriffserläuterung: *Versuchsnummer

im Kreis Aachen und 51 % im Kreis Köln geringer war. Die durchschnittliche Temperatur stieg ebenfalls zwischen Mai und Juni, jedoch um lediglich 1,3 °C für beide Standorte. [WetoD]

Deshalb besteht Bedarf an weiteren Erprobungen der Presskraft zwischen Rollen, da die Verbesserung der Wirksamkeit nicht unbedingt ausschließlich auf die Erhöhung der Presskraft zurückzuführen ist.

Empfohlene Arbeitsparameter

Die wirksamsten Arbeitsparameter des entwickelten Systems zum maschinellen Jäten sind in Tab. 5.3 zusammengefasst. Diese variieren leicht in Abhängigkeit von der Pflanzengruppe und der Gleisumgebung.

Tab. 5.3: *Empfohlene Arbeitsparameter zur Anwendung des maschinellen Jätens*

Pflanzengruppe, Feinanteil, Vegetationsdichte	Niedrige Arbeitsgeschwindigkeit	Hohe Arbeitsgeschwindigkeit
Krautig, niedriger Feinanteil, niedrige VD	2 F, 2,5 km/h, 200 U/min	2 F, 5 km/h, 300 U/min
Krautig, hoher Feinanteil, hohe VD	2 bis 4 F, 2,5 km/h, 200 U/min	4 F, 5 km/h, 300 U/min
Gräser, beliebig, beliebig	4 F, 2,5 km/h, 200 U/min	
Verholzend bis verholzt, beliebig, beliebig	2 F, 2,5 km/h, 100 U/min	4 F, 5 km/h, 300 U/min

Begriffserläuterung: VD = Vegetationsdichte; F = Anzahl der Überfahrten

5.3.2 Ermittlung des direkten Energiebedarfs des Systems

Die erforderliche Energie für die eigentliche Unkrautbekämpfung entspricht der direkten Energie des Verfahrens zur Vegetationskontrolle [Col19]. Dies berücksichtigt keinen Transport der Einheiten bzw. keinen Kraftstoff des Fahrzeugs sondern bezieht sich in diesem Fall ausschließlich auf die Energie, um das Jätsystem anzutreiben.

Zur Ermittlung des direkten Energiebedarfs wurden im ersten Schritt punktuelle Messungen im Labor sowie während der Versuchsfahrten aufgenommen. Diese variierten hauptsächlich in Abhängigkeit von der Drehzahl der Rollen und der behandelten Vegetation. Die Erhöhung der Presskraft zeigte nur einen geringen Einfluss auf die Daten. Daher wurden die mit einer konstanten Presskraft von 300 N aufgenommenen Messungen als Basis für die Auswertung genommen. Die Leistung wurde zuerst für einen Rahmen mit acht Rollenpaaren gemessen, der 0,7 m breit ist. Weiterhin wurde der Energiebedarf entsprechend den erprobten Fahrgeschwindigkeiten über eine Arbeitsbreite von 3 m hochgerechnet, da diese Breite dem ebenen Bereich des Schotterbettes entspricht.

Tab. 5.4 zeigt den Energiebedarf E in kWh pro Kilometer. Die markierten Reihen weisen auf die wirksamsten Arbeitsparameter hin, welche in Abb. 5.15 in Bezug auf die erforderlichen Überfahrten hochgerechnet und dargestellt werden.

Für alle Varianten waren zwischen zwei und vier Überfahrten erforderlich, um ein zufriedenstellendes Ergebnis zu erzielen. Die Pflanzenhöhe und -stärke hatten den größten Einfluss auf den Energiebedarf. In Bereichen mit krautiger Vegetation war die Energie vergleichbar mit dem Leerlaufbetrieb der Rollen, während in Flächen mit zunehmend verholzenden bis verholzten Pflanzen (Stammdurchmesser bis etwa 10 mm) und hohen Gräsern (teilweise über 1 m

Tab. 5.4: *Direkter Energiebedarf des maschinellen Jätens in Bezug auf die erprobten Arbeitsparameter pro Überfahrt*

Pflanzen Gruppe	n (U/min)	P (kW) – 0,7 m –	P (kW) – 3 m –	v (km/h)	E (kWh/km)
Krautig	100	0,605	2,59	1	2,59
	100	0,605	2,59	2,5	1,04
	200	1,13	4,84	2,5	1,94
	300	1,13	4,84	5	0,97
	300	1,71	7,33	7,5	0,98
	200	1,13	4,84	10	0,48
Verholzend bis verholzt	100	2,71	11,6	1	11,6
	100	2,71	11,6	2,5	4,64
	300	6,36	27,25	5	5,45
	300	6,36	27,25	7,5	3,63
	200	4,24	18,17	10	1,82
Gräser	200	4,98	21,35	2,5	8,54
	300	7,47	32,02	5	6,4

Begriffserläuterung: n = Drehgeschwindigkeit; v = Fahrgeschwindigkeit; E = Energiebedarf; P = Leistung

hoch) die Motoren ihre maximale Leistung erbringen mussten.

Der Energiebedarf der wirksamsten Arbeitsparameter pro Anwendung – mit Berücksichtigung der genauen Drehzahl und Anzahl der Überfahrten – liegt in den krautigen Bereichen zwischen etwa 2 kWh/km und 8 kWh/km, während er bei den zunehmend verholzten Pflanzen bei etwa 10 kWh/km bis 22 kWh/km und bei hohen Gräsern bei ca. 35 kWh/km liegt. Bei mehreren Einsätzen des Systems im Jahr ist mit einer Erhöhung der Werte zu rechnen.

Die hier berichteten Daten wurden unter bestimmten Einsatzbedingungen erzeugt, insbesondere in dicht bewachsenen Bereichen, die bisher nur einer unregelmäßigen mechanischen Vegetationskontrolle unterzogen wurden. Daher ergeben sich dort tief verwurzelte Gräser, Vegetation über 500 mm hoch oder verholzte Pflanzen mit einem Durchmesser von mehr als 10 mm, die die Daten stark beeinflussen.

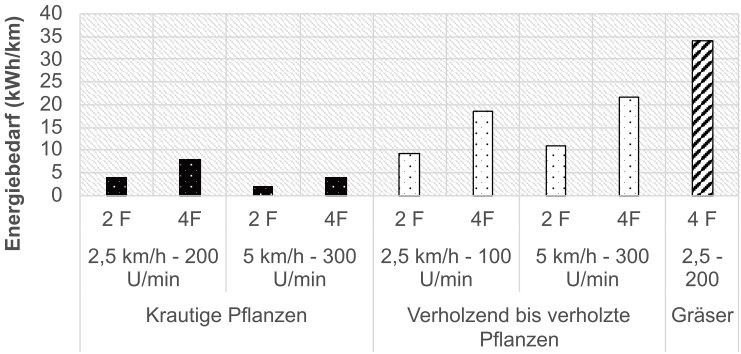


Abb. 5.15: *Darstellung des direkten Energiebedarfs der wirksamsten Arbeitsparameter pro Anwendung*

Begriffserläuterung: F: Anzahl der Überfahrten

5.3.3 Weitere bewertete Aspekte zum Einsatz des Verfahrens

Mechanisches Verhalten des Systems

Pflanze auswerfen (Teilfunktion 2.2) Das Auswerfen der Pflanzen verhielt sich anders als in den Vorversuchen. Im Prüfstand wurde das Unkraut gezupft und in den meisten Fällen durch die Rotation der Rollen aus dem Mechanismus entfernt. Bei dem großen Aufbau des Jätsystems trat jedoch häufig auf, dass sich lange Gräser oder hochgewachsene Pflanzen um den Mechanismus wickelten und Verstopfungen verursachten. Dies könnte an der Abstützung der Rollenachsen und -wellen liegen, die im Prüfstand nur einseitig gelagert sind, während sie in der neuen Konstruktion von beiden Seiten gestützt werden und somit das Auswerfen des Unkrauts behindert wird.

Zusätzlich war die Menge an Pflanzenmaterial aufgrund der längeren Behandlung bei den Streckenversuchen mit dem Großapparat deutlich höher als in den Vorversuchen. Darüber hinaus spielte die Stärke der Pflanzen ebenfalls eine entscheidende Rolle. Während im April selten Verstopfungen des Mechanismus auftraten, wurden diese im Mai und Juni häufiger beobachtet.

Es zeigt sich, dass die Rollen zur Bearbeitung hoher Wuchshöhen durch Lösungen zur Befreiung des Mechanismus unterstützt werden sollten. Scharfe Klingen, Bürsten oder andere Schneidelemente sind erste Vorschläge für diese Aufgabe. Größere Rollendurchmesser, wie sie in der Landwirtschaft verwendet werden, bieten ebenfalls eine Lösung, da sie eine längere Kontaktfläche aufweisen und somit die Wahrscheinlichkeit verringern, dass sich Pflanzen um den Mechanismus wickeln. Diese Lösung könnte jedoch die Höhe des Greifpunkts

beeinträchtigen und sollte daher in diesem Zusammenhang evaluiert werden.

Anwendung auf Schotterflanken, Weichen und Kreuzungen Der aktuelle Aufbau des Jätsystems wurde für die ebenen Bereiche des Schotterbettes konzipiert. Aufgrund der starren Anordnung der Rollen sind bei der Arbeit auf anderen Geometrien Anpassungen erforderlich. Bei der Anwendung auf Schotterflanken sollte die Position der Rollen auf geneigte Oberflächen angepasst werden, während bei Weichen und Kreuzungen eine Lösung zur Durchführung des Jätens in den Zwischenräumen konzipiert werden sollte.

Mechanischer Abrieb der Rollen Der Außendurchmesser der Rollen wurde nach den Versuchen auf hundertstel Millimeter geprüft. Dabei wurden drei Messungen entlang jeder Rolle durchgeführt und mit den Maßen neuer Rollen verglichen. Der Rollendurchmesser betrug sowohl für neue als auch für gebrauchte Rollen 114,61 mm, mit einer Standardabweichung von 0,08 mm. Somit wurde kein Unterschied im Vergleich zu neuen Rollen festgestellt und kein Verschleiß gemessen. Ein verschleißbedingter Austausch wird daher eher unregelmäßig nach längeren Einsatzzeiträumen erwartet.

Einfluss auf Infrastruktur

Durch das maschinelle Jäten sind lediglich mechanische Störungen an Infrastrukturkomponenten zu erwarten. Obwohl das System auch in Bezug auf weitere Bahnsicherheitsaspekte wie elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) geprüft werden muss, stellen die mechanischen Stöße und Bewegungen des Schotters die Hauptgefahren für die Infrastruktur dar. Verschiebungen des Gleisschotters waren nur in den oberen Schichten (maximal 100 mm tief) zu beobachten und resultierten ausschließlich aus dem Entwurzeln von dicken Gräsern und verholzten Pflanzen (ca. 10 mm Stammdurchmesser).

Im Fall des Schotterflugs wurde dieser durch den Mechanismus abgeschirmt, sodass der Schotter maximal gegen die Rollen geschlagen ist. Der Einfluss des Pflanzensystems auf die Destabilisierung des Schotterbettes durch das Zupfen der Pflanzen erfordert längere Erprobungsphasen, sollte jedoch ebenfalls in Betracht gezogen werden.

Außerdem muss der Mechanismus einen Sicherheitsabstand zur Schotteroberfläche und zu anderen Bauelementen einhalten. Die im und am Gleis vorhandenen Installationen der Signal- und Sicherungstechnik sollen beim Einsatz identifiziert und ihnen ausgewichen werden. Dies dient dem Schutz der Jätmodule und der elektronischen Komponenten vor Kollisionen.

Arbeitsschutz - Messung der Lärmemissionen des Versuchsträgers

Zusätzlich zum Schutz der Mitarbeitenden vor mechanischen Gefahren wie Quetschungen durch die Rollen oder Schotterflug gehört im Bereich Arbeitsschutz auch die Messung von Lärmemissionen. Um erste Aussagen zur Lärmemission des Jätsystems sowie des Gesamtversuchsträgers treffen zu können, wurden Messungen am Gleis in verschiedenen Betriebszuständen durchgeführt.

Das Messgerät (Sauter Schallpegelmessgerät SW-1000) war 5 m seitlich der Gleismittelachse in einer Höhe von 1,5 m über der Gleisoberkante positioniert, an einem Ort, an dem sich Mitarbeitende während des Einsatzes des Versuchsträgers aufhalten könnten, Abb. 5.16. Diese Anordnung entspricht §3 Abs.1 S.3 der LärmVibrationsArbSchV, wonach die Lärmexposition am tatsächlichen Arbeitsplatz gemessen werden muss. Im Vergleich zum vorgegebenen Abstand für die Messung des Vorbeifahrgeräusches gemäß Abschnitt 4.2.3 der Verordnung (EU) 1304/2014 liegt der hier ausgewählte Abstand um 2,5 m näher an der Lärmquelle.

Bei den Vorbeifahrten des Versuchsträgers wurde die Schallausbreitung quer zur Fahrtrichtung gemessen. Die Messungen zur Ermittlung der dB(A)-Werte erfolgten mit einer Mittelung über 2 Sekunden, wobei jeweils der höchste Wert für die Auswertung herangezogen wurde. Die Fahrgeschwindigkeit lag zwischen 2 km/h und 5 km/h.



Abb. 5.16: *Messungen der dB(A)-Werte der Lärmexposition des Versuchsträgers [Arc26]*

Zu den relevanten Geräuschquellen des Systems gehören das Zugfahrzeug, die Stromgeneratoren und die Jätmodulen (die Elektromotoren mit den Rollen des mechanischen Jätens). Diese Geräuschquellen überschreiten einzeln 75 dB(A)

und erreichen gemeinsam einen Wert von ca. 88 dB(A). Die angetriebenen Rollen des maschinellen Jätens erzielen jeweils einen Geräuschpegel von 80 dB(A).

Die Auslösewerte für den Tages-Lärmexpositionspegel werden gemäß §6 der LärmVibrationsArbSchV als obere und untere Grenzwerte definiert und betragen 85 dB(A) beziehungsweise 80 dB(A), bezogen auf eine 8-Stunden-Schicht. Bei Erreichung oder Überschreitung dieser Werte müssen Maßnahmen zur Vermeidung und Verringerung der Lärmexposition ergriffen werden.

In beiden Fällen könnten die Lärmquellen des Versuchsträgers während einer 8-Stunden-Arbeitsschicht die Auslösewerte erreichen oder überschreiten, da bei der aktuellen Konstruktion die Systeme zur Vegetationskontrolle nur auf der Hälfte der Bahnbreite eingesetzt sind. Daher ist bei größeren Bauweisen mit mehr Einheiten mit einer Steigerung der Lärmexposition zu rechnen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Konstruktion des maschinellen Jätens als Serienprodukt Maßnahmen zur Lärmreduzierung und -dämmung berücksichtigen muss, auch wenn im Normalbetrieb keine Personen vorgesehen sind, die neben dem Fahrzeug laufen. Eine technische Lärmminderung ist insbesondere durch Einhausungen möglich, sodass kein relevantes Lärmproblem absehbar ist.

6 Ermittlung der langfristigen Wirksamkeit des entwickelten Verfahrens

Zusätzlich zur Erprobung und Messung der Effizienz des entwickelten Jätsystems auf Gleisanlagen wurde die Wirksamkeit in experimentellen Versuchen über einen langfristigen Zeitraum untersucht. Dabei wurden unterschiedliche Pflanzenarten auf dem Schotterbett über einen Zeitraum von etwa zwei bis drei Jahren mechanisch behandelt und ihr Wachstum dokumentiert. Im Folgenden werden die Zielsetzung, das Vorgehen und die Ergebnisse der Untersuchung vorgestellt.

6.1 Zielsetzung und Vorgehen der Untersuchung

Die Fragestellung zur Durchführung der Untersuchung umfasst:

- den Vergleich zwischen behandelten und unbehandelten Bereichen,
- die Häufigkeit des Einsatzes des Jätsystems pro Jahr,
- den Vergleich des maschinellen Jätens mit dem Verfahren Mähen, welches ähnliche Wirkprinzipien wie das Jäten hat,
- den Effekt des liegengebliebenen Pflanzenmaterials auf die Anwendungsfrequenz des Jätsystems
- sowie den Effekt auf unterschiedliche Pflanzenarten im Gleisbereich.

Zusätzlich zu den vorgestellten Fragen muss die gewünschte Wirksamkeit des Systems definiert werden. In Kapitel 2 wurden die negativen Effekte des Unkrauts auf den Gleisbereich erläutert. Allerdings steht für die Eisenbahnwelt nichtquantifiziert fest, ab wann das Unkraut schädlich für die Infrastruktur ist und wie bewachsen das Gleis sein darf. Jedoch ist bekannt, ab welcher Höhe die Pflanzen einen störenden Effekt bei Berührung mit den Fahrzeugen verursachen. Daher besteht der Zweck dieser experimentellen Untersuchung darin, die Pflanzenhöhe zum Schutz der Fahrzeuge einzugrenzen, wobei der Abstand vom Schotter zur Fahrzeugbegrenzungslinie als Referenz dient (ca. 300 mm hoch s. Abb. 2.6 im Kapitel 2). Durch Einhaltung der Pflanzenhöhe innerhalb dieses Raums soll der Kontakt zwischen Pflanzen und Fahrzeugen vermieden oder minimiert werden.

Für die Untersuchung wurden Flächen mit einem homogenen Vegetationsbewuchs im Schotterbett ausgewählt, auf denen die Pflanzen über einen Zeitraum von zwei bis drei Jahren behandelt und beobachtet wurden. Wie in Abb. 6.1 gezeigt wird, teilten sich die Arbeitsbereiche in den Bereich innerhalb der Schienen (A.1), den Bereich außerhalb der Schienen (A.2) und den Bereich auf den Schotterflanken (B) auf. Die Behandlungen wurden in den ausgewählten Flächen manuell durchgeführt und stellten den Einsatz des Jätsystems sowie des Verfahrens Mähen dar. Das heißt, das Unkraut wurde beim maschinellen Jäten von Hand ausgerissen, während es beim Mähen mit einer Schere abgeschnitten wurde. Da auch der Einfluss des nach der Behandlung liegengebliebenen Unkrauts auf die Wirksamkeit der Verfahren untersucht wurde, wurde in zusätzlichen Flächen die Vegetation ebenfalls abgeschnitten und liegen gelassen. Neben den behandelten Bereichen wurden in der Untersuchung Kontrollflächen einbezogen, in denen die Vegetation nicht behandelt, sondern nur beobachtet wurde. So konnte der Effekt der Behandlung von externen Faktoren wie der Witterung (z.B. Trockenheit oder starker Regen) unterschieden werden, die ebenfalls das Pflanzenwachstum beeinflussen.

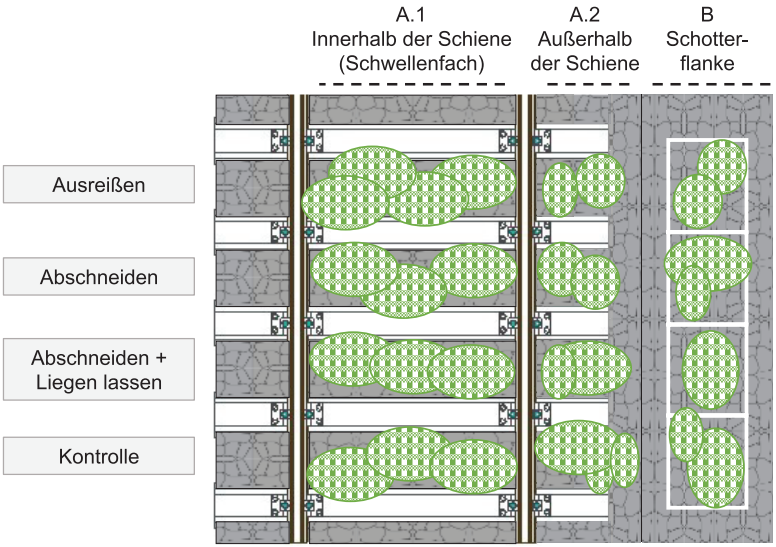


Abb. 6.1: *Aufteilung der Schotterbereiche zur Untersuchung der Wirkprinzipien des maschinellen Jätens und Mähens*

Bei der Beobachtung der Vegetation wurde die Pflanzenhöhe monatlich mit einem Zollstock (in cm) sowohl in den behandelten sowie in unbehandelten Flä-

chen gemessen. Die Messungen wurden in Abhängigkeit der Homogenität der Pflanzenhöhe in einer bis drei Stellen jeder Fläche durchgeführt und gemittelt. Wenn die Wuchshöhe ca. 30 cm erreichte, wurden die Behandlungen durchgeführt. Die Anzahl der Behandlungen pro Jahr wurde dabei dokumentiert.

Bei der Behandlung der Vegetation wurde die übliche Arbeitshöhe der Verfahren zur Vegetationskontrolle berücksichtigt, die etwa 15 cm über der Schotteroberfläche beträgt, um Kollisionen mit dem Schotter und Schotterflug zu vermeiden. Somit wurde das Unkraut in einer Höhe von 15 cm über dem Schotter ausgerissen oder abgeschnitten. Ebenfalls wurde die Arbeitsweise der Apparate beachtet. Das betrifft vor allem das maschinelle Jäten, bei dem mit dem entwickelten Jätsystem das Unkraut einmalig erfasst und entweder mitsamt der Wurzeln aus dem Boden gezogen wird, oder nur die oberen Pflanzenteile abgetrennt werden.

Um die Messung des Effekts der Verfahren zu erweitern, wurde nach dem Ausreißen oder Abschneiden der Pflanzen das Unkraut in Tüten gesammelt. Sowohl das Frischgewicht als auch das Trockengewicht wurden bestimmt, wobei das Frischgewicht dem Gewicht direkt nach der Entnahme des Pflanzenmaterials entspricht und während der Vegetationsperiode, der Jahreszeiten und sogar bei Wetterunterschieden an einem Tag variieren kann. Im Gegensatz dazu gibt das Trockengewicht eine aussagekräftigere Angabe der tatsächlichen Biomasse des behandelten Unkrauts und spiegelt in diesem Fall die Vegetationsdichte wider [Har24]. Zur Bestimmung des Trockengewichts wurde das Pflanzenmaterial bei Umgebungstemperatur vollständig getrocknet.

Beim Abschneiden mit Liegen Lassen wurde weder Unkraut getrocknet noch neu gewogen, sondern das Pflanzenmaterial wurde ausschließlich vor Ort gewogen und auf der Fläche wieder verteilt. Das Gewicht wurde mit einer einfachen elektronischen Waage ohne Dezimalstellen ermittelt, da diese kompakt und transportierbar ist. Proben mit einem Gewicht von weniger als 1 g wurden im Labor mit einer Milligrammwaage gewogen. Im Fall des Abschneidens mit Liegen lassen wurde die Messung mit dem Wert von 1 g eingetragen.

Die Änderung der Gewichtsentnahme des Pflanzenmaterials zusammen mit der Änderung der Pflanzenhöhe über die Dauer der Versuchszeit spiegelt den Effekt der Verfahren auf die untersuchten Pflanzen wider.

6.1.1 Beschreibung der Versuchsstrecken

Die Untersuchung wurde an drei Standorten durchgeführt: Puffendorf und Linnich – Strecken der Rurtalbahn GmbH, wie in den Vorversuchen auf Gleisanlagen (Abschnitt 4.3.4) – sowie Birgden, einem Streckenabschnitt des Kleinbahnmuseums Selfkantbahn der Touristenbahnen im Rheinland GmbH. Für

eine bessere Orientierung sind diese Standorte in Abb. 3.1 in Kapitel 3 markiert. Einheitlich zu den in Abschnitt 5.2.2 gegebenen Eigenschaften der Versuchsstrecken werden im Folgenden die verwendeten Streckenabschnitte beschrieben. Abb. 6.2 zeigt einige Eindrücke der Teststrecken.

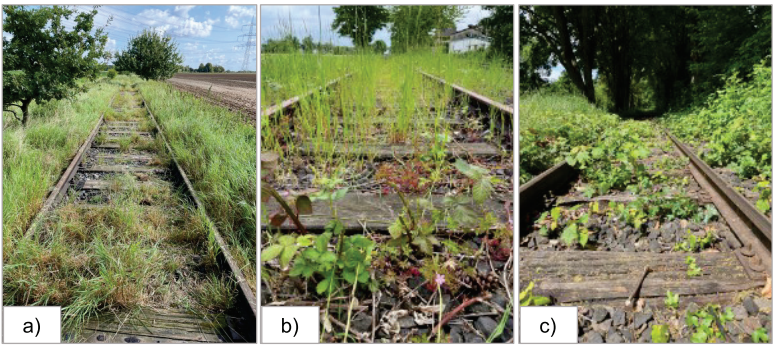


Abb. 6.2: *Versuchsstrecken zur Untersuchung der langfristigen Wirksamkeit des maschinellen Jätens: a) Puffendorf b) Linnich c) Birgden*

Versuchsstrecke Puffendorf

Die Abschnittsstrecke in Puffendorf ist ein stillgelegtes Gleis, das 1912 in Betrieb genommen und dessen letzte Instandhaltung im Jahr 1999 durchgeführt wurde, Abb. 6.2.a. Hier findet keine Vegetationskontrolle statt. Das Gleis ist größtenteils sonnenexponiert und von Feldern umgeben. Einige Bäume haben sich im Gleis etabliert, sodass bestimmte Flächen für manche Stunden schattig sind. Die untersuchten Bereiche liegen jedoch ausschließlich in der Sonne. Interessanterweise variiert der Anteil des organischen Feinmaterials im Schotter auf der gesamten Strecke von niedrig bis hoch. An manchen Stellen ist der Schotter sauber, während er an anderen Stellen kaum sichtbar ist, wie das Gleis im Allgemeinen. Durch die hohe Vegetationsdichte ist der Feinanteil in den ausgewählten Flächen ebenfalls hoch.

Versuchsstrecke Linnich

Es handelt sich um ein Abstellgleis am Bahnhof Linnich, das an die Strecke Linnich-Düren anschließt. Abhängig von der Pflanzenhöhe wird im Streckenabschnitt alle paar Monate ein mechanischer Rückschnitt der Vegetation durchgeführt. Die Bereiche sind teilweise sonnenexponiert, da an bestimmten Stellen Bäume am Gleis stehen, die für einige Stunden am Tag Schatten auf das Gleis

werfen. In der oberen Schotterschicht ist ein mittlerer Anteil an organischem Material zu beobachten. Das Gleis wurde 1911 in Betrieb genommen. Das Datum der letzten Instandhaltung ist nicht bekannt. Die Abb. 6.2.b zeigt eine Ansicht der Teststrecke.

Versuchsstrecke Birgden

Es handelt sich um ein Meterspurgleis zwischen Gillrath und Schierwaldenrath (Kreis Heinsberg) mit einer Gesamtlänge von 5,5 km, auf dem 2 bis 3 Mal pro Woche touristische Fahrten durchgeführt werden. Entlang des beobachteten Gleisabschnitts in Standort Birgden stehen große Bäume, sodass der Großteil der Versuchsfläche ganztägig beschattet ist, Abb. 6.2.c. Die Vegetation wird hauptsächlich mechanisch behandelt. Der Anteil an Feinmaterial in den untersuchten Bereichen variiert von mittel bis hoch. Die Inbetriebnahme der Strecke erfolgte im Jahr 1900, und die letzte Instandhaltung fand in den Achtzigerjahren statt.

6.1.2 Behandelte Pflanzenarten und ihr Standort

Voraussetzung für die Untersuchung einer Pflanzenart ist, dass die Pflanze auf mindestens zwei Schwellenfächern oder Schotterbereichen mit ähnlicher Vegetationsdichte und Wuchshöhe vorkommt. So kann mindestens eine Behandlungsart mit einer Kontrollfläche verglichen werden. Ebenfalls sollen die Arbeitsbereiche ähnliche Schotterbedingungen und Beschattungen aufweisen. Darüber hinaus kann das Pflanzenwachstum von externer Vegetation und organischem Material stärker beeinflusst werden, je näher sich die Flächen am Randweg befinden. Dazu fungiert die Schiene als Barriere zum Schutz des Bereichs A.1 vor eingrenzenden Pflanzen.

Daher werden die Schotterbettbereiche getrennt betrachtet und die zu vergleichenden Pflanzenarten für die Untersuchung entweder in Bereich A.1 oder A.2 oder B ausgewählt, Abb. 6.1. Tabelle 6.1 fasst die für die Untersuchung einbezogenen Arten, ihre Eigenschaften und Standorte zusammen.

Insgesamt wurden für die drei Behandlungsarten zusammen mit der Kontrollfläche 106 Flächen beobachtet und gegebenenfalls behandelt: in Puffendorf 35, in Linnich 20, und in Birgden 51. Die genaue Auswahl der Pflanzenarten, ihre Aufteilung im Schotterbett sowie die durchgeführten Behandlungen befindet sich im Anhang B.1.

Tab. 6.1: *Behandelte Pflanzen und ihr Wachstumsort*

Deutscher Name	Pflanzenmerkmale			Standort		
	Wissenschaftlicher Name	Wuchsform	Lebensform	Puffendorf	Linnich	Birgden
Aufrechte Trespe	*Bromus erectus*	Krautig (Gras)	Ausdauernd	x	x	
Acker-Schachtelhalm	*Equisetum arvense*	Krautig	Ausdauernd	x	x	
Ruprechtskraut	*Geranium robertianum*	Krautig	ein- oder zweijährig		x	
Brombeeren	*Rubus fruticosus agg.*	Verholzend	Holzgewächs		x	x
Birken	*Betula*	Verholzt	Holzgewächs		x	
Berg-Ahorn	*Acer pseudoplatanus*	Verholzt	Holzgewächs			x
Gemeine Hainbuche	*Carpinus betulus*	Verholzt	Holzgewächs			x

6.2 Ergebnisse der Untersuchung

6.2.1 Auswertung der angewendeten Verfahren

Die Untersuchung wurde über zweieinhalb Jahre (von Juli 2022 bis Dezember 2024) auf den Versuchsstrecken Puffendorf und Linnich sowie über anderthalb Jahre (von Juni 2023 bis Dezember 2024) auf der Versuchsstrecke Birgden durchgeführt. Da die Pflanzenarten und die Standortbedingungen der Versuchsstrecken variieren, entwickelt sich das Vegetationswachstum unterschiedlich. Darüber hinaus wurden in den Teststrecken Linnich und Birgden vom Eisenbahnbetreibern erforderliche Rückschnitte der Pflanzen unternommen, da die Vegetation das Abstellen und Fahren von Fahrzeugen beeinträchtigte. Diese Rückschnitte hatten hauptsächlich Wirkung auf die Kontrollfläche und werden, wo nötig, erläutert. Daher werden die Daten für die drei Teststrecken getrennt analysiert.

Als Eingangsgröße gelten für die Untersuchung die monatlich gemessene Pflanzenhöhe und das nach erfolgter Behandlung entnommene Pflanzenmaterial mit dessen Frisch- und Trockengewicht. In Abb. 6.3 bilden die Balken den Durchschnitt der initialen Pflanzenhöhe sowie der ersten Entnahme des Frisch- und Trockengewicht für die drei Standorte graphisch ab. Die entspre-

chenden Standardabweichungen sind ebenfalls im Diagramm dargestellt. Bei der Pflanzenhöhe sind die Kontrollflächen einbezogen.

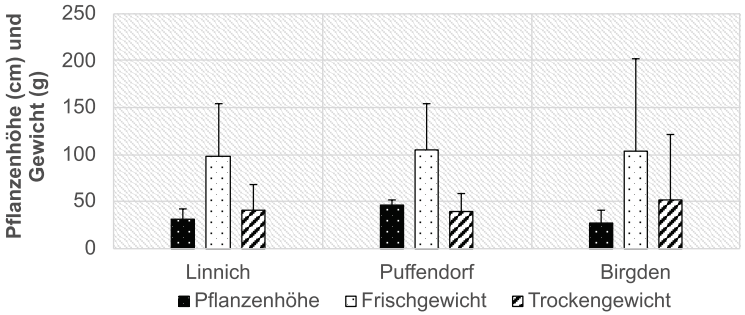


Abb. 6.3: *Initiale Pflanzenhöhe und erstes Gewicht der drei Standorte (Juli 2022 - Linnich und Puffendorf, Juni 2023 - Birgden)*

Die Pflanzen wiesen auf den drei Versuchsstrecken Höhen zwischen ca. 30 und 50 cm auf, während das durchschnittliche Frisch- und Trockengewicht etwa 100 g bzw. etwa 45 g pro Fläche nach der ersten Behandlung betrug.

Der jährliche Verlauf der Wuchshöhe und des Pflanzengewichts wird für die drei Teststrecken über die ganze Untersuchungszeit dargestellt. In Abb. 6.4 ist beispielsweise der durchschnittliche Verlauf der Pflanzenhöhe in Puffendorf abgebildet.

Da die Daten von Fläche zur Fläche variieren können, sind die Werte auf den initialen Monat normiert. Die vertikalen blauen Linien in Abb. 6.4 stellen die durchgeführten Behandlungen dar. Diese werden markiert, wenn mindestens ein Viertel der zu behandelnden Flächen im Monat bearbeitet wurde. Denn das Unkraut weist unterschiedliche Wachstumsentwicklungen auf und hat somit einen unterschiedlichen Bedarf an Behandlungen. Die Diagramme der drei Strecken sowohl in der ursprünglichen Einheit als auch normiert, befinden sich im Anhang B.2.

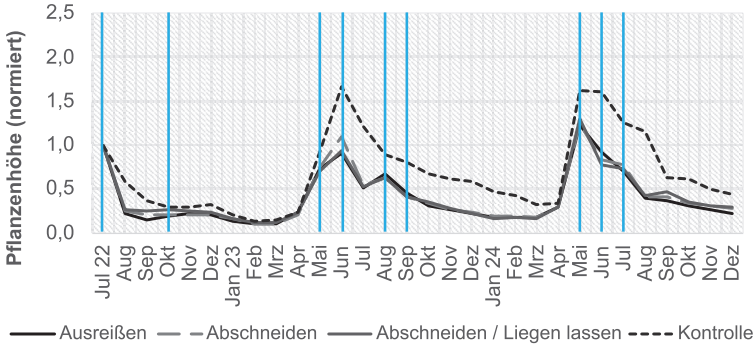


Abb. 6.4: *Änderung der Pflanzenhöhe in der Versuchsstrecke Puffendorf (normiert)*

Beim Vergleich der angewendeten Verfahren werden geringe Unterschiede in der Wuchshöhe und dem Gewicht des entnommenen Pflanzenmaterials beobachtet. Wie in Abb. 6.4 deutlich wird, zeigen die Verfahren ähnliche Tendenzen. Dagegen ist die Abweichung zwischen den Verfahren und der Kontrollfläche eindeutig sichtbar. Darüber hinaus lassen sich anhand des Verlaufs der Pflanzenhöhe die Vegetationsperiode sowie die Reduktion des Vegetationswachstums im Winter beobachten.

Tab. 6.2 enthält die Ergebnisse der berechneten Abweichung zwischen den Verfahren. Dabei wird der Durchschnitt der Wuchshöhe und des Pflanzengewichts über den ganzen Zeitraum für jede Behandlungsart kalkuliert und voneinander abgezogen.

In vielen Fällen zeigt das Ausreißen eine leichte stärkere Reduktion der Pflanzenhöhe und des Trockengewichts als die anderen Verfahren und somit indirekt auch eine Reduktion der Vegetationsdichte. Es sei daran erinnert, dass beim Ausreißen das Unkraut mit der Hand nur einmal gegriffen und gezupft wurde, ohne das vollständige Entwurzeln sicherzustellen.

Die maximale Abweichung zwischen den Verfahren beträgt ca. 20 % und wird bei der Pflanzenhöhe sowie beim Frischgewicht beobachtet, Tab. 6.2, Werte in blau. Diese wird im Fall der Pflanzenhöhe beim Abschneiden gegenüber der anderen beiden Verfahren in Birgden erreicht, wo das Abschneiden die maximale Reduktion der Wuchshöhe zeigt. Kontradiktorisch dazu erreicht das Abschneiden die maximale Zunahme des Frischgewichts gegenüber des Abschneidens mit Liegen lassen in Puffendorf, sodass keine Aussage bzgl. einer besseren oder schlechteren Wirksamkeit beim Abschneiden getroffen werden kann.

Tab. 6.2: *Abweichung der Wuchshöhe und des Pflanzengewichts der Verfahren und Kontrollfläche*

Abweichung		Standort		
Eigenschaft	Vergleich der Verfahren	L	P	B
Pflanzenhöhe	Ausreißen - Abschneiden =	-6 %	-1 %	**20 %**
	Ausreißen - Liegen lassen =	-7 %	-2 %	-1 %
	Abschneiden - Liegen lassen =	-1 %	0 %	**-21 %**
	Kontrolle - Verfahren =	**52 %**	**27 %**	**21 %**
Frischgewicht	Ausreißen - Abschneiden =	4 %	-6 %	0 %
	Ausreißen - Liegen lassen =	3 %	15 %	-1 %
	Abschneiden - Liegen lassen =	-1 %	**20 %**	-1 %
Trockengewicht	Ausreißen - Abschneiden =	-1 %	-4 %	0 %

Begriffserläuterung: L = Linnich; P = Puffendorf; B = Birgden

Das nach dem Abschneiden liegengebliebene Unkraut zeigt keine unterschiedlichen Wirkungen auf das Wachstum im Vergleich zu den anderen Behandlungsarten, jedoch enthielt das Schotterbett bei einigen der mit den anderen Verfahren behandelten Flächen ebenfalls hohes Feinmaterial.

Allgemein weist keines der Verfahren eine bessere oder schlechtere Wirksamkeit als die anderen auf, da in den Daten kein Trend erkennbar ist. Im Durchschnitt betragen die Abweichungen zwischen den Verfahren in den drei Versuchsstrecken 7 % bei der Wuchshöhe, 6 % beim Frischgewicht und 2 % beim Trockengewicht.

Im Gegensatz dazu zeigt die Abweichung zwischen den Verfahren und der Kontrollfläche hohe Werte. Hier wird die durchschnittliche Pflanzenhöhe der drei Verfahren mit der der Kontrollflächen verglichen. Die behandelten Bereiche weisen im Vergleich zu den unbehandelten Pflanzen eine niedrigere Pflanzenhöhe von 52 % in Linnich, 27 % in Puffendorf und 21 % in Birgden auf. Zu beobachten ist, dass die Pflanzenart eine wichtige Rolle spielt. Beispielsweise wurden in Linnich Birken in der Untersuchung betrachtet, bei denen die unbehandelten Pflanzen über sieben mal höher als die behandelten Pflanzen gewachsen sind. Im Unterschied dazu wurden in Puffendorf die Aufrechte Trespe (Gras) und Ackerschachtelhalm untersucht, die sowohl in der behandelten als auch in der Kontrollfläche in den Wachstumsmonaten eine ähnliche Wuchshöhe erreichten. Insgesamt wird von den drei Standorten eine Reduktion der durchschnittlichen Pflanzenhöhe von 34 % bei den behandelten Pflanzen im Vergleich zu den Kontrollflächen erreicht.

Häufigkeit in der Anwendung der Verfahren

Die Anzahl der Behandlungen pro Jahr weist keine Abhängigkeit von den angewendeten Verfahren sondern nur von der Pflanzenart auf und wird im Abschnitt 6.2.2 genauer diskutiert. Tabelle 6.3 zeigt den Überblick der gesamten Anwendungsfrequenz in jeder Teststrecke und die durchschnittliche Abweichung der Wuchshöhe und des entnommenen Pflanzengewichts.

Tab. 6.3: *Gesamtauswertung der jährlichen Wachstumsentwicklung in den Versuchsstrecken*

Standort	Behandlungen pro Jahr			PH (%) 2024 - 2022* =		GE (%) 2024 - 2022* =	
	2022	2023	2024	Behandelt	Kontrolle	Frisch	Trocken
Puffendorf	2	4	3	23 %	49 %	22 %	12 %
Linnich	2	2	3	15 %	74 %	-8 %	-13 %
Birgden	-	2	3	13 %	23 %	-9 %	-13 %
Gesamt	2 bis 3			17 %	48 %	2 %	-5 %

Begriffserläuterung: PH = Pflanzenhöhe; GE = Gewichtsentnahme
*Bei der Teststrecke Birgden entspricht die Abweichung dem Jahr 2023 statt 2022

Auf allen Versuchsstrecken waren im ersten Jahr lediglich zwei Behandlungen erforderlich, während in den folgenden Jahren mindestens zwei Anwendungen der Verfahren notwendig waren. Dabei stellt sich die Frage, ob es daran liegt, dass die Untersuchung erst im Juni oder Juli und nicht im Frühjahr wie in den folgenden Jahren begann. Auf der anderen Seite wird eine Zunahme der durchschnittlichen Pflanzenhöhe über dem Gesamtzeitraum in den Kontrollflächen bemerkt. In Puffendorf erhört sich die Pflanzenhöhe um fast 50 % von 2022 auf 2024. In den behandelten Flächen umfasst diese Abweichung 23 %. Insgesamt wurden in Puffendorf zwei bis vier Behandlungen pro Jahr durchgeführt.

In Linnich und Birgden waren zwei bis drei Behandlungen pro Jahr erforderlich. Die Zunahme der Pflanzenhöhe in der Kontrollfläche beträgt in Linnich 74 % und in Birgden ca. 23 %, obwohl Teile der Kontrollflächen in beiden Standorten ein- bis zweimal im Jahr vom Eisenbahnbetreiber aufgrund hoher Wuchshöhen zurückgeschnitten wurden, da hier Fahrzeuge abgestellt oder gefahren werden. Die Erhöhung der Pflanzenhöhe in den behandelten Bereichen beträgt in Linnich sowie in Birgden ca. 15 %.

Ebenfalls wird eine Erhöhung der Gewichtsentnahme von 2022 bis 2024 in Puffendorf beobachtet, Abb. 6.5 und 6.6. Das Frischgewicht steigt um bis zu 40 % beim Verfahren des Abschneidens, um 22 % beim Ausreißen und um

5 % beim Abschneiden mit Liegen lassen. Interessant ist, dass die Zunahme des Trockengewichts geringer ausfällt, als das Frischgewicht, Abb. 6.6. Dabei beträgt die Steigerung für das Trockengewicht beim Abschneiden nur 16 % und beim Ausreißen 8 %, was auf einen hohen Wasserinhalt der Pflanzen und eine geringe Zunahme der Vegetationsdichte hinweist. Im Durchschnitt liegt die Zunahme des Trockengewicht von 2022 auf 2024 in Puffendorf bei ca. 12 %.

Im Gegensatz dazu nimmt das Trockengewicht in Linnich und Birgden trotz Erhöhung der Wuchshöhe ab. Hier beträgt die Reduktion 16 % in Linnich und 13 % in Birgden im Vergleich zur initialen Gewichtsentnahme.

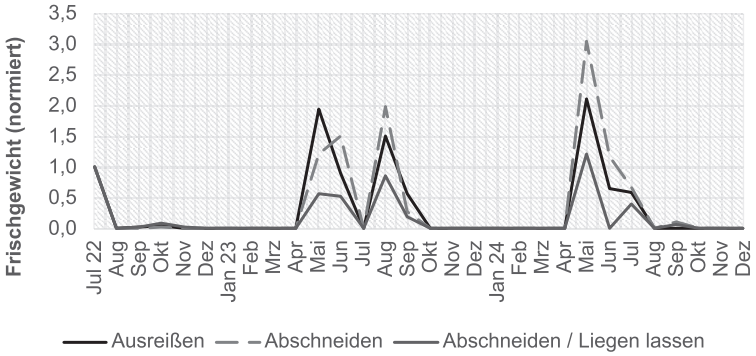


Abb. 6.5: *Frischgewicht der Versuchsstrecke Puffendorf (normiert)*

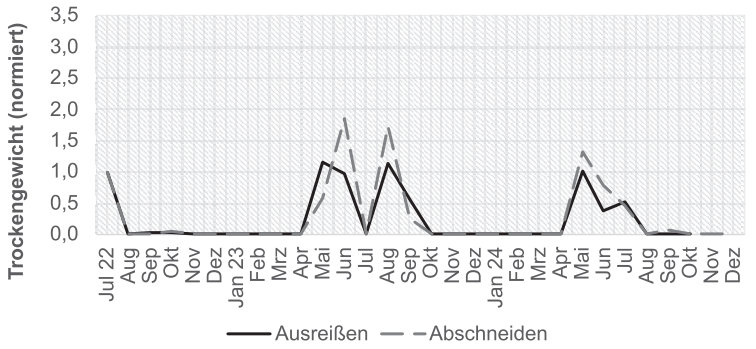


Abb. 6.6: *Trockengewicht der Versuchsstrecke Puffendorf (normiert)*

Zusammenfassend reduziert die Anwendung der Verfahren die Pflanzenhöhe im Vergleich zur Kontrollfläche. Eine Gesamtreduktion des Trockengewichts

wird ebenfalls erzielt. Obwohl eine Steigerung der Pflanzenhöhe in den drei Teststrecken von 50 % in der Kontrollfläche beobachtet wird, ist die Wuchshöhe in den behandelten Bereichen nur um ca. 17 % gestiegen. Dazu reduziert sich das Trockengewicht um 5 % im Vergleich zur initialen Gewichtsentnahme.

Insgesamt sind zwei bis drei Behandlungen pro Jahr ausreichend, um die Pflanzenhöhe unter 30 cm zu halten. In allen Strecken gab es im ersten Jahr Bedarf für zwei Behandlungen. Dies kann sowohl am Zeitpunkt der Behandlung als auch an der Witterung liegen, da der Unterschied zwischen Frisch- und Trockengewicht im Jahr 2022 im Durchschnitt bei 34 % lag, während er in den Jahren 2023 und 2024 ca. 64 % bzw. 75 % betrug und somit das Wachstum verstärkt wird.

6.2.2 Auswertung nach Pflanzenarten

Die Wachstumsentwicklung der untersuchten Pflanzenarten wird in diesem Abschnitt einzeln betrachtet. Wie bei der Auswertung nach Verfahren wird der Verlauf der Wuchshöhe sowie des Pflanzengewichts über den gesamten Zeitraum der Untersuchung graphisch dargestellt und die Abweichung gegenüber der Kontrollfläche sowie zwischen den Jahren analysiert.

Tabelle 6.4 zeigt die erforderlichen Behandlungen jeder Pflanzenart pro Jahr. Unabhängig von Versuchsstrecke und Schotterbettbereich waren die am meisten behandelten Arten die Aufrechte Trespe (Gras) und die Brombeere (ausdauernde Pflanzen). Diese benötigen zwei bis vier Behandlungen pro Jahr. Abb. 6.7 zeigt beispielsweise den Verlauf der Pflanzenhöhe der Brombeere sowie den Zeitpunkt der erforderlichen Behandlungen in blau.

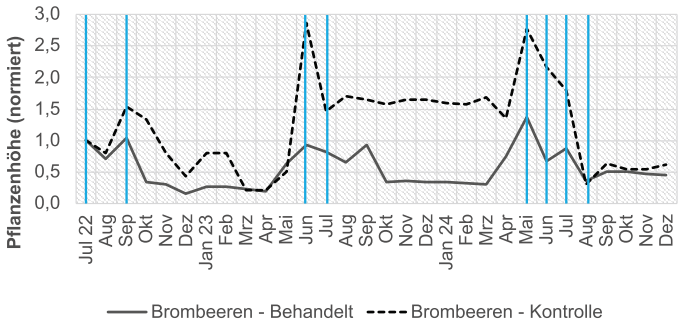


Abb. 6.7: *Pflanzenhöhe der Brombeere in Linnich über die gesamte Untersuchungszeit (normiert)*

Tab. 6.4: *Anzahl der erforderlichen Behandlungen nach Pflanzenart*

Pflanzenart	Standort			Anzahl der Behandlungen		
	P	L	B	2022	2023	2024
Aufrechte Trespe	x			2	4	3
Aufrechte Trespe		x		2	2	4
Ackerschachtelhalm	x			1	2	3
Ackerschachtelhalm		x		2	2	1
Ruprechtskraut		x		1	1	1
Brombeeren		x		2	2	4
Brombeeren			x	-	2	4
Birken		x		2	1	2
Berg-Ahorn			x	-	2	3
Gemeine Hainbuche			x	-	2	3

Begriffserläuterung: P = Puffendorf; L = Linnich; B = Birgden

Im Gegensatz dazu wird für das Ruprechtskraut (ein- oder zweijährige Pflanze) nur eine Einzelbehandlung pro Jahr benötigt, Abb. 6.8. Dies stimmt mit den Literaturstellen überein, die bestätigen, dass Jäten effektiver gegen einjährige als gegen ausdauernde Pflanzen ist, da Letztere Pflanzen aus den nicht ausgerissenen Wurzeln neuen Austrieb produzieren können [Zim18, Mer19]. Darüber hinaus weisen einjährige Pflanzen lange Wurzeln mit geringer Dichte auf, während die Wurzelmerkmale von ausdauernden Pflanzen durch dicke, dichte Wurzelsysteme einen verbesserten Widerstand zeigen [Rou06].

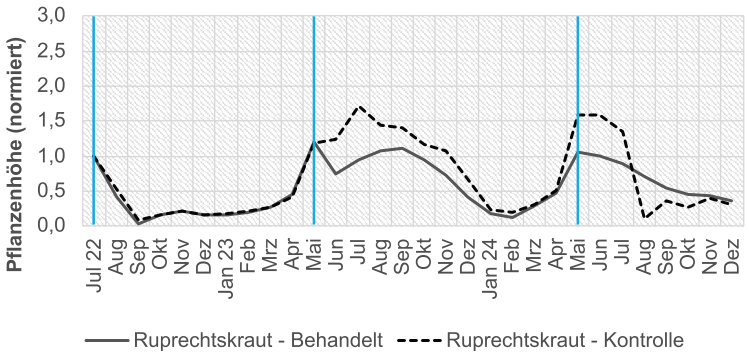


Abb. 6.8: *Pflanzenhöhe des Ruprechtskrauts in Linnich über die gesamte Untersuchungszeit*

Allerdings wurden nicht alle ausdauernden Pflanzen so oft wie die Brombeeren und die Aufrechte Trespe behandelt. Abb. 6.9 bildet den Verlauf der Pflanzenhöhe des Ackerschachtelhalms in Puffendorf ab. Unter Berücksichtigung beider Versuchsstandorte (Puffendorf und Linnich) beträgt die Anzahl der Behandlungen pro Jahr eins bis drei, wobei der Median auf zwei Behandlungen hinweist. Die Pflanze zeigte ein schnelles Wachstum und Absterben, insbesondere in Puffendorf, wo sie die Flächen ausschließlich in den Monaten Mai bis maximal September besiedelte und direkt im ersten Wachstumsmonat eine Wuchshöhe von ca. 50 cm erreichte. Am Standort Linnich wurde sie über einen längeren Zeitraum gesehen, jedoch verschwand sie im Winter vollständig.

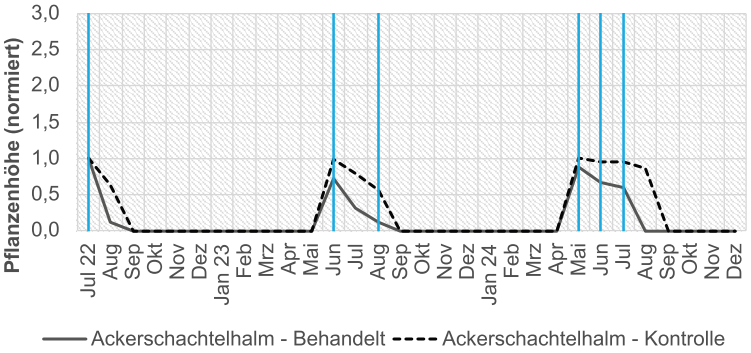


Abb. 6.9: *Pflanzenhöhe des Ackerschachtelhalms in Puffendorf über die gesamte Untersuchungszeit*

Verholzte Pflanzen wurden ebenfalls ein- bis dreimal pro Jahr behandelt. Insgesamt liegt die Anzahl der erforderlichen Behandlungen pro Jahr zwischen eins und vier, mit einem Median von zwei, um die Wuchshöhe unter 30 cm zu halten.

Bezüglich der Wachstumsentwicklung werden in Tab. 6.5 unterschiedliche Werte der Pflanzenhöhe gezeigt. Die initiale Pflanzenhöhe aller Pflanzen liegt unten 55 cm, während die maximale Höhe 270 cm erreicht (s. Kontrollfläche der Birken).

Obwohl das behandelte Unkraut in den Wachstumsmonaten eine ähnliche maximale Höhe wie die Kontrollpflanzen erreichen kann, liegt die durchschnittliche Höhe der behandelten Pflanzenarten mindestens 6 % niedriger als bei der Kontrollfläche. Die in blau markierten Felder in Tab. 6.5 verweisen auf die Flächen, die bei Bedarf vom Eisenbahnbetreibern teilweise zurückgeschnitten wurden, so dass die Abweichung zwischen Kontrolle und behandelten Flächen dem tatsächlichen Wert nicht entspricht. Trotzdem erreicht die Abweichung der

Tab. 6.5: *Relevante Werte der Pflanzenhöhe*

Pflanzenart	Initiale PH (cm)	Maximale PH (cm)		Durchschnittliche PH (cm)		K - B =*
		B	K	B	K	
Aufrechte Trespe (P)	43,52	120,00	115,00	21,60	35,71	33 %
Aufrechte Trespe (L)	47,50	107,50	105,00	23,63	26,37	**6 %**
Ackerschachtelhalm (P)	52,00	57,50	60,00	7,71	13,56	11 %
Ackerschachtelhalm (L)	25,93	37,50	23,50	9,89	10,52	7 %
Ruprechtskraut (L)	19,00	31,00	34,00	10,59	12,88	**12 %**
Brombeeren (L)	36,25	52,50	107,50	19,43	45,73	**68 %**
Brombeeren (B)	21,77	70,00	62,33	15,48	18,58	30 %
Birken (L)	46,00	37,00	270,00	17,27	139,52	207 %
Berg-Ahorn (B)	28,11	56,00	54,00	15,01	16,34	58 %
Gemeine Hainbuche (B)	28,15	60,00	47,00	12,66	14,42	**7 %**

Begriffserläuterung: PH = Pflanzenhöhe; P = Puffendorf; L = Linnich; B = Birgden; K = Kontrolle; B = Behandelt
*Abweichung wird mit den normierten Werten kalkuliert.

Brombeeren in Linnich ca. 70 % und zeigt bei der maximalen erreichten Höhe einen Unterschied von ca. 50 cm. Weitere große Abweichung der maximalen Pflanzenhöhe wird bei den Birken in Linnich beobachtet, wo die unbehandelten Pflanzen ca. 270 cm erreicht, während die maximale Höhe bei den behandelten Birken 37 cm beträgt, Abb. 6.10.

Eine niedrige Abweichung zwischen den behandelten und unbehandelten Pflanzen wird bei der Gemeinen Hainbuche beobachtet. Allgemein überschreitet die durchschnittliche Höhe dieser Pflanze selten 30 cm, so dass wenig Bedarf einer Behandlung besteht. Allerdings befindet sich die Pflanze in vielen Bereichen mit Brombeeren oder Berg-Ahorn gemischt und wird deshalb mitgeschnitten.

Als Folge der Auswertung der angewendeten Verfahren (Abschnitt 6.2.1) wird eine Zunahme der Pflanzenhöhe über die Jahre beobachtet, Tab. 6.6. Im Vergleich zur initialen Pflanzenhöhe sind die am meisten gewachsenen Arten in den behandelten Bereichen das Ruprechtskraut und die Aufrechte Trespe, deren Höhen von 2022 bis 2024 um über 40 % steigen. Interessant dabei ist die Senkung des Trockengewichts des Ruprechtskrauts und der Aufrechten

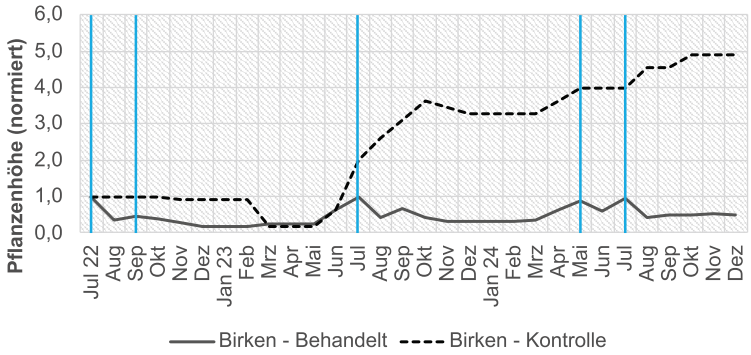


Abb. 6.10: *Pflanzenhöhe der Birken in Linnich über die gesamte Untersuchungszeit*

Trespe um 17 % bzw. 2 %, was auf eine Reduktion der tatsächlichen Biomasse und somit des Pflanzenmaterials im Gleisbereich hinweist.

Allgemein wird bei allen Arten mit Ausnahme des Ackerschachtelhalms in Puffendorf eine Reduktion des Trockengewichts beobachtet. Die Zunahme beim Ackerschachtelhalm beträgt 46 %, weshalb die Gesamtauswertung des resultierenden Trockengewichts stark ansteigt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Anzahl der Behandlungen pro Jahr stark von der Pflanzenart abhängt, aber auch vom jährlichen Wachstum, welches durch Aspekte wie die Witterung beeinflusst wird. Pflanzen wie das Ruprechtskraut benötigen ausschließlich eine Behandlung pro Jahr, während verholzte Pflanzen im Durchschnitt zweimal behandelt werden müssen. Dabei lässt sich durch die Wachstumsentwicklung der Birken die Relevanz der Behandlung erkennen, denn die behandelten Pflanzen erreichen eine maximale Höhe von 37 cm, während die Pflanzen der Kontrollfläche auf über 270 cm zugewachsen sind.

Ausdauernde Pflanzen wie Brombeere oder Aufrechte Trespe benötigen besondere Aufmerksamkeit, da sie über lange Zeit weiterwachsen können. Dabei werden zwei bis vier Behandlungen pro Jahr benötigt. Hier kann eine Kombination des maschinellen Jätens mit anderen herbizidfreien Verfahren wie dem Elektroweeding oder einem thermischen Verfahren die Anzahl der Behandlungen reduzieren, wie im Projekt „Entwicklung eines Alternativverfahrens zur chemischen Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen“ gezeigt wird [Arc26].

Wichtig ist, zu sehen, dass die durchschnittliche Höhe aller behandelten Arten in dem Gesamtzeitraum unter 25 cm bleibt, Tab. 6.5, was mindestens 10 cm

Tab. 6.6: *Wachstumsentwicklung der behandelten Arten über die gesamte Untersuchungszeit*

Pflanzenart	Pflanzenhöhe (%) 2024 - 2022*=		Gewichtsentnahme (%) 2024 - 2022*=	
	Behandelt	Kontrolle	Frisch	Trocken
Aufrechte Trespe (P)	42 %	86 %	20 %	2 %
Aufrechte Trespe (L)	26 %	20 %	-8 %	-7 %
Ackerschachtelhalm (P)	17 %	36 %	65 %	46 %
Ackerschachtelhalm (L)	15 %	-2 %	-15 %	-16 %
Ruprechtskraut (L)	44 %	52 %	3 %	-17 %
Brombeeren (L)	12 %	39 %	-10 %	-25 %
Brombeeren (B)	9 %	52 %	2 %	-19 %
Birken (L)	20 %	336 %	23 %	6 %
Berg-Ahorn (B)	1 %	28 %	-11 %	-13 %
Gemeine Hainbuche (B)	27 %	35 %	-9 %	-16 %

Begriffserläuterung: P = Puffendorf; L = Linnich; B = Birgden
*In Birgden entspricht die Abweichung dem Jahr 2023 statt 2022.

unterhalb der Fahrzeugbegrenzungslinie entspricht. Darüber hinaus konzentriert sich das starke Vegetationswachstum auf höchstens vier Monate im Jahr. Dementsprechend könnte eine Strategie zum Vegetationsmanagement, die diesen Zeitraum fokussiert, ausreichen, um die Pflanzenhöhe das ganze Jahr unter 25 cm zu halten und den Kontakt mit den Fahrzeugen zu vermeiden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Vegetationsmanagement auf Gleisanlagen trägt dazu bei, die Sicherheit des Eisenbahnbetriebs zu gewährleisten. In der EU findet hauptsächlich eine chemische Unkrautbekämpfung im Schotterbett statt. Aufgrund der gesetzlichen Einschränkungen zur Anwendung von Herbiziden sowie des gesellschaftlichen Drucks zum Schutz von Gesundheit und Umwelt steigt die Nachfrage nach einer nichtchemischen Vegetationskontrolle.

Als Beitrag zur Entwicklung von herbizidfreien Alternativen zum Vegetationsmanagement auf Gleisanlagen wurde in dieser Arbeit das Verfahren des maschinellen Jätens mit Umsetzung über gegenläufige rotierende Rollen entwickelt und in Versuchen auf seine Eignung und Effizienz im Gleisbereich erprobt. Zusätzlich wurde eine erste Einschätzung der jährlichen Anwendungsfrequenz des entwickelten Systems in experimentellen Versuchen ermittelt. Das maschinelle Jäten hatte bisher seine Anwendung ausschließlich in der Landwirtschaft.

Die folgende Zusammenfassung enthält die Ergebnisse der Arbeit sowie einen Ausblick mit Optimierungsvorschlägen für das entwickelte System und die Durchführung des Vegetationsmanagements auf Gleisanlagen.

7.1 Ergebnisse der Arbeit

Im ersten Schritt der Systementwicklung wurden der Zweck sowie die Rahmenbedingungen für den Einsatz definiert: Die mechanischen Rollen sollen sowohl krautige als auch verholzende bis verholzte Vegetation auf dem Schotterkörper bekämpfen, wobei die Geometrie sowie die Materialien des Gleisbettes die Hauptanforderungen für die erste Erprobung des Systems darstellen. Bei der Anwendung des Systems dürfen weder störende Effekte für die Bahninfrastruktur noch Gefahren für Mitarbeitende oder Dritte entstehen.

In weiteren Schritten wurden Funktionen und Lösungen zur Entwicklung des maschinellen Jätens recherchiert. Dabei wurden Datenlücken zur Funktionsweise des Verfahrens festgestellt, wie die erforderliche Ausreißkraft, um Pflanzen zu zupfen. Daher wurde ein Kleinprobenprüfstand gebaut, mit dem die Arbeitsparameter des Systems im Labor und im Gleisbereich ermittelt wurden. Außerdem wurde eine innovative Form der Rollen entwickelt. Es handelt sich um Zahnräder aus Kunststoff, bei denen die Zähne als Sternspitzen ausgebildet sind. Im Gegensatz zu Luft- oder Gummireifen kann die Geometrie flexibel mit dem erforderlichen Durchmesser sowie der geeigneten Länge gefertigt werden. Dazu weist die Geometrie der Rollen einen stärker definierten Formschluss

als das Reifenprofil auf und unterstützt den Mechanismus beim Klemmen von Pflanzenteilen.

Basierend auf den aus den Vorversuchen gewonnenen Erkenntnissen wurde das Gesamtkonzept des Jätsystems festgelegt und in Form eines Versuchsträgers für den flächendeckenden Einsatz im Gleis konstruiert und gebaut. Der Versuchsträger besteht aus den Rollen des maschinellen Jätens, einem Trägermodul und einem Zugfahrzeug, das das gesamte System zieht. Das maschinelle Jäten wurde modular in Baugruppen von zwei bis drei Rollenpaaren für die Hälfte der Gleisbreite konstruiert und am Trägermodul eingebaut. So konnte das Jätsystem entweder mit einer Kontrollfläche oder gegen sich selbst mit anderen Arbeitsparametern verglichen werden.

Die Erprobung des Versuchsträgers fand zu Beginn der Vegetationsperiode (April bis Juni) im Jahr 2024 in zwei Gleisabschnitten statt, die ein breites Spektrum von krautiger bis zunehmend verholzter Vegetation aufwiesen. Neben den Effekten auf unterschiedliche Pflanzenarten wurden vier Arbeitsparameter getestet: die Fahr- und Drehgeschwindigkeit, die Presskraft zwischen den Rollen sowie die Anzahl der Überfahrten, die den Effekt mehrerer hintereinander geschalteter Einheiten des maschinellen Jätens darstellt. Als Messgrößen der Versuche dienen die Entwicklung der Pflanzenhöhe und der Vegetationsdichte.

Die Ergebnisse weisen auf die Einsatzfähigkeit des entwickelten Jätsystems im Schotterkörper hin. Unabhängig von der Pflanzenart reduzierte das System die Pflanzenhöhe, die direkt nach dem Versuch ca. 200 mm betrug, bis zum Greifpunkt der Rollen. Die Wachstumsentwicklung wurde vier Wochen nach dem Versuch erfasst. Dabei betrug die durchschnittliche Änderung der Pflanzenhöhe zwischen 25 % und 33 %, während die durchschnittliche Reduktion der Vegetationsdichte ca. 15 % erreichte. Das vollständige Entwurzeln von Gräsern sowie von verholzten Pflanzen mit einem Durchmesser von bis zu 10 mm war bei niedrigen Geschwindigkeiten möglich.

Allgemein trat eine homogene Wirkung des Jätsystems auf der gesamten behandelten Flächen bis zu einer Fahrgeschwindigkeit von 5 km/h auf. Hier wurde offensichtlich, dass das Verhältnis zwischen Fahr- und Drehgeschwindigkeit die Wirksamkeit des Systems beeinflusst. Je mehr Drehungen der Rollen auf einer Fläche durchgeführt wurden, desto wahrscheinlicher war es, die Pflanzen zu erfassen. Als wirksam stellte sich ein Verhältnis von mindestens einer Drehung pro Schwellenfach heraus.

Die Durchführung mehrerer Überfahrten hat die Wirksamkeit des Systems gesteigert. Dabei erzielten zwei bis vier Überfahrten die höchste Änderung der Pflanzenhöhe und der Vegetationsdichte. Acht Überfahrten zeigten nur eine geringe Änderung der Wirksamkeit im Vergleich zu zwei und vier Überfahrten.

Um die erforderliche Presskraft festzulegen, ist eine weitere Erprobung dieses Parameters erforderlich, da die Ergebnisse unterschiedliche Tendenzen aufweisen.

Der Erfolg des Ausreißens hing nicht nur von den technischen Parametern ab, sondern auch von der Pflanzenart und dem Aufbau des Gleises. Das Schotterbett als Wachstumsgrundlage für Pflanzen ermöglicht tiefe Wurzeln, was das Ausreißen der Pflanzen erschwert.

Das maschinelle Jäten zeigte weder große Störungen für die Bahninfrastruktur noch Gefahren für Mitarbeitende und Dritte. Beim vollständigen Ausreißen des Unkrauts wurden geringe Verschiebungen der oberen Schotterschicht (max. 100 mm tief) an den betreffenden Stellen beobachtet. Schotterflug, wenn vorhanden, wurde durch den Mechanismus abgeschirmt, sodass der Schotter kein Personal gefährdete.

Der Energiebedarf des Systems wurde ebenfalls gemessen und hängt stark von der Pflanzenart ab. Bei der Behandlung von krautigen Bereichen (ohne Gräser) liegt der Energiebedarf zwischen etwa 2 kWh/km und 8 kWh/km, was vergleichbar mit dem Rückschnitt von Wiesen mit einem Scheibenmäher (5,5 kWh/km) oder der Anwendung von Herbiziden (5 kWh/km) ist [Col19]. Allerdings ist beim entwickelten Jätsystem wie beim Mähen mit mehreren Behandlungen pro Jahr und kaum einer Reduktion der Vegetationsdichte zu rechnen. Bei zunehmend verholzter Vegetation beträgt der Energiebedarf etwa 10 kWh/km bis 22 kWh/km und bei hohen Gräsern ca. 35 kWh/km. Thermische Verfahren wie Heißwasser weisen einen Energiebedarf von 184 kWh/h auf, jedoch mit einer stärkeren Wirkung [Boh20].

Zusätzlich zu der Erprobung des Versuchsträgers wurde eine erste Einschätzung der Anwendungsfrequenz des maschinellen Jätens ermittelt. Dabei wurde die Anzahl der erforderlichen Behandlungen pro Jahr gezählt, um die Höhe typischer Pflanzenarten des Gleisbereiches unter 300 mm zu halten. Diese Höhe entspricht dem Abstand vom Schotter zur Fahrzeugbegrenzungslinie, so dass bei Einhaltung dieser Pflanzenhöhe der Kontakt zwischen den Pflanzen und den Fahrzeugen vermieden oder verringert wird.

Für die Untersuchung wurde die Pflanzenhöhe monatlich in homogenen bewachsen Bereichen des Schotterbettes gemessen. Bei einer Höhe von 300 mm wurde das Unkraut von Hand ausgerissen oder mit einer Schere abgeschnitten, wo das maschinelle Jäten nachgestellt und ebenfalls mit dem Verfahren Mähen verglichen wurde. Das entnommene Pflanzenmaterial wurde gesammelt und das Frisch- sowie Trockengewicht ermittelt, um die Änderung der Pflanzenmasse über die Untersuchungszeit zu quantifizieren. Die Arbeitsweise der Verfahren wurde ebenfalls berücksichtigt, das ist, wie beim entwickelten Jätsystem wurde

die Pflanzen auf einer Höhe von 150 mm vom Schotter einmalig erfasst und gezogen, wobei dies mit oder ohne Entwurzelung der Pflanze erfolgen kann. Um der Einfluss des nach der Behandlung liegengebliebenen Unkrauts zu untersuchen, wurde das Unkraut in einem zusätzlichen Bereich abgeschnitten und liegen lassen. Neben den behandelten Flächen wurden Kontrollfläche untersucht, in denen die Pflanzenhöhe ebenfalls monatlich gemessen wurde. Die Untersuchung wurde in einem Zeitraum von zwei bis drei Jahre durchgeführt.

Die notwendige Anzahl der Behandlungen pro Jahr variierte je nach Pflanzenart, betrug jedoch im Durchschnitt zwei bis drei Anwendungen. Die Ergebnisse wiesen auf eine ähnliche Wirksamkeit der drei Verfahren bei einer großen Abweichung zu der Kontrollfläche von mindestens 34 % hin. Über die Jahre steigerte sich die durchschnittliche Pflanzenhöhe der Kontrollfläche um 50 %, während sie in den behandelten Bereichen nur um 17 % anstieg. Trotzdem nahm das entnommene Trockengewicht um 5 % ab.

Die am häufigsten behandelten Pflanzenarten waren die Aufrechte Trespe und die Brombeere, die einen Bedarf von bis zu vier Behandlungen pro Jahr zeigten. Im Gegensatz dazu benötigte das Ruprechtskraut (eine einjährige Pflanze) ausschließlich eine Behandlung pro Jahr. Die Relevanz der Behandlung wurde bei der Birke (verholzte Pflanze) offensichtlich, da hier ein Baum in der Kontrollfläche ca. 3 m hoch gewachsen ist, während die behandelten Pflanzen eine maximale Höhe von 370 mm erreichten.

Auch wenn die Pflanzen bei der Anwendung des Jätsystems häufiger ab- als ausgerissen wurden, wurden sie vor der Samenbildung behandelt, sodass kein neuer Samenanbau möglich war. Dies ist besonders vorteilhaft bei der Bekämpfung von einjährigen und zweijährigen Pflanzen, deren Überlebensstrategie auf der massiven Entwicklung von Samen basiert, und könnte die Wirksamkeit des maschinellen Jätens erhöhen.

Mit dieser Arbeit wurde eine innovative herbizidfreie Technologie für den Gleisbereich entwickelt und getestet. Die Ergebnisse stehen nun dem Bahnsektor offen.

7.2 Zukünftiger Forschungsbedarf

Neben der Geometrie und den Materialien der Infrastruktur stellen die Einhaltung der Fahrzeugbegrenzungslinie und eine betrieblich gewünschte Fahrgeschwindigkeit von über 20 km/h wichtige Anforderungen in hoch belasteten Gleisen dar. Bau- und Wartungsmaschinen, die die Fahrzeugbegrenzungslinie überschreiten, können zwar zugelassen werden, dürfen jedoch nicht mit hohen Fahrgeschwindigkeiten arbeiten. Dies hat die Sperrung der Strecke sowie die

Beeinträchtigung des fahrenden Verkehrs, zur Folge. Eine Möglichkeit, diesen Aspekt im Jätsystem zu lösen, besteht darin, den Apparat zum maschinellen Jäten weiterzuentwickeln, sodass er auf dem Schotter und nicht auf den Schienen fährt. Dadurch tritt das Jätsystem nicht in die Fahrzeugbegrenzungslinie ein. Vorteilhaft ist zudem die Positionierung des Greifpunkts der Rollen auf einer geringeren Pflanzenhöhe als bisher, was ein besseres Zupfen ermöglichen könnte. Dabei müssen jedoch die Unebenheiten des Schotterbettes sowie Abweichungen von Hindernissen berücksichtigt werden.

Bezüglich der Fahrgeschwindigkeit soll der Zweck des Systems neu definiert werden. Sollte das System für den Einsatz auf höheren Geschwindigkeiten entwickelt werden, dann muss die Drehgeschwindigkeit der Rollen erhöht werden, was ausschließlich das Unkraut mähen könnte. Im Gegenteil dazu könnte das System für das Ausreißen von Pflanzen bei niedrigen Geschwindigkeiten optimiert werden.

Weiterhin wurden drei Faktoren identifiziert, um die Effektivität des Jätsystems zu steigern. Zum einen die Erhöhung des Abstands zwischen den Rollenreihen in Fahrtrichtung, sodass die Pflanzen leichter aufgenommen werden können und nicht heruntergebogen werden. Zum anderen eine höhergelegene Anordnung des Rollengetriebes, um ebenfalls ein Herunterbiegen der Pflanzen zu verhindern. Zusätzlich würde die kontinuierliche Freihaltung der Rollen, beispielsweise durch den Einsatz von Bürsten oder scharfen Klingen, eine längere effektive Behandlung von hohen Pflanzen (über 500 mm) ermöglichen und das Einwickeln der Pflanzen in den Rollen vermeiden.

Zu beobachten ist auch, dass das starke Wachstum der Pflanzen nur auf maximal vier Monate (Mai bis August) bezogen ist. Eine Strategie zum Vegetationsmanagement in diesen Monaten hätte Einfluss auf das ganze Jahr. Um die Anzahl der nötigen Behandlungen pro Jahr zu senken, könnte das maschinelle Jäten mit anderen herbizidfreien Verfahren kombiniert werden, die die Vegetationsdichte reduzieren, wie z.B. das Elektroweeding. Allgemein haben alle Verfahren zur Vegetationskontrolle, einschließlich Herbiziden, sowohl Vorteile als auch Nachteile und wirken je nach Pflanzenart unterschiedlich. Daher ist eine Verfahrenskombination oder integrierte Unkrautbekämpfung (IUP), wie sie in der Landwirtschaft praktiziert wird, erforderlich, um eine wirksame, nachhaltige und wirtschaftliche Vegetationskontrolle zu gewährleisten.

Literaturverzeichnis

[Ahm14] AHMAD, M. T.; TANG, L.; STEWARD, B. L.: Automated Mechanical Weeding. In: YOUNG, S. L.; PIERCE, F. J., Hrsg., Automation: The Future of Weed Control in Cropping Systems. Springer Netherlands, Dordrecht, 2014. S. 125–137. URL https://doi.org/10.1007/978-94-007-7512-1_7.

[Ahm20] AHMAD, F.; JAMIL, M. T.; AKHTAR KHAN, A.; MEHMOOD-KHAN, Z.; QIU, B.; MA, J.; CHANDIO, F. A.: Field Performance Evaluation and Finite Element Simulation of Cotton Stalk Puller-Shredder: A Sustainable Mechanical Solution to Control Pink Bollworm (Pectinophora Gossypiella). In: Sustainability, Bd. 12 (2020)(8):S. 3407. URL https://doi.org/10.3390/su12083407.

[Alj10] ALJANOBI, A. A.; AL-HAMED, S. A.; AL-SUHAIBANI, S. A.: A setup of mobile robotic unit for fruit harvesting. In: 19th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD 2010). S. 105–108. URL https://doi.org/10.1109/RAAD.2010.5524602.

[AlloD] ALLIANZ PRO SCHIENE E.V.: Das Schienennetz in Deutschland, (o.D.). URL https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/infrastruktur/schienennetz/, Letzter Zugriff: 12.05.2026.

[Ant11] ANTONELLI, G.; AURITI, L.; BEOMONTE ZOBEL, P.; RAPARELLI, T.: Development of a new harvesting module for saffron flower detachment. In: Romanian Review Precision Mechanics, Optics and Mechatronics, (2011):S. 163–168.

[Arb] ARBSCHG: Arbeitsschutzgesetz vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), das zuletzt durch Artikel 32 des Gesetzes vom 15. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 236) geändert worden ist.

[Arc23] ARCHUT, C.; JENDRNY, N.; SCHULTE-MARXLOH, A.; EBERIUS, M.; CONRATH, U.; SCHINDLER, C.: Experimental comparison of herbicide-free methods for weed management on railway tracks. In: Transportation Research Procedia, Bd. 72 (2023):S. 1169–1176. URL https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.574.

[Arc25] ARCHUT, C.; JENDRNY, N.; SKIBA, M.; SOEMANTRI, A.; PFAFF, R.; SCHINDLER, C.: Development of a mechanical weeding system for railway tracks. In: Results in Engineering, Bd. 28 (2025):S. 9 Seiten. URL https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107688.

[Arc26] ARCHUT, C.; JENDRNY, N.; SCHINDLER, C.; SCHULTE-MARXLOH, A.; CONRATH, U.; EBERIUS, M.; MICHAEL, S.: Entwicklung eines Alternativverfahrens zur chemischen Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen, 2026. URL https://doi.org/10.48755/DZSF.260007.01, Letzter Zugriff: 09.04.2026.

[Atm95] ATMATZIDIS, E.; BEHRENDT, S.: Ökologischer Vergleich der Verfahren zur Vegetationskontrolle bei der Deutschen Bahn AG unter Berücksichtigung von Kostenberechnungen, Bd. 22 : Werkstattberichte / IZT, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. IZT, Berlin, 1995.

[Bal23] BALTAZAR, A. M.; DE DATTA, S. K.: Weed Science and Weed Management in Rice and Cereal-Based Cropping Systems, Kap. Mechanical, Cultural, Physical, and Integrated Weed Management. Wiley Online Library, 2023. S. 183–239. URL https://doi.org/10.1002/9781119737582.

[Ben21] BENDER, B.; GERICKE, K.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Springer Vieweg, Berlin, Germany, 9. auflage Aufl., 2021. URL https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7.

[Ber22] BERNSTEIN, H.: Elektropneumatische und elektrohydraulische Bauelemente in der Mechatronik: Konstruktion von sicherheitsgerichteten Steuerungen für Industrie 4.0. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2022. URL https://doi.org/10.1007/978-3-658-34445-0_2.

[BNa] BNATSCHG: Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das zuletzt durch Artikel 48 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 323) geändert worden ist.

[Boh20] BOHREN, C.; ADOLPH, G.; TANNER, L.: Wirkungsvergleich Heißwasser und Herbizid – Schweizer Bahnen wollen ab 2025 weitgehend auf Herbizideinsatz verzichten. In: Julius-Kühn-Archiv, Bd. 464 (2020). URL https://doi.org/10.5073/jka.2020.464.063.

[Bot22] BOTTA, A.; CAVALLONE, P.; BAGLIERI, L.; COLUCCI, G.; TAGLIAVINI, L.; QUAGLIA, G.: A Review of Robots, Perception, and Tasks in Precision Agriculture. In: Applied Mechanics, Bd. 3 (2022)(3):S. 830–854. URL https://doi.org/10.3390/applmech3030049.

[Büs08] BÜSCHER, D.; KEIL, P.; LOOS, G.: Neue Ausbreitungstendenzen von primär als Eisenbahnwanderer aufgetretenen Pflanzenarten im Ruhrgebiet: Die Beispiele Eragrostis minor, Geranium purpureum

und Saxifraga tridactylites. In: Braunschweiger Geobotanische Arbeiten, (2008)(9):S. 97–106. URL https://doi.org/10.24355/DBBS.084-201701201707-0.

[B.V25] B.V., O.: Maverick – Ihr autonomer Unkrautroboter, 2025. URL https://www.odd.bot/de/maverick, Letzter Zugriff: 13.02.2025.

[Clo07] Cloutier, D.; van der Weide, R.; Peruzzi, A.; Leblanc, M.: Mechanical weed management. In: Upadhyaya, M. K.; Blackshaw, R. E., Hrsg., Non-Chemical Weed Management: Principles, Concepts and Technology. CABI DIgital Library, 2007. S. 111 – 134.

[Col19] Coleman, G. R. Y.; Stead, A.; Rigter, M. P.; Xu, Z.; Johnson, D.; Brooker, G. M.; Sukkarieh, S.; Walsh, M. J.: Using energy requirements to compare the suitability of alternative methods for broadcast and site-specific weed control. In: Weed Technology, Bd. 33 (2019)(4):S. 633–650. URL https://doi.org/10.1017/wet.2019.32.

[Dav20] Davidson, J.; Bhusal, S.; Mo, C.; Karkee, M.; Zhang, Q.: Robotic Manipulation for Specialty Crop Harvesting: A Review of Manipulator and End-Effector Technologies. In: Global Journal of Agricultural and Allied Sciences, Bd. 2 (2020)(1):S. 25–41. URL https://doi.org/10.35251/gjaas.2020.004.

[DB 22] DB Konzern: Integrierter Bericht 2022, 2022. URL https://ir.deutschebahn.com/de/berichte/db-konzern-und-db-ag/, Letzter Zugriff: 04.10.2024.

[DB 23] DB Konzern: Integrierter Bericht 2023, 2023. URL https://ir.deutschebahn.com/de/berichte/db-konzern-und-db-ag/, Letzter Zugriff: 04.10.2024.

[Deu78] Deutsches Institut für Normung (DIN): Verzahnungen - Toleranzen für Stirnradverzahnungen nach DIN 867 - zul. Flankenrichtungsfehler, zul. Sammelfehler, Zahnweitenabmaße, 1978.

[Deu18] Deutsche Bahn AG: Integrierter Pflanzenschutz im DB-Konzern in Deutschland: Leitlinien für eine nachhaltige Vegetationspflege im Rahmen der Instandhaltung von Anlagen und Flächen, 2018. URL https://www.nap-pflanzenschutz.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Dokumente/Integrierter_Pflanzenschutz/Leitlinien_IPS/Leitlinie_IPS_DeutscheBahn.pdf, Letzter Zugriff: 09.09.2025.

[EBO] EBO: Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 8. Mai 1967 (BGBl. 1967 II S. 1563), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 5. April 2019 (BGBl. I S. 479) geändert worden ist.

[Egg01] EGGERS, T.; ZWERGER, P.; ADERHOLD, D.: Bewuchsentwicklung und Bildung typischer Pflanzenbestände auf Gleisanlagen. In: Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzbundes, Bd. 53 (2001)(4):S. 91–97.

[Ehr20] EHRLENSPIEL, K.; KIEWERT, A.; LINDEMANN, U.; MÖRTL, M.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung, Kap. Kostenverantwortung der Produktentwickler. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2020. S. 7 – 19.

[Eic23] EICHLER, J.; MODLER, A.: Physik für das Ingenieurstudium. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2023.

[Erg15] ERGONICA: Weed Twister - The Wonder Tool for Weeds!, 2015. URL http://www.weedtwister.com/index.htm, Letzter Zugriff: 13.02.2025.

[Exc96] EXCLUSIVE MECHANICAL SYSTEMS: The extratigator, 1996. URL https://extractigator.com/index.html, Letzter Zugriff: 13.02.2025.

[F.A25] F.A.Z KAUFKOMPASS GMBH: Der beste Unkrautstecher, 2025. URL https://www.faz.net/kaufkompass/test/der-beste-unkrautstecher/#box-2, Letzter Zugriff: 04.09.2025.

[Fac19] FACHAUSSCHUSS PFLANZENSCHUTZMITTELRESISTENZ - HERBIZIDE AM JULIUS KÜHN-INSTITUT: Entstehung und Management von herbizidresistenten Unkräutern und Ungräsern im Ackerbau, 2019. URL https://doi.org/10.5073/20210531-112831, Letzter Zugriff: 12.02.2025.

[Fel18] FELDMANN, D. G.; BARTELMEI, S.: Bauelemente hydrostatischer Getriebe. In: GROTE, K.-H.; BENDER, B.; GÖHLICH, D., Hrsg., Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018. S. 650–660. URL https://doi.org/10.1007/978-3-662-54805-9_55.

[Fel20] FELDMANN, D.; BARTELMEI, S.: Pneumatische Antriebe. In: BENDER, B.; GÖHLICH, D., Hrsg., Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 2: Anwendungen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2020. S. 515–516. URL https://doi.org/10.1007/978-3-662-59713-2_21.

[Fen14] FENNIMORE, S. A.; HANSON, B. D.; SOSNOSKIE, L. M.; SAMTANI, J. B.; DATTA, A.; KNEZEVIC, S. Z.; SIEMENS, M. C.: Field Applications of Automated Weed Control: Western Hemisphere. In: YOUNG, S. L.; PIERCE, F. J., Hrsg., Automation: The Future of Weed Control in Cropping Systems. Springer Netherlands, Dordrecht, 2014. S. 151–169. URL https://doi.org/10.1007/978-94-007-7512-1_9.

[Fen19] FENDRICH, L.; FENGLER, W.: Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 3. aufl. Aufl., 2019. URL https://doi.org/10.1007/978-3-662-56062-4.

[FFR20] FFROBOTICS: 2020. URL https://www.ffrobotics.com/, Letzter Zugriff: 15.03.2025.

[Gey08] GEYER, H.; LOOS, G.; BÜSCHER, D.: Rezentvorkommen von Adventivpflanzen und Apophyten auf Bahnhöfen im mittleren Westfalen und ihre Ausbreitungstendenzen. In: Braunschweiger Geobotanische Arbeiten, (2008)(9):S. 177–188. URL https://doi.org/10.24355/DBBS.084-201701201724-0.

[Gha22] GHALY, A. E.; IBRAHIM, M. M.: Mechanization of Weed Management in Sugar Beet. In: MISRA, V.; SRIVASTAVA, S.; MALL, A. K., Hrsg., Sugar Beet Cultivation, Management and Processing. Springer Nature Singapore, Singapore, 2022. S. 327–367. URL https://doi.org/10.1007/978-981-19-2730-0_17.

[Gha23] GHATREHSAMANI, S.; JHA, G.; DUTTA, W.; MOLAEI, F.; NAZRUL, F.; FORTIN, M.; BANSAL, S.; DEBANGSHI, U.; NEUPANE, J.: Artificial Intelligence Tools and Techniques to Combat Herbicide Resistant Weeds-A Review. In: Sustainability, Bd. 15 (2023)(3):S. 1843. URL https://doi.org/10.3390/su15031843.

[Glo23] GLOBAL HERBICIDE RESISTANCE ACTION COMMITTEE AND CROPLIFE INTERNATIONAL: International Herbicide-Resistant Weed Database, 2023. URL https://www.weedscience.org/Pages/filter.aspx, Letzter Zugriff: 23.12.2024.

[Gok19] GOKUL, S.; DHIKSITH, R.; SUNDARESH, S. A.; GOPINATH, M.: Gesture Controlled Wireless Agricultural Weeding Robot. In: 2019 5th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS). S. 926–929. URL https://doi.org/10.1109/ICACCS.2019.8728429.

[Hai12] HAIFENG, W.; BIN, L.; GUANGYU, L.; LIMING, X.: Design and test of pineapple harvesting manipulator. In: Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), Bd. 28 (2012)(26):S. 42–46. URL http://www.tcsae.org/en/article/id/20122608.

[Har24] HARTMANN, H.; RESSEL, J. B.; RICHTER, K.; TEISCHINGER, A.: Trocknungsprozesse für biogene Festbrennstoffe. Springer Fachme-

dien Wiesbaden, Wiesbaden, 2024. S. 619–660. URL 10.1007/978-3-658-40828-2_10.

[Hof14] HOFSTEE, J. W.; NIEUWENHUIZEN, A. T.: Field Applications of Automated Weed Control: Northwest Europe. In: YOUNG, S. L.; PIERCE, F. J., Hrsg., Automation: The Future of Weed Control in Cropping Systems. Springer Netherlands, Dordrecht, 2014. S. 171–187. URL https://doi.org/10.1007/978-94-007-7512-1_10.

[Hur96] HURLE, K.; ADERHOLD, D.: Gutachten zur Auswahl von Herbiziden für die Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen – Abschlussbericht im Auftrag der Deutschen Bahn AG, 1996. Unveröffentlicht.

[Ima24] IMAOKA, K.; EMARU, T.: Pulling-Out Weeding Device for Intra-Row Weeding Robots. In: 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). IEEE, S. 747–752. URL https://doi.org/10.1109/SII58957.2024.10417180.

[Int21] INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS (UIC): Future Vegetation Control of European Railways, State-of-the-art report, TRISTRAM Final Report, 2021. URL https://uic.org/projects-99/article/tristram, Letzter Zugriff: 04.10.2024.

[Jab15] JABRAN, K.; CHAUHAN, B. S.: Weed management in aerobic rice systems. In: Crop Protection, Bd. 78 (2015):S. 151–163. URL https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.09.005.

[Jen24] JENDRNY, N.; ARCHUT, C.; SCHULTE-MARXLOH, A.; EBERIUS, M.; CONRATH, U.; SCHINDLER, C.: Rating-Based Design of a Vehicle for Herbicide-Free Vegetation Control on Rails. In: POMBO, J., Hrsg., Proceedings of the Sixth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Civil-Comp Conferences. Civil-Comp PressEdinburgh, United Kingdom, S. 1–12. URL https://www.ctresources.info/ccc/paper.html?id=10297.

[Jä21] JÄNSCH, E.; FENGLER, W.; KOPPEL, M.; WEIGAND, W.; FELDWISCH, W.; WERNER, K.; SCHÜTZE, C.: Infrastruktur. In: JÄNSCH, E.; LANG, H. P.; NIESSEN, N., Hrsg., Handbuch Das System Bahn. PMC, Leverkusen, 2021. S. 317–520.

[Kat09] KATHIRVEL, K.; THAMBIDURAI, S.; RAMESH, D.; MANOHAR JESUDAS, D.: Ergonomics of Self Propelled Power Weeders as Influenced by Forward Speed and Terrain Condition. In: AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, Bd. 40 (2009):S. 28–33.

[Kem82] KEMP, D. C.; MATTHEWS, M.: The development of a cotton stalk pulling machine. In: Journal of Agricultural Engineering Research, Bd. 27 (1982)(3):S. 201–213. URL https://doi.org/10.1016/0021-8634(82)90062-2.

[Kha19] KHAYER, S. M.; PATEL, T.; NINGTHOUJAM, B.: Ergonomic Postural and Biomechanical Analysis of Manual Weeding Operation in Agriculture Using Digital Human Models. In: CHAKRABARTI, A., Hrsg., Research into Design for a Connected World, Bd. 135 : Smart Innovation, Systems and Technologies. Springer Singapore, Singapore, 2019. S. 451–462. URL https://doi.10.1007/978-981-13-5977-4_38.

[Kon04] KONDO, T.; TANAKA, K.; OHKAWA, F.; NISHIDA, T.; OYA, M.: Development of Weeding Robot System. In: Proc. of ISBS2004, Part V Robotics and Motion Control. S. 27—31.

[Kum23] KUMAR, S. P.; TEWARI, V.; MEHTA, C.; NARE, B.; C R, C.; CHANDEL, A.; PAREEK, C.; KUMAR, S.: Development of Tractor Operated Vertical Axis Rotary Weeder for Inter Row Weed Control. In: Ama, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, Bd. 54 (2023):S. 29–38.

[Kup04] KUPFER, R.: Auswirkungen von Beschleuningungs- und Bremskräften auf die Längsbewegungen des Gleisrostes. Ph.D. thesis, Technische Universität München, 2004.

[Lic10] LICHTBERGER, B.: Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. EurailPress, Hamburg, 3. aufl. Aufl., 2010.

[Lod21] LODDO, D.; MCELROY, J. S.; GIANNINI, V.: Problems and perspectives in weed management. In: Italian Journal of Agronomy, Bd. 16 (2021)(4):S. 1854. URL https://doi.org/10.4081/ija.2021.1854.

[Lyt24] LYTRIDIS, C.; PACHIDIS, T.: Recent Advances in Agricultural Robots for Automated Weeding. In: AgriEngineering, Bd. 6 (2024)(3):S. 3279–3296. URL https://doi.org/10.3390/agriengineering6030187.

[Maj08] MAJUMDAR, G.: Mechanization of Cotton Production, 2008. URL http://tmc.cicr.org.in/pdf/2.3-07-08.pdf, Letzter Zugriff: 11.03.2025.

[Man04] MANIAN, R.; RAO, M.; KATHIRVEL, K.; SENTHILKUMAR, T.: Efficiency of Cotton Stalk Puller as Influenced by Forward Speed, Wheel Rotational Speed and Wheel Tilt Angle. In: Ama, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, Bd. 35 (2004):S. 37.

[Man15] MANTI, M.; HASSAN, T.; PASSETTI, G.; D'ELIA, N.; LASCHI, C.; CIANCHETTI, M.: A Bioinspired Soft Robotic Gripper for Adaptable and Effective Grasping. In: Soft Robotics, Bd. 2 (2015)(3):S. 107–116. URL https://doi.org/10.1089/soro.2015.0009.

[Mar15] MARBLE, S. C.; KOESER, A. K.; HASING, G.: A Review of Weed Control Practices in Landscape Planting Beds: Part II—Chemical Weed Control Methods. In: HortScience, Bd. 50 (2015):S. 857–862. URL https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.6.857.

[Mat20] MATLOOB, A.; EHSAN SAFDAR, M.; ABBAS, T.; ASLAM, F.; KHALIQ, A.; TANVEER, A.; REHMAN, A.; RAZA CHADHAR, A.: Challenges and prospects for weed management in Pakistan: A review. In: Crop Protection, Bd. 134 (2020). URL https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.01.030.

[Mat25] MATZRAFI, M.; BLANK, L.; LATI, R. N.: Selection and adaptation to weed management methods: implications for non-chemical and integrated weed management approaches. In: Pest management science, Bd. 81 (2025)(1):S. 22–27. URL https://doi.org/10.1002/ps.8463.

[Mel17] MELANDER, B.; LIEBMAN, M.; DAVIS, A. S.; GALLANDT, E. R.; BÀRBERI, P.; MOONEN, A.-C.; RASMUSSEN, J.; VAN DER WEIDE, R.; VIDOTTO, F.: Non–Chemical Weed Management. In: HATCHER, P. E.; FROUD-WILLIAMS, R. J., Hrsg., Weed Research. Wiley, 2017. S. 245–270. URL https://doi.org/10.1002/9781119380702.ch9.

[Men24] MENIUS, R.: Bahnbau und Bahninfrastruktur: Ein Leitfaden zu bahnbezogenen Infrastrukturthemen. Springer Vieweg, Wiesbaden and Heidelberg, 11. auflage Aufl., 2024. URL https://doi.org/10.1007/978-3-658-44591-1.

[Mer19] MERFIELD, C. N.: Integrated Weed Management in Organic Farming. In: Organic Farming. Elsevier, 2019. S. 117–180. URL https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813272-2.00005-7.

[Mic23] MICHAEL, J. J.; THENMOZHI, M.: Survey on Weeding Tools, Equipment, AI-IoT Robots with Recent Advancements. In: 2023 International Conference on Integration of Computational Intelligent System (ICICIS). S. 1–6. URL https://doi.org/10.1109/ICICIS56802.2023.10430238.

[Mül01] MÜLLER, C.; KUPPELWIESER, H.; VON ARX, R.; BEYELER, R.: Vegetationskontrolle auf Bahnanlagen, 2001. URL https://www.

bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/boden/publikationen-studien/publikationen/vegetationskontrolle-auf-bahnanlagen.html, Letzter Zugriff: 17.08.2021.

[New10] NEW ATLAS: Wunda Weeder lets farm workers lie down on the job, 2010. URL https://newatlas.com/wunda-weeder-lets-farm-workers-lie-down-on-the-job/15703/, Letzter Zugriff: 12.02.2025.

[Nic21] NICK, P.; KADEREIT, J. W.: Funktionelle Morphologie und Anatomie der Gefäßpflanzen, Kap. 3. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2021. S. 137–243. URL https://doi.org/10.1007/978-3-662-61943-8_3.

[Nie19] NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ; NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, BAUEN UND KLIMASCHUTZ; NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ (NLWKN); DEUTSCHE BAHN AG; DB NETZE FAHRWEG; DB FAHRWEGDIENSTE GMBH: Vegetationsmanagement an Bahntrassen der Deutschen Bahn AG in Niedersachsen: Ein Leitfaden für die Zusammenarbeit zwischen Naturschutz-, Waldbehörden und DB, 2019. URL https://www.deutschebahn.com/resource/blob/4134622/fd58466d6fc49cf19242dd87e051c176/vegetationsleitfaden_niedersachen-data.pdf, Letzter Zugriff: 05.02.2025.

[Nol18] NOLTE, R.; BEHRENDT, S.; MAGRO, M.; PIETRAS-COUFFIGNAL, K.: HERBIE - Guidelines, State of the Art and Integrated Assessment of Weed Control and Management for Railways. UIC-ETF, Paris, 2018.

[Pan17] PANNACCI, E.; LATTANZI, B.; TEI, F.: Non–chemical weed management strategies in minor crops: A review. In: Crop Protection, Bd. 96 (2017):S. 44–58. URL https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.01.012.

[Pan23] PANDIRWAR, A. P.; KHADATKAR, A.; MEHTA, C. R.; MAJUMDAR, G.; IDAPUGANTI, R.; MAGESHWARAN, V.; SHIRALE, A. O.: Technological Advancement in Harvesting of Cotton Stalks to Establish Sustainable Raw Material Supply Chain for Industrial Applications: a Review. In: BioEnergy Research, Bd. 16 (2023)(2):S. 741–760. URL https://doi.org/10.1007/s12155-022-10520-3.

[Pav22] PAVLOVIĆ, D.; VRBNIČANIN, S.; ANĐELKOVIĆ, A.; BOŽIĆ, D.; RAJKOVIĆ, M.; MALIDŽA, G.: Non-Chemical Weed Control for Plant

Health and Environment: Ecological Integrated Weed Management (EIWM). In: Agronomy, Bd. 12 (2022)(5):S. 1091. URL https://doi.org/10.3390/agronomy12051091.

[Ram10] RAMADAN, Y.: Development and Evaluation of a Cotton Stalks Puller. In: Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering, Bd. 1 (2010)(10):S. 1061–1073. URL https://doi.org/10.21608/jssae.2010.75470.

[Rao07] RAO, A. N.; JOHNSON, D. E.; SIVAPRASAD, B.; LADHA, J. K.; MORTIMER, A. M.: Weed Management in Direct-Seeded Rice. In: Advances in Agronomy, Bd. 93 (2007):S. 153–255. URL https://doi.org/10.1016/S0065-2113(06)93004-1.

[Ras07] RASK, A. M.; KRISTOFFERSEN, P.: A review of non-chemical weed control on hard surfaces. In: Weed Research, Bd. 47 (2007)(5):S. 370–380. URL https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2007.00579.x.

[Ras13] RASK, A. M.; LARSEN, S. U.; ANDREASEN, C.; KRISTOFFERSEN, P.: Determining treatment frequency for controlling weeds on traffic islands using chemical and non-chemical weed control. In: Weed Research, Bd. 53 (2013):S. 249—-258. URL https://doi.org/10.1111/wre.12019.

[Rei96] REINHART, G.; LINDEMANN, U.; HEINZL, J.: Produktentwicklung, Kap. 4. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1996. S. 71–98. URL https://doi.org/10.1007/978-3-642-80210-2_5.

[Rou06] ROUMET, C.; URCELAY, C.; DÍAZ, S.: Suites of root traits differ between annual and perennial species growing in the field. In: The New phytologist, Bd. 170 (2006)(2):S. 357–368. URL https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01667.x.

[Sak08] SAKAI, S.; IIDA, M.; OSUKA, K.; UMEDA, M.: Design and control of a heavy material handling manipulator for agricultural robots. In: Autonomous Robots, Bd. 25 (2008)(3):S. 189–204. URL https://doi.org/10.1007/s10514-008-9090-y.

[Sak22] SAKAMA, S.; TANAKA, Y.; KAMIMURA, A.: Characteristics of Hydraulic and Electric Servo Motors. In: Actuators, Bd. 11 (2022)(1):S. 11. URL https://doi.org/10.3390/act11010011.

[Sca09] SCARFE, A. J.; FLEMMER, R. C.; BAKKER, H. H.; FLEMMER, C. L.: Development of an autonomous kiwifruit picking robot. In: 2009 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents. S. 380–384. URL https://doi.org/10.1109/ICARA.2000.4804023.

[Sch12] SCHINDLER, C.: Der allgemeine Konstruktionsprozess – Grundlagen des methodischen Konstruierens. In: RIEG, F.; STEINHILPER, R., Hrsg., Handbuch Konstruktion. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2012. S. 391–442. URL https://doi.org/10.3139/9783446434035.015.

[Sch21] SCHREINER, K.: Verbrennungsmotoren. In: BÖGE, A.; BÖGE, W., Hrsg., Handbuch Maschinenbau. Springer Vieweg Wiesbaden, Wiesbaden, 2021. S. 1067–1130. URL https://doi.org/10.1007/978-3-658-30273-3_56.

[Seb17] SEBULKE, J.: Antriebe. In: BÖGE, A.; BÖGE, W., Hrsg., Handbuch Maschinenbau. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017. S. 987–990. URL https://doi.org/10.1007/978-3-658-12529-5_56.

[Sep20] SEPÚLVEDA, D.; FERNÁNDEZ, R.; NAVAS, E.; ARMADA, M.; GONZÁLEZ-DE-SANTOS, P.: Robotic Aubergine Harvesting Using Dual-Arm Manipulation. In: IEEE Access, Bd. 8 (2020):S. 121889–121904. URL https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3006919.

[Ser24] SERVICES, P.: Pullerbear Tree and Invasive Weed Pullers, 2024. URL https://www.pullerbear.com/index.html, Letzter Zugriff: 13.02.2025.

[Sha15] SHANMUGAM, M.; ASOKAN, R.: A Machine-Vision-Based Real-Time Sensor System to Control Weeds in Agricultural Fields. In: Sensor Letters, Bd. 13 (2015)(6):S. 489–495. URL https://doi.org/10.1166/sl.2015.3495.

[Sim19] SIMARD, M.-J.; PAGE, E. R.; NURSE, R. E.: Can Weeds Overtopping Soybean or Adzuki Bean Be Mechanically Pulled to Reduce Their Seed Input? In: Weed Technology, Bd. 33 (2019)(1):S. 159–165. URL https://doi.org/10.1017/wet.2018.104.

[Sin18] SINGH, R.; DAS, T. K.; KAUR, R.; RAJ, R.; SHEKHAWAT, K.: Weed Management in Dryland Agriculture in India for Enhanced Resource Use Efficiency and Livelihood Security. In: Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences, Bd. 88 (2018)(4):S. 1309–1322. URL https://doi.org/10.1007/s40011-016-0795-y.

[Soo01] SOOD, K.; RAWAT, G.; KUMAR, D.; SINGH, R.: Uprooting of Lantana - A comparative study. In: , Bd. 127 (2001):S. 512–518.

[Sum87] SUMNER, H.; MONROE, G.; HELLWIG, R.: Puller for cotton plant stubble. In: Energy in Agriculture, Bd. 6 (1987)(2):S. 153–165. URL https://doi.org/10.1016/0167-5826(87)90013-1.

[Tan13] TANAKA, Y.; SAKAMA, S.; NAKANO, K.; KOSODO, H.: Comparative Study on Dynamic Characteristics of Hydraulic, Pneumatic and Electric Motors. In: , Bd. ASME/BATH 2013 Symposium on Fluid Power and Motion Control (2013):S. V001T01A037. URL https://doi.org/10.1115/FPMC2013-4459.

[The15] THE UPROOTER: Professional Pulling Tool, 2015. URL https://www.theuprooter.com/, Letzter Zugriff: 13.02.2024.

[Tia18] TIAN, G.; ZHOU, J.; GU, B.: Slipping detection and control in gripping fruits and vegetables for agricultural robot. In: International Journal of Agricultural and Biological Engineering, Bd. 11 (2018)(4):S. 29–34. URL https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181104.3279.

[Urr19] URRY, L. A.; CAIN, M. L.; WASSERMAN, S. A.; MINORSKY, P. V.; REECE, J. B.: Campbell Biologie, Kap. Pflanzenstruktur, Wachstum und Entwicklung. Pearson Studium, 2019. S. 1012 – 1040.

[Vis23] VISENTIN, F.; CREMASCO, S.; SOZZI, M.; SIGNORINI, L.; SIGNORINI, M.; MARINELLO, F.; MURADORE, R.: A mixed-autonomous robotic platform for intra-row and inter-row weed removal for precision agriculture. In: Computers and Electronics in Agriculture, Bd. 214 (2023). URL https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108270.

[WetoD] WETTERKONTOR GMBH: Monats- und Jahreswerte für Aachen, (o.D.). URL https://www.wetterkontor.de/wetter-rueckblick/monats-und-jahreswerte.asp?id=1&jr0=2024&jr1=2024&mo0=3&mo1=7.

[Wil11] WILL, D.; GEBHARDT, N.; NOLLAU, R.; HERSCHEL, D.; STRÖHL, H.: Pumpen und Motoren. In: Hydraulik: Grundlagen, Komponenten, Schaltungen. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. S. 121–176. URL https://doi.org/10.1007/978-3-642-17243-4_6.

[Xio19] XIONG, Y.; PENG, C.; GRIMSTAD, L.; FROM, P. J.; ISLER, V.: Development and field evaluation of a strawberry harvesting robot with a cable-driven gripper. In: Computers and Electronics in Agriculture, Bd. 157 (2019):S. 392–402. URL https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.009.

[Yan23] YANG, Q.; DU, X.; WANG, Z.; MENG, Z.; MA, Z.; ZHANG, Q.: A review of core agricultural robot technologies for crop productions. In: Computers and Electronics in Agriculture, Bd. 206 (2023):S. 107701. URL https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107701.

[Zha18] ZHANG, Y.; XU, Z.; PAN, L.; BAO, G.: Research on Humanoid Pneumatic Soft Robot Hand. In: 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). S. 355–360. URL https://doi.org/10.1109/ROBIO.2018.8664781.

[Zim18] ZIMDAHL, R. L.: Fundamentals of Weed Science, Kap. Methods of Weed Management. Academic Press, 2018. S. 271 – 335. URL https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811143-7.00010-X.

A Vollständige Anforderungsliste zur Entwicklung des Jätsystems

Anforderungsliste zur Entwicklung eines Apparates zum maschinellen Jäten für das Vegetationsmanagement auf Gleisanlagen				
Zweck: Unkrautbekämpfung durch drehende Rollen im Schotterkörper				
Nr.	H[1]	Qualitativ	Spezifizierung	F / W[2]
Wi[3]01	Wi	Bekämpfung von Vegetation, • die einen Schmierfilm auf den Gleisen ausbildet, • die die Sicht auf Sperr-, Rangier- und Weichensignale blockiert, • und die die Funktion von mechanisch arbeitenden Anlagen stört. [Fen19]	Bekämpfung von Pflanzenteilen unter- und oberhalb der Schienenoberkante (Schienenhöhe von 149 mm bis 172 mm [Jä21])	W

[1] Hauptmerkmale
[2] Forderung / Wunsch
[3] Wirksamkeit

Wi02	Wi	Bekämpfung von Vegetation, • die Stabilität und Elastizität gefährdet, • und die den elektrischen Widerstand (Bettungswiderstand[4]) einschränkt. [Fen19]	Bekämpfung von Wurzeln und Pflanzenteilen, die sich im Schotter befinden, laut Beobachtungen bis zu etwa 200 mm tief.	W
Wi03	Wi	Wirksam gegenüber krautiger Vegetation	Ein- und zweikeimblättrige Pflanzen, die keine verholzte Teile entwickeln. [Urr19]	W
Wi04	Wi	Wirksam gegenüber verholzenden bis verholzten Pflanzenteilen	Zweikeimblättrige Pflanzen, die in ihrem Dickenwachstum Holz entwickeln. [Urr19]	W
Wi05	Wi	Wirksamkeit unabhängig von Wetterlagen und Jahreszeiten	Die Wirksamkeit des Verfahrens kann durch Regen (vorher, während oder danach), Kälte, mangelnden Sonnenschein bei oder direkt nach der Applikation, starke Trockenheit, hohe Temperaturen während der Behandlung und starken Wind beeinträchtigt werden.	W

[4] Bettungswiderstand ist der Widerstand, mit dem die Schienen gegeneinander und gegen Erde isoliert sind. Er besitzt eine ohmsche und eine kapazitive Komponenete abhängig vom Aufbau des Gleises und kann um den Faktor 100 schwanken. Probleme ergeben sich durch Verunreinigungen des Schotterbettes. [Fen19]

Tk[5]01	Geo[6]	Flächendeckende Behandlung des Schotterbetts	• Behandlung langer Streckenabschnitte. Länge des deutschen Schienennetzes: ca. 39.000 km [AlloD] • Der Gesamtquerschnitt beträgt bei einer Schwellenlänge von 2,6 m (Betonschwelle B70) ca. 5,12 m bis 5,32 m, davon ist der Bereich A (laut Abb. 2.1) 3,2 m bis 3,6 m breit und die Schotterflanke ca. 0,7 m bis 1,02 m (insgesamt 1,72 m). Bei Holzschwellen ist die Breite in der Regel 0,2 m kurzer. [Men24]	W
Tk02	Geo	Flexibilität in der Anwendung auf enger Arbeitsbreite	Anwendbarkeit hinsichtlich der geometrischen Gegebenheiten: • Weichenbereich (Weichenzunge, Backenschiene, Radlenker etc. stellen „Hindernisse“ aus Metall dar) • Leit- und Sicherheitsanlagen • Weichenantrieb / Weichenverschluss (mechanische Anlage) • Sperr-, Rangier- und Weichensignale	W
Tk03	Geo	Behandlung von unebenen Flächen	Natürlicher Schüttwinkel der Schotterflanke ca. 33,7° bis 38,7° [Men24]	W

[5]Technische Umsetzbarkeit
[6]Geometrie

Tk04	E[7]	Geringer Energiebedarf bzw. die Eingangsleistung der Applikatoren darf die verfügbare Nennleistung der Energieversorgung nicht überschreiten	• Benzin-Generator: Max. Nennleistung ca. 8 kW [8] • Energiebedarf für die Ausbringung von Glyphosat: 5,5 kWh/km [Atm95]	W
Tk05	Pl[9]	Geringe Anwendungsfrequenz	• Vegetationsperiode von 6 Monaten (Vereinfachung) • Einsatz von Glyphosat 1-2 mal jährlich [Nol18]; 2-3 mal jährlich [Ras13]	W
Tk06	Ki[10]	Hohe Arbeitsgeschwindigkeit	• >=20 km/h (um Sperrung des Gleises zu verhindern) • bei chemischen Verfahren 40 km/h [Atm95]; 50 km/h - 60 km/h [Nol18]	W
Tk07	Geo	Anwendung in Bahnsteigbereichen	Berücksichtigung der besonderen Gegebenheiten im Bahnsteigbereich: • Bahnsteigkanten auf eine Höhe von 0,76 m über Schienenoberkante (§ 13 Abs. 1 S. 1 EBO) • Mindestabstand zum Bahnsteig von Gleismitte 1656 mm (§ 9 Abs. 1 S. 1 EBO)	W

[7] Energiebedarf
[8] Benötigte Leistung für den Einsatz der Verfahren ohne Transport, Herstellung, etc.
[9] Planung
[10] Kinematik

Tk08	Geo	Behandlung des Schotterbetts vom Fahrzeug aus möglich, ohne die Fahrzeugbegrenzungslinie zu verletzen	Fahrzeugbegrenzungslinie G1 und G2 (§ 22 Abs. 1 EBO): • Auf der Höhe von Schienenoberkante beträgt ihre Breite 2,55 m. • Auf der Höhe von 0,4 m über Schienenoberkante beträgt ihre Breite 3,2 m. • Auf der Höhe von 0,8 m über Schienenoberkante beträgt ihre Breite 4,4 m.	W
Tk09	Kr[11]	Erzeugung einer genügend großen Ausreißkraft durch die Drehung der Rollen	• Zugkraft von 138 N bis 870 N [Kem82, Sum87] • Presskraft von 2700 N bis 3600 N [Sum87] • Laut der Versuche mit dem Kleinprobenprüfstand: Zugkraft >180 N und Presskraft von 300 N bis 400 N	W
Tk10	Wi	Eingriff des Mechanismus möglichst nah am Boden	Die meisten Pflanzen lassen sich nur ausreißen, wenn sie bodennah gegriffen werden. Innerhalb der Schienen ist der Schotter ca. 300 mm von der Fahrzeugbegrenzungslinie entfernt (s. Abb. 2.6).	W

[11] Kraft

Tk11	Ki	Verstellbarer Winkel des Reifenarms	Laut der Literatur ist ein Neigungswinkel zur Vertikalen zwischen 10° [Man04] und 65° [Ram10] empfohlen, laut den Versuchen gibt es keinen Bedarf für einen Neigungswinkel.	W
Tk12	Ki	Einstellbare Drehgeschwindigkeit der Roller	Drehgeschwindigkeit von 110 U/min [Sum87] bis 450 U/min [Ram10] oder >200 U/min laut Versuche	W
Tk13	Ki	Genügend große Rollenbreite, um die Pflanzen zu erfassen.	Rollenbreite von 160 bis 200 mm [Maj08], in Versuchen bestätigt	W
Tk14	Gbr[12]	Anlage muss wassergeschützt sein und hohe Temperaturen (aufgrund Sonne) aushalten.	Möglicher Einsatz der Anlage: • Unter Regen und Hagel • 45 °C in der Sonne	F
Tk15	Geo / Tr[13]	Einhaltung der Straßentransportbegrenzungen	StVO §22: • Max. Breite: 2550 mm • Max. Höhe: 4000 mm • Unimoglänge: 4750 mm • Max. Länge LKW-Anhänger: 13250 mm	F

[12] Gebraucht
[13] Transport

Tk16	Kr	Einhaltung der maximalen Zugkraft des Fahrzeugs	50 t laut Fahrzeugschein	F
Tk17	Kr	Einhaltung der maximalen Zuladung des Fahrzeuges	Ca. 1900 kg auf Ladefläche verfügbar (zul. Gesamtmasse 6500 kg, Leermasse 4600 kg)	F
Tk18	Mon[14]	Montage von schweren und kleinen Komponenten vor dem Transport	• Schwere Montage am Einsatzort nicht möglich • Kein fester Boden im Gleis	F
Tk19	Mon / Ins[15]	Einfache Montage und Tausch von defekten Teilen (vor allem von Applikatoren)	Einfaches Ein- und Ausbauen von Applikatoren (Rollen): • Niedriges Gewicht • Wenige Komponenten • Gleiche Schrauben (möglichst)	W

[14] Montage
[15] Instandhaltung

Tk20	Geo	Berücksichtigung der Geometrie der Schienen: • Für die Konstruktion des Trägermoduls • Für die Anordnung der Applikatoren	Nach [Jä21] und § 22 Abs. 1 EBO: • Spurbreite: 1435 mm (bundes- und manche nichtbundeseigene Bahnen) • Schienenhöhe: 149 mm bis 172 mm • Schienenfußbreite: 125 mm bis 150 mm • Lateraler Abstand außerhalb der Schienen zur Fahrzeugbegrenzungslinie: ca. 700 mm • Raum der Schienenbefestigung: ca. 70 x 70 mm an jeder Seite des Schienenfußes (gemessen).	W
Tk21	Kr	Der Träger muss die statischen und dynamischen Lasten der Applikatoren im Betrieb sowie beim Transport aushalten	• Gewicht der Anlage • Vorhandene dynamische Lasten definieren	F
Tk22	Geo	Einhaltung des Arbeitsraums für das Anbauen der Applikatoren	• Keine Verstrebungen des Rahmens in Arbeitsbereich • Max. Ladefläche des Fahrzeugs: 1950 x 1890 mm	F
Tk23	Sig[16]	Einheitliche Steuergrößen für verwendete Aktuatoren	• Elektrisch (z.B. alle Ventile: 24 V DC) • Fluidisch (z.B. Aktoren arbeiten auf selbem Druckniveau)	W

[16] Signal

Tk24	Nch[17]	Berücksichtigung der Recyclingfähigkeit der Bauteile		W
Tk25	Ki	Genauigkeit in der Anwendung trotz Fahrdynamik und Trassierung ausreichend	Toleranz der Spurweite: -5 mm bis +30 mm in Hauptgleisen und -5 mm bis +35 mm in Nebengleisen [EBO]	W
Tk26	Ki	Zweirichtungsbetrieb ermöglichen	Reduzierung des Aufwands durch Wechseln der Behandlungsrichtung	W
Tk27	Nch	Mögliche Ausschaltung des Verfahrens bei Flächen ohne Vegetation	• Sparen von Ressourcen • Evtl. Schutz der Gleiskomponenten	W
Si[18]01	Si	Schutz des Betriebspersonals sowie von Dritten vor nicht stofflichen Gefahren[19]	• Körperliche mechanische Verletzung (Quetschungen, Stöße, Schläge, usw.) • Abschirmung des System zum Schutz von Risiken. Beplankung muss entfernbar sein und darf Befestigungen nicht stören.	F

[17] Nachhaltigkeit
[18] Sicherheit
[19] Lärmschutz in Si02 berücksichtigt

Si02	Si	Schutz der Mitarbeitenden vor Schallemissionen	Auslösewert des Tages-Lärmexpositionspegels gemäß § 6 LärmVibrationsArbSchV: • Untere Grenze 80 dB(A) • Obere Grenze 85 dB(A) • Ab 85 dB(A) ist mit Beeinträchtigung des Hörvermögens zu rechnen	F
Si03	Si	Keine Gefährdung der Stabilität[20] und Elastizität des Schotterbettes durch das Verfahren	Bau von Hohlräumen beeinflusst die Position des Schotters	F
Si04	Si	Keine Schädigung der Schienen	• Kompatibilität des Verfahrens mit Metall • Potenzielle Gefahr: Rissbildung	F
Si05	Si	Keine Schädigung der Schwellen	• Kompatibilität des Verfahrens mit Holz, Beton, Kunststoff und Stahlschwellen • Potenzielle Gefahr: Rissbildung	F
Si06	Si	Keine Schädigung der Weichen und Kreuzungen	Mechanische Komponenten der Weiche (wie Weichenriegel und Stellstange) sind bei Blockade oder Beschädigung in ihrer Funktion gefährdet und müssen deshalb freigängig sein.	F

[20] Stabilität definiert sich über Verschmutzungsgrad des Schotters [Lic10] und Position der Schienen (Längshöhe, Hebung, Gegenseitige Höhenlage, Richtung, Verbindung, Beistellzeit) [Richtlinie 824:3010]

Si07	Si	Keine Schädigung der weiteren baulichen Komponenten[21]	Potenzielle Rissbildungsgefahr in: • Elastischer Zwischenlage • Schwellendübel: PA / PE (Thermoplast) • Schienenbefestigung (Federring, Schraube, Spannklemme, Klemmplatte und Winkelführungsplatte) • Isolierklebestoß (Kunstharzmörtel) • Isolierstoß (Stahl/Polymerkomposit) • Kabelkanäle (Beton/Metall/Kunststoff)	F
Si08	Si	Keine Schädigung der Signal-, Sicherungs- und Telekomunikationstechnik	Potenzielle Gefahren: Rissbildung und Fremdpartikel. Laut entsprechenden Datenblättern verweisen die Komponenten einen eine Schutzart IP 65 (staubdicht und gegen Strahlwasser geschützt) oder höher.	F
Si09	Si	Keine Schädigung von Komponenten, die zu einem Dritten gehören. (§ 823 Abs. 1 BGB)	Beispielsweise Telekommunikation, Kabelkreuzungen, Abflüsse, Rohre, sonstige Bauteile usw.	F
Si10	Si	Einhalten der aktuellen Brandschutzbestimmungen	Laut entsprechenden Produktnormen	F
Si11	Si	Erdung der Bauteile	Der Rahmen muss komplett geerdet sein.	F

[21] Schienen, Schwellen, Weichen und Kreuzungen in Si04 bis Si06 berücksichtigt

Si12	Si	Komponenten, die außerhalb der Fahrzeugbegrenzungslinie arbeiten, können in den Bereich innerhalb der Fahrzeugbegrenzungslinie zurückgebracht werden.	• Ausweichung von Eisenbahnkomponenten im Betrieb • Ermöglichung des Transports	F
Si13	Si	Das System enthält ein sicheres Abschalten oder eine Notfunktion im Fall von Gefahren.	Anbau eines Notschalters an der Steuerung	F
Si14	Si	Manuelle Ansteuerung der einzelnen Applikatoren	Aus Sicherheitsgründen müssen Einzelapplikatoren manuell ausgelöst werden können.	F
Si15	Si	Erfüllung der allgemeinen Vorgaben zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV)	Vermeidung elektromagnetischer Störungen hinsichtlich der EMV: • Störstromgrenzwerte sind abhängig vom Frequenzband • Frequenzen dürfen sich nicht überschneiden, um Beeinflussung zu vermeiden.	F
Si16	Si / Tr[22]	Befestigung und Bedeckung der Anlage für den Transport	Eignung für Fahrgeschwindigkeiten bis zu 50 km/h	F
Si17	Si	Schutz der Maschinenkomponenten vor Pflanzen und Stößen	Insbesonders Motor, Kabel und Welle	F

[22] Transport

Um[23]-01	Nch	Reduzierung der Emissionen ins Grundwasser und Oberflächengewässer (im Vergleich zur chemischen Vegetationskontrolle)	Bei nichtchemischen Verfahren besteht eine mögliche indirekte Freisetzung oder Mobilisierung von Schadstoffen, Pflanzenteile oder Nährstoffen aus dem Gleisbett.	F
Um02	Nch	Reduzierung der Emissionen in den Boden[24] (im Vergleich zur chemischen Vegetationskontrolle)	Besondere Gefahren für den Boden: • Stoffeintrag: Betriebsstoffe oder Verfahrensreststoffe • Remobilisierung von Schadstoffen • Eintrag von Nährstoffen	F
Um03	Nch	Minimierung der Emissionen in die Luft	• Besonders zu berücksichtigende Schadstoffe bei der Mobilisierung im Boden und Schotter (PAK, Pflanzenschutzmittel, Kohlenwasserstoffe) • Keine Berücksichtigung des Fahrzeugantriebes in dieser Anforderung	F
Um04	Nch	Minimierung des Risikopotentials für die im Gleis lebende Fauna gemäß § 44 Abs.1 S.1 Nr.1 bis 3 BNatSchG	Besonders geschützte und bestimmte andere Tierarten (z.B. Zauneidechse, Haselmaus, Kröten)	F

[23] Umwelt
[24] Untergrund

B Daten zur Untersuchung der langfristigen Wirksamkeit

B.1 Versuchsflächen und -Pflanzen zur Ermittlung der langfristigen Wirksamkeit der Verfahren im Gleisbereich

Versuchsstrecke Linnich				
SN[1]	Bereich	Rechts / Links	Verfahren	Pflanzenart
264	A.2	Rechts	Ausreißen	Ackerschachtelhalm
264	B	Rechts	Ausreißen	Ackerschachtelhalm
264	A.1	Links	Ausreißen	Ackerschachtelhalm
264	A.2	Links	Abschneiden	Ackerschachtelhalm
264	B	Links	Abschneiden	Ackerschachtelhalm
265	A.1	Links	Kontrolle	Ackerschachtelhalm
265	A.1	Rechts	Abschneiden	Ackerschachtelhalm
121	A.1	Rechts	Kontrolle	Ruprechtskraut
121	A.1	Links	Ausreißen	Ruprechtskraut
122	A.1	Rechts	Abschneiden	Ruprechtskraut
122	A.2	Rechts	Abschneiden + Liegen lassen	Ruprechtskraut
122	A.1	Links	Kontrolle	Ruprechtskraut
123	A.2	Rechts	Ausreißen	Ruprechtskraut
123	A.2	Links	Abschneiden	Ruprechtskraut
392	A.1	Links	Ausreißen	Brombeeren
393	A.1	Rechts	Abschneiden	Brombeeren
393	A.1	Links	Abschneiden + Liegen lassen	Brombeeren
394	A.1	Rechts	Kontrolle	Brombeeren

[1] Schwellennummer

SN	Bereich	Rechts / Links	Verfahren	Pflanzenart
181	B	Links	Abschneiden	Birken
182	B	Rechts	Kontrolle	Birken
296	A.1	Links	Ausreißen	Aufrechte Trespe
297	A.1	Rechts	Abschneiden	Aufrechte Trespe
297	A.1	Links	Kontrolle	Aufrechte Trespe
299	A.1	Rechts	Abschneiden + Liegen lassen	Aufrechte Trespe
Versuchsstrecke Puffendorf				
108	A.1	Rechts	Abschneiden + Liegen lassen	Aufrechte Trespe
108	A.2	Rechts	Abschneiden + Liegen lassen	Aufrechte Trespe
108	A.1	Links	Ausreißen	Aufrechte Trespe
108	A.2	Links	Ausreißen	Aufrechte Trespe
109	A.1	Rechts	Abschneiden	Aufrechte Trespe
109	A.2	Rechts	Abschneiden	Aufrechte Trespe
109	A.1	Links	Kontrolle	Aufrechte Trespe
109	A.2	Links	Kontrolle	Aufrechte Trespe
152	A.1	Links	Abschneiden + Liegen lassen	Aufrechte Trespe
152	A.2	Links	Abschneiden + Liegen lassen	Aufrechte Trespe
153	A.1	Rechts	Abschneiden + Liegen lassen	Aufrechte Trespe
153	A.2	Rechts	Abschneiden + Liegen lassen	Aufrechte Trespe
153	A.1	Links	Ausreißen	Aufrechte Trespe
153	A.2	Links	Ausreißen	Aufrechte Trespe
154	A.1	Rechts	Ausreißen	Aufrechte Trespe
154	A.2	Rechts	Ausreißen	Aufrechte Trespe

SN	Bereich	Rechts / Links	Verfahren	Pflanzenart
154	A.1	Links	Abschneiden	Aufrechte Trespe
154	A.2	Links	Abschneiden	Aufrechte Trespe
155	A.1	Rechts	Abschneiden	Aufrechte Trespe
155	A.2	Rechts	Abschneiden	Aufrechte Trespe
155	A.1	Links	Kontrolle	Aufrechte Trespe
155	A.2	Links	Kontrolle	Aufrechte Trespe
111	B	Rechts	Abschneiden + Liegen lassen	Ackerschachtelhalm
111	B	Links	Ausreißen	Ackerschachtelhalm
112	B	Rechts	Abschneiden	Ackerschachtelhalm
112	B	Links	Kontrolle	Ackerschachtelhalm
113	B	Rechts	Abschneiden + Liegen lassen	Ackerschachtelhalm
113	B	Links	Ausreißen	Ackerschachtelhalm
114	B	Rechts	Abschneiden	Ackerschachtelhalm
114	B	Links	Kontrolle	Ackerschachtelhalm
152	B	Links	Abschneiden + Liegen lassen	Ackerschachtelhalm
153	B	Rechts	Abschneiden + Liegen lassen	Ackerschachtelhalm
153	B	Links	Ausreißen	Ackerschachtelhalm
154	B	Rechts	Ausreißen	Ackerschachtelhalm
154	B	Links	Abschneiden	Ackerschachtelhalm
155	B	Rechts	Abschneiden	Ackerschachtelhalm
155	B	Links	Kontrolle	Ackerschachtelhalm
Versuchsstrecke Birgden				
15	A.1	Links	Abschneiden + Liegen lassen	Berg-Ahorn und Brombeeren
16	A.1	Rechts	Abschneiden + Liegen lassen	Berg-Ahorn und Brombeeren

SN	Bereich	Rechts / Links	Verfahren	Pflanzenart
16	A.1	Links	Abschneiden + Liegen lassen	Berg-Ahorn
17	A.1	Rechts	Ausreißen	Gemeine Hainbuche, Brombeere und Berg-Ahorn
17	B	Rechts	Ausreißen	Berg-Ahorn
17	A.1	Links	Ausreißen	Berg-Ahorn
17	B	Links	Ausreißen	Berg-Ahorn
18	A.1	Rechts	Ausreißen	Berg-Ahorn und Brombeeren
18	B	Rechts	Ausreißen	Berg-Ahorn
18	A.1	Links	Abschneiden	Berg-Ahorn und Brombeeren
18	B	Links	Abschneiden	Berg-Ahorn
19	A.1	Rechts	Abschneiden	Berg-Ahorn und Hainbuche
19	B	Rechts	Abschneiden	Berg-Ahorn
19	A.1	Links	Abschneiden	Berg-Ahorn
19	B	Links	Abschneiden	Berg-Ahorn
13	A.1	Links	Kontrolle	Berg-Ahorn
14	A.1	Rechts	Kontrolle	Berg-Ahorn
14	A.1	Links	Kontrolle	Berg-Ahorn und Gemeine Hainbuche
59	A.1	Links	Ausreißen	Gemeine Hainbuche
59	B	Links	Ausreißen	Gemeine Hainbuche und Brombeere
60	A.1	Rechts	Ausreißen	Gemeine Hainbuche und Berg-Ahorn
60	B	Rechts	Ausreißen	Gemeine Hainbuche
60	A.1	Links	Abschneiden	Gemeine Hainbuche
60	B	Links	Abschneiden	Gemeine Hainbuche
61	A.1	Rechts	Abschneiden	Gemeine Hainbuche
61	B	Rechts	Abschneiden	Hainbuche und Brombeere
63	A.1	Links	Abschneiden + Liegen lassen	Gemeine Hainbuche

SN	Bereich	Rechts / Links	Verfahren	Pflanzenart
64	A.1	Rechts	Abschneiden + Liegen lassen	Gemeine Hainbuche
64	A.1	Links	Abschneiden + Liegen lassen	Gemeine Hainbuche
57	A.1	Rechts	Kontrolle	Gemeine Hainbuche
57	B	Rechts	Kontrolle	Gemeine Hainbuche
58	A.1	Rechts	Kontrolle	Gemeine Hainbuche
58	B	Rechts	Kontrolle	Gemeine Hainbuche
61	A.1	Links	Kontrolle	Gemeine Hainbuche
61	B	Links	Kontrolle	Hainbuche und Brombeere
74	A.1	Rechts	Abschneiden + Liegen lassen	Brombeere, Berg-Ahorn und Hainbuche
74	B	Rechts	Abschneiden + Liegen lassen	Brombeere
74	A.1	Links	Abschneiden + Liegen lassen	Brombeere und Berg-Ahorn
74	B	Links	Abschneiden + Liegen lassen	Brombeere
75	A.1	Rechts	Abschneiden	Brombeere und Berg-Ahorn
75	B	Rechts	Abschneiden	Brombeere
75	A.1	Links	Abschneiden	Brombeere
75	B	Links	Abschneiden	Brombeere
76	A.1	Rechts	Abschneiden	Brombeere, Hainbuche und Berg-Ahorn
76	B	Rechts	Abschneiden	Brombeere
76	A.1	Links	Kontrolle	Brombeere und Berg-Ahorn
76	B	Links	Kontrolle	Brombeere
77	A.1	Rechts	Kontrolle	Brombeere und Berg-Ahorn
77	B	Rechts	Kontrolle	Brombeere
77	A.1	Links	Kontrolle	Brombeere und Berg-Ahorn
77	B	Links	Kontrolle	Brombeere und Berg-Ahorn

B.2 Graphische Darstellung der Wirksamkeit der Verfahren

B.2.1 Abbildung der Pflanzenhöhe unter Wirkung der Verfahren

Durchschnittliche Pflanzenhöhe der drei Versuchsstrecken in Zentimeter

Die vertikalen Linien in den Abbildungen zeigen den Zeitpunkt der durchgeführten Behandlungen an.

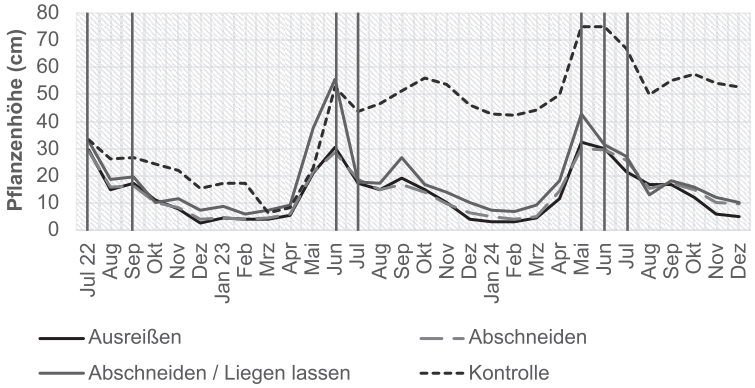


Abb. B.1: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) in Linnich*

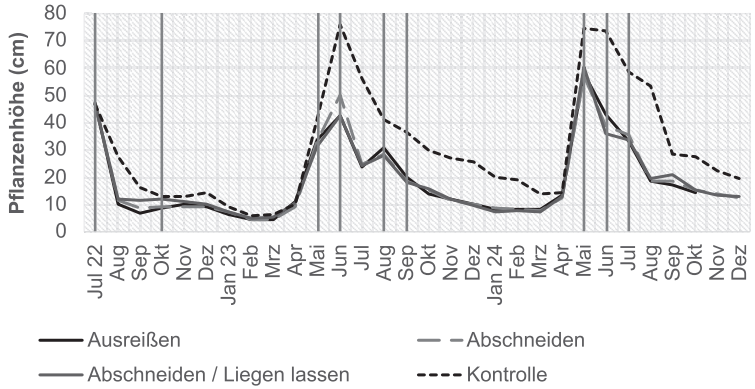


Abb. B.2: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) in Puffendorf*

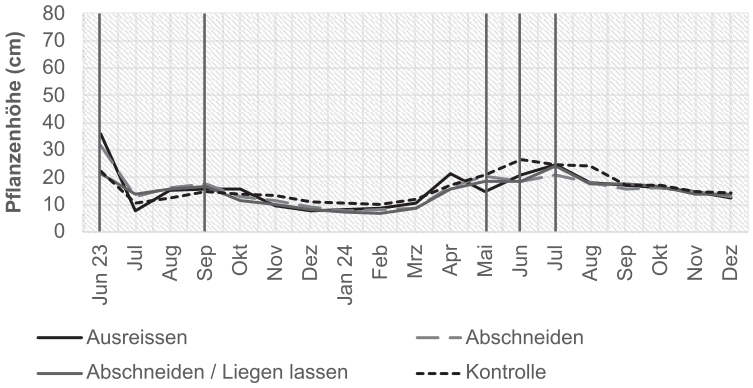


Abb. B.3: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) in Birgden*

Durchschnittliche Pflanzenhöhe der drei Versuchsstrecken, normiert auf den ersten Monat

Die vertikalen Linien in den Abbildungen zeigen den Zeitpunkt der durchgeführten Behandlungen an.

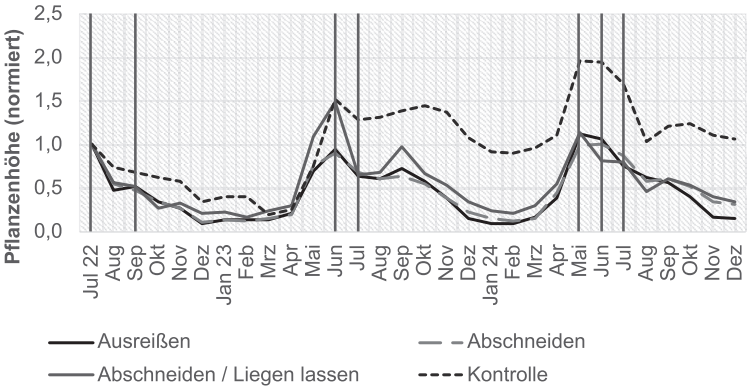


Abb. B.4: *Durchschnittlichen Pflanzenhöhe in Linnich (normiert)*

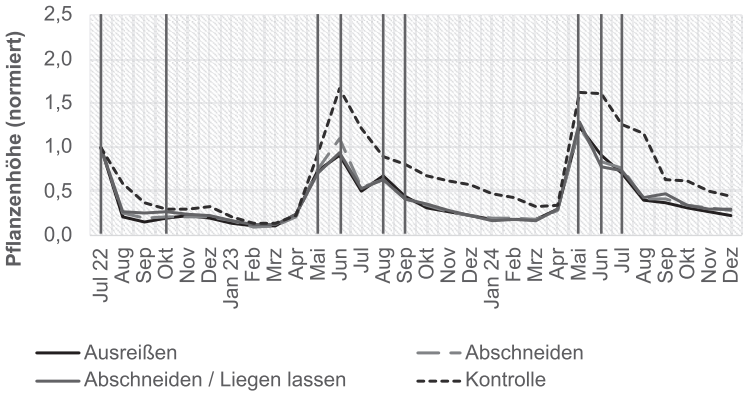


Abb. B.5: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe in Puffendorf (normiert)*

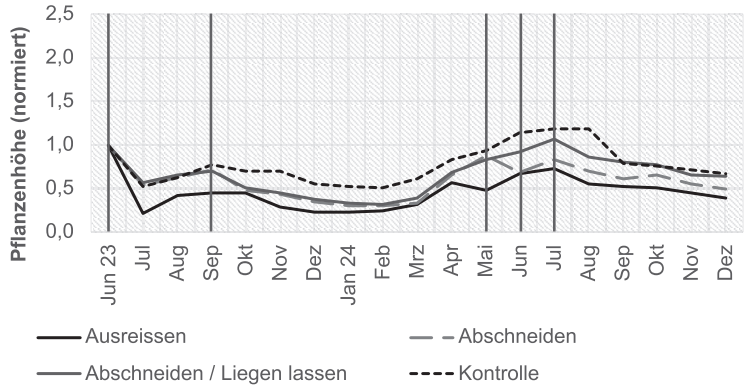


Abb. B.6: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe in Birgden (normiert)*

B.2.2 Abbildung des entnommenen Pflanzengewichts unter Wirkung der Verfahren

Durchschnittliche Gewichtsentnahme in Gramm

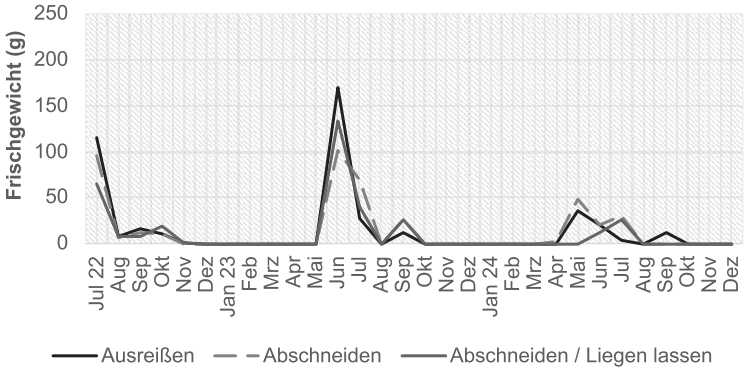


Abb. B.7: *Durchschnittliches Frischgewicht (g) der behandelten Pflanzen in Linnich*

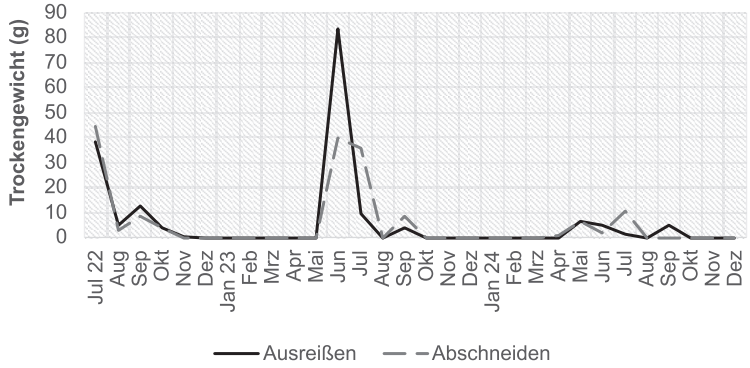


Abb. B.8: *Durchschnittliches Trockengewicht (g) der behandelten Pflanzen in Linnich*

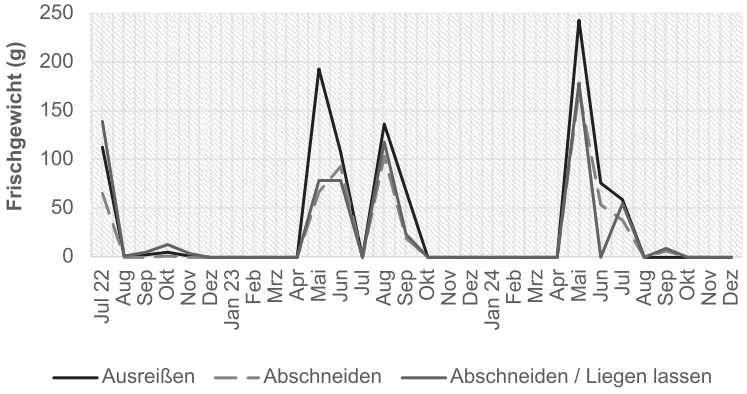


Abb. B.9: *Durchschnittliches Frischgewicht (g) der behandelten Pflanzen in Puffendorf*

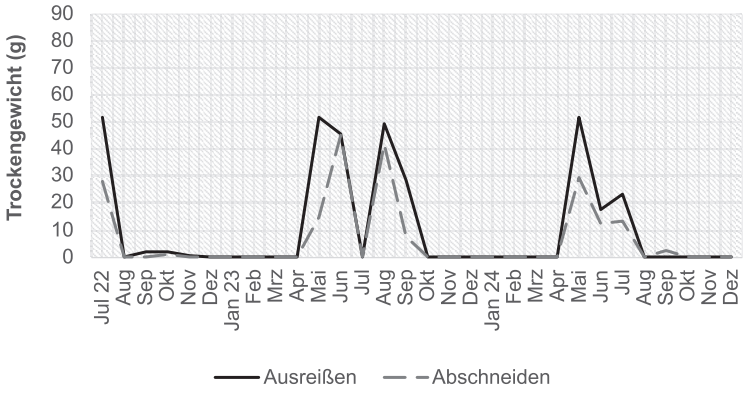


Abb. B.10: *Durchschnittliches Trockengewicht (g) der behandelten Pflanzen in Puffendorf*

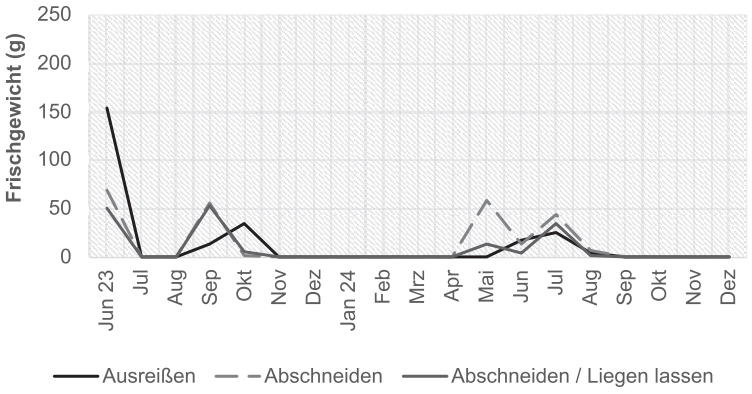


Abb. B.11: *Durchschnittliches Frischgewicht (g) der behandelten Pflanzen in Birgden*

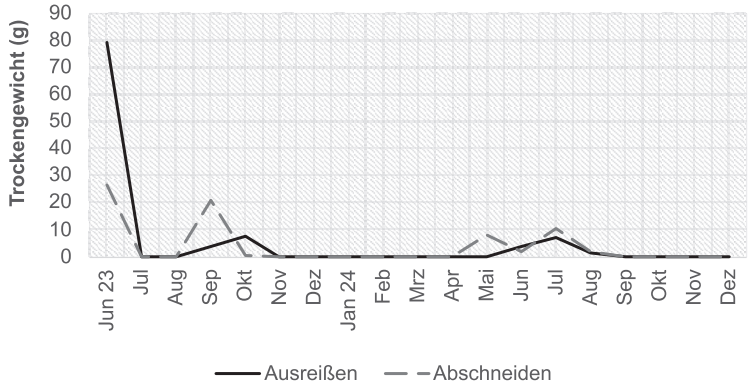


Abb. B.12: *Durchschnittliches Trockengewicht (g) der behandelten Pflanzen in Birgden*

Durchschnittliche Gewichtsentnahme, normiert auf den ersten Monat

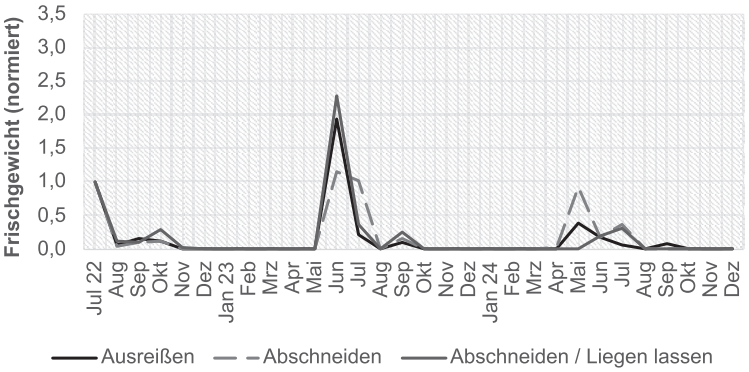


Abb. B.13: *Durchschnittliches Frischgewicht der behandelten Pflanzen in Linnich (normiert)*

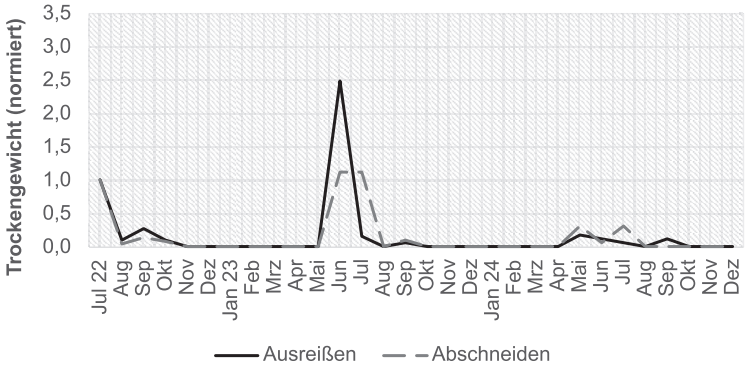


Abb. B.14: *Durchschnittliches Trockengewicht der behandelten Pflanzen in Linnich (normiert)*

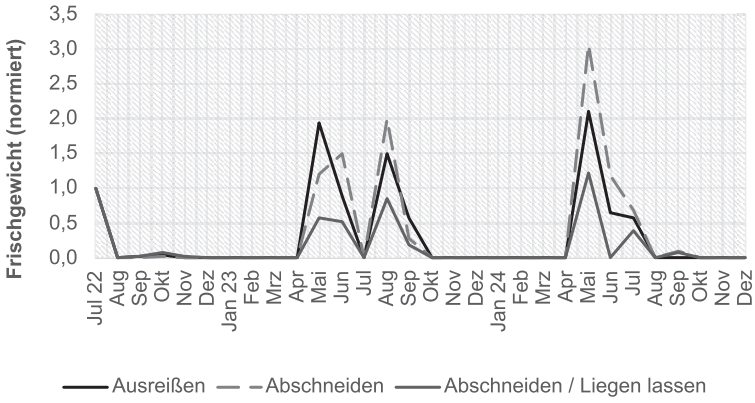


Abb. B.15: *Durchschnittliches Frischgewicht der behandelten Pflanzen in Puffendorf (normiert)*

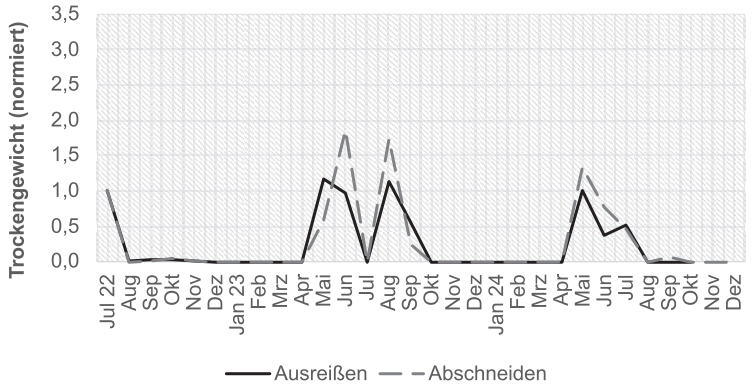


Abb. B.16: *Durchschnittliches Trockengewicht der behandelten Pflanzen in Puffendorf (normiert)*

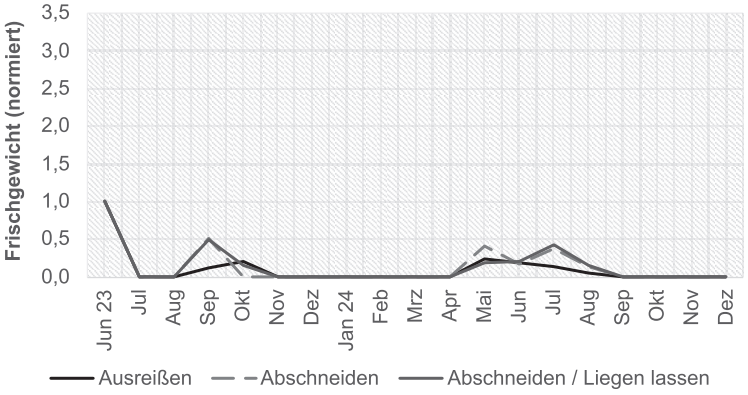


Abb. B.17: *Durchschnittliches Frischgewicht der behandelten Pflanzen in Birgden (normiert)*

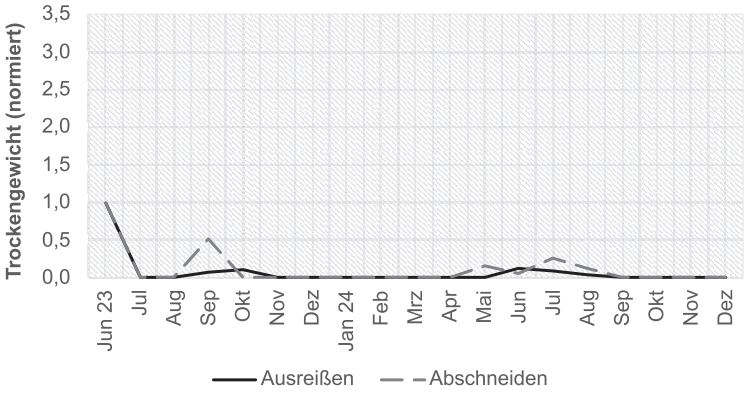


Abb. B.18: *Durchschnittliches Trockengewicht der behandelten Pflanzen in Birgden (normiert)*

B.3 Graphische Darstellung der Wachstumsentwicklung der Einzelpflanzenarten

B.3.1 Abbildung der Wuchshöhe der Einzelpflanzenarten

Durchschnittliche Höhe der Einzelpflanzenarten in Zentimeter

Die vertikalen Linien in den Abbildungen zeigen den Zeitpunkt der durchgeführten Behandlungen an.

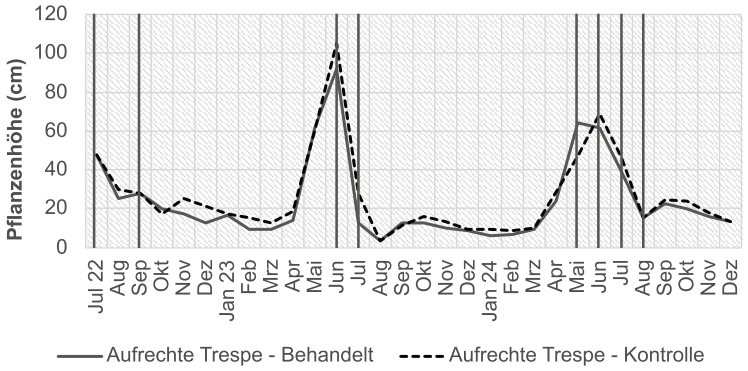


Abb. B.19: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) der Aufrechte Trespe in Linnich*

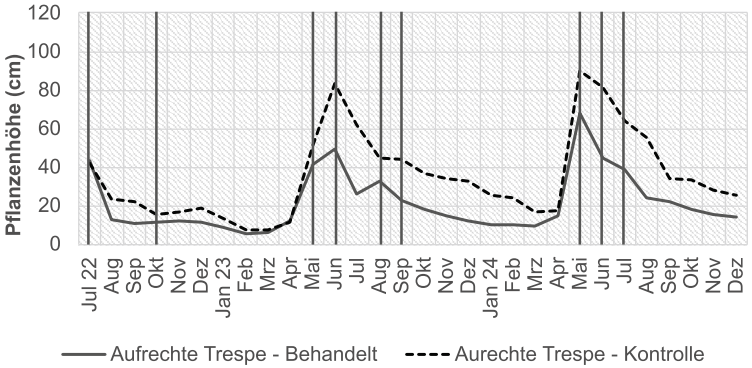


Abb. B.20: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) der Aufrechte Trespe in Puffendorf*

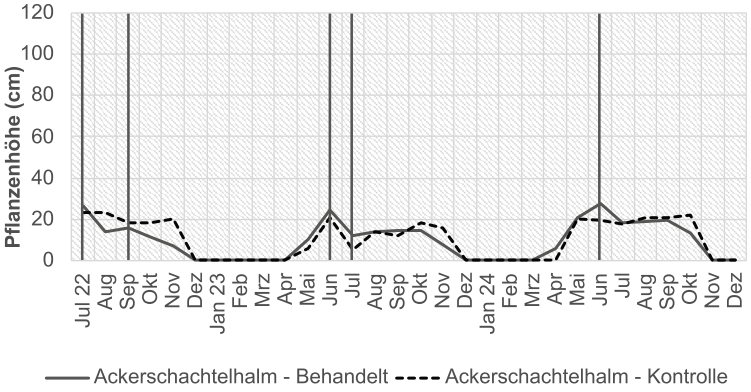


Abb. B.21: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) des Ackerschachtelhalms in Linnich*

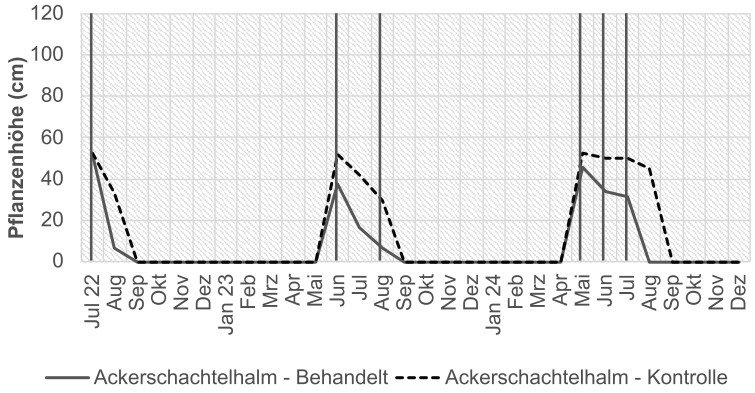


Abb. B.22: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) des Ackerschachtelhalms in Puffendorf*

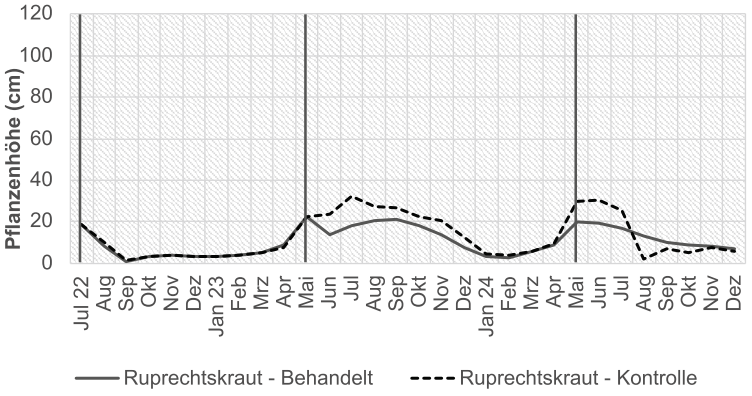


Abb. B.23: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) des Ruprechtskrauts in Linnich*

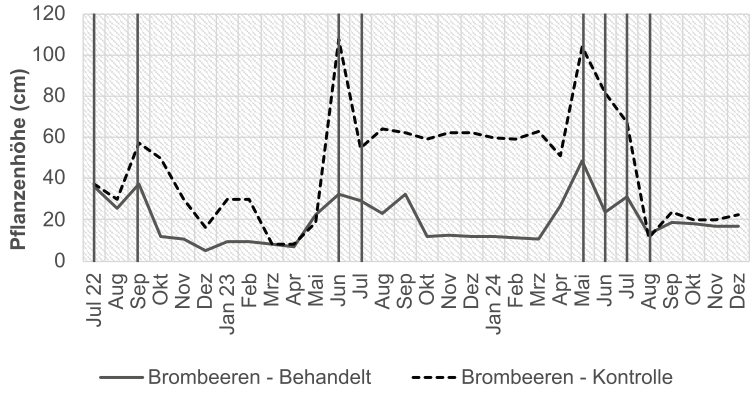


Abb. B.24: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) der Brombeere in Linnich*

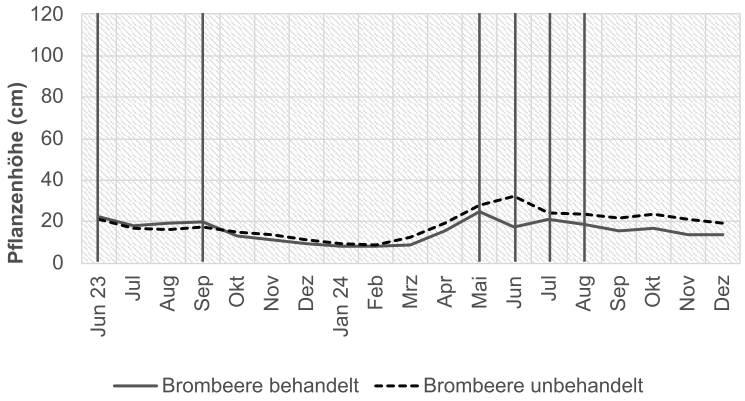


Abb. B.25: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) der Brombeere in Birgden*

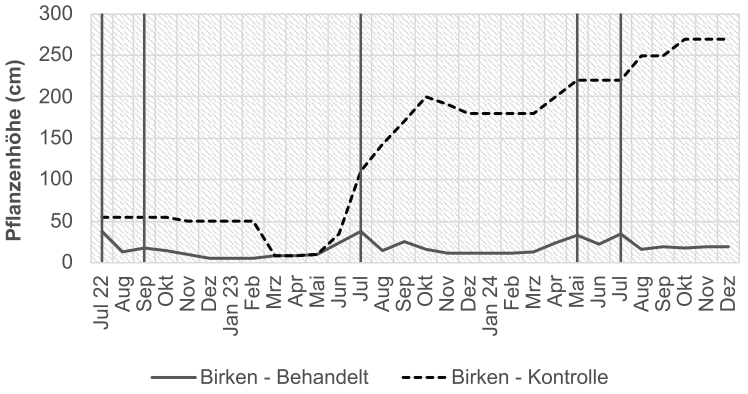


Abb. B.26: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) des Birkens in Linnich*

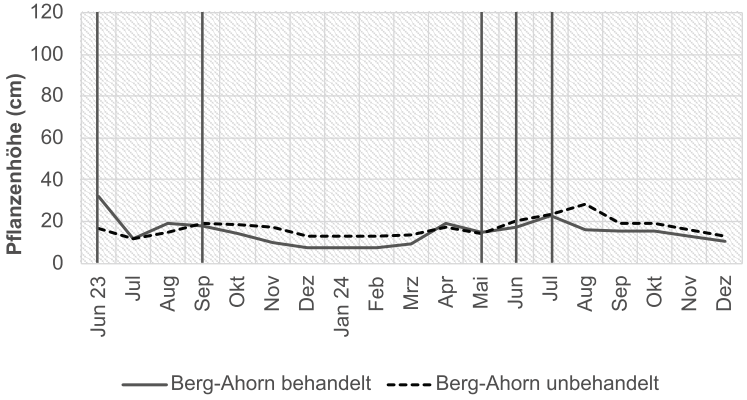


Abb. B.27: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) des Berg-Ahorns in Birgden*

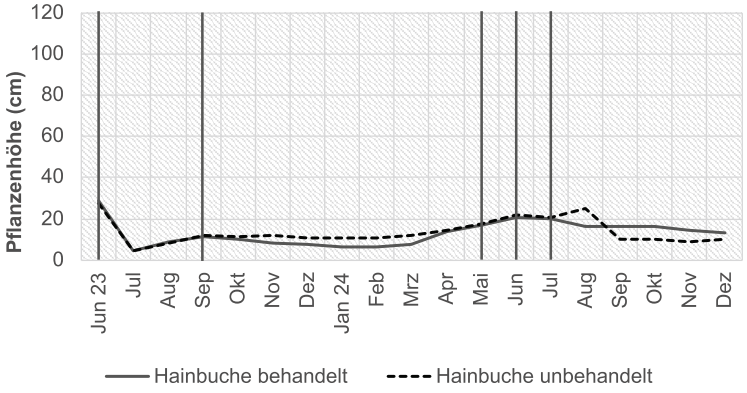


Abb. B.28: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe (cm) der Gemeinen Hainbuche in Birgden*

Durchschnittliche Höhe der Einzelpflanzenarten, normiert auf den ersten Monat

Die vertikalen Linien in den Abbildungen zeigen den Zeitpunkt der durchgeführten Behandlungen an.

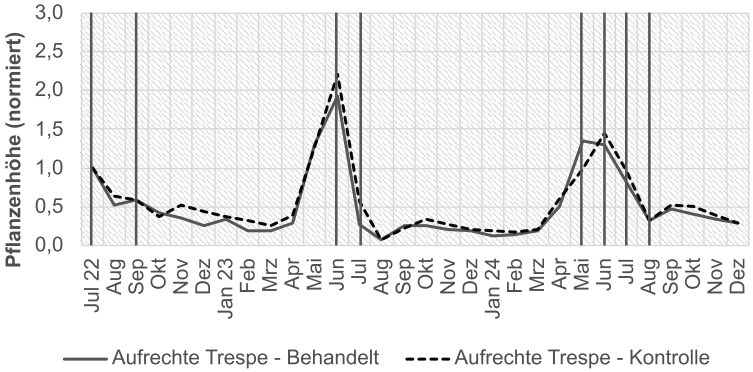


Abb. B.29: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe der Aufrechte Trespe in Linnich (normiert)*

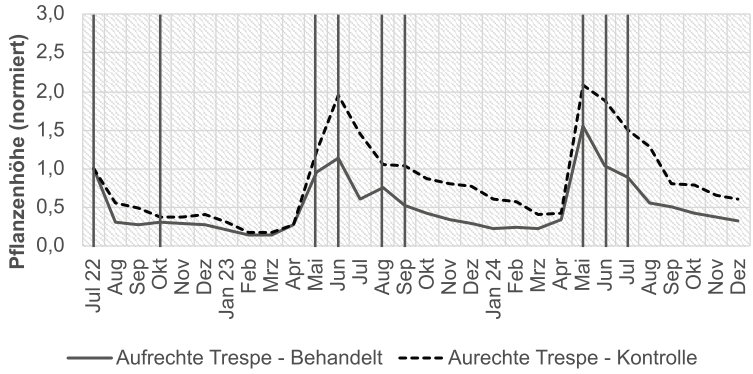


Abb. B.30: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe der Aufrechte Trespe in Puffendorf (normiert)*

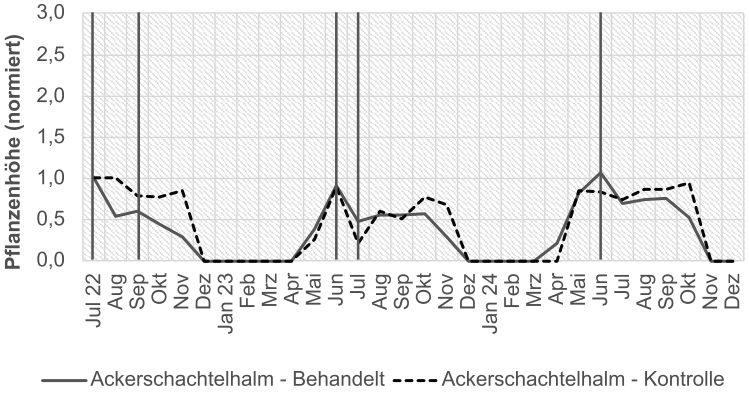


Abb. B.31: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe des Ackerschachtelhalms in Linnich (normiert)*

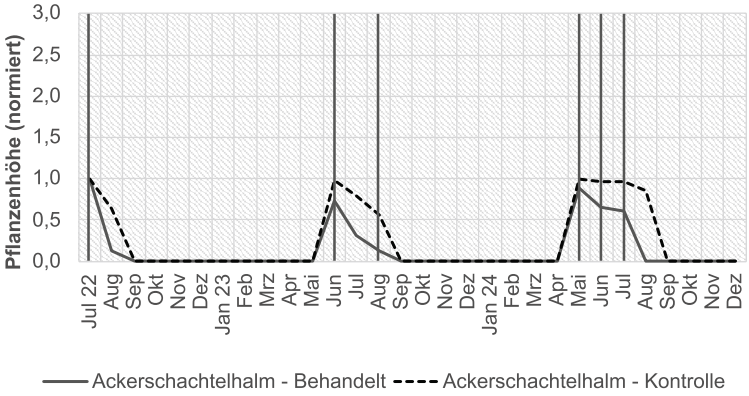


Abb. B.32: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe des Ackerschachtelhalms in Puffendorf (normiert)*

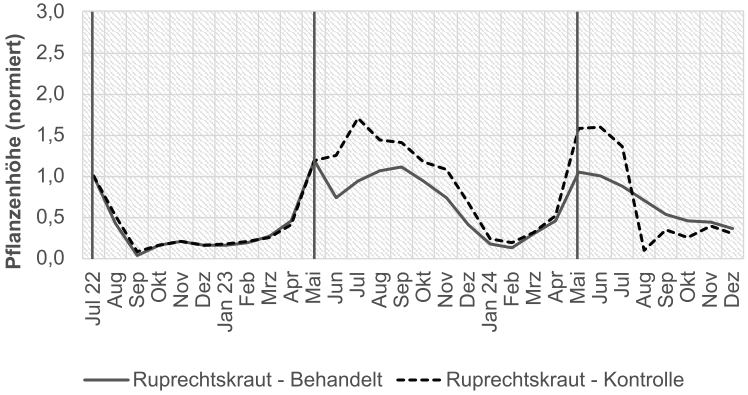


Abb. B.33: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe des Ruprechtskrauts in Linnich (normiert)*

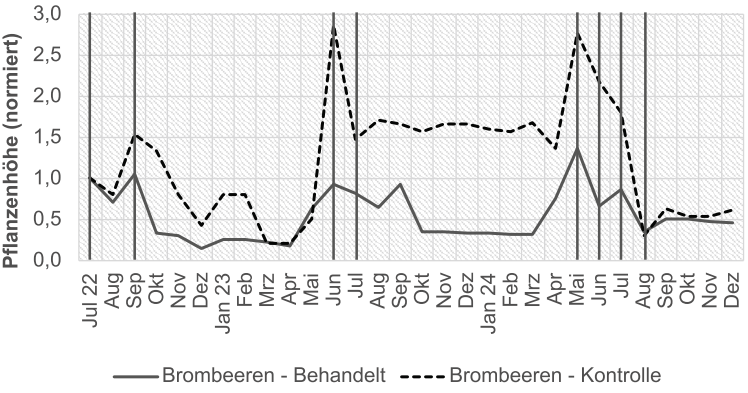


Abb. B.34: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe der Brombeere in Linnich (normiert)*

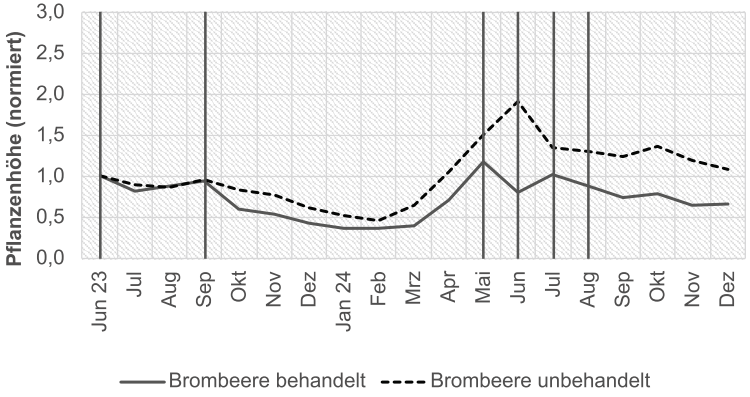


Abb. B.35: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe der Brombeere in Birgden (normiert)*

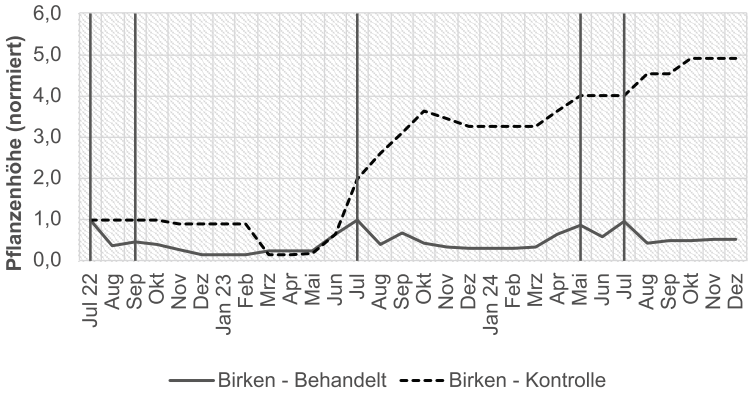


Abb. B.36: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe des Birkens in Linnich (normiert)*

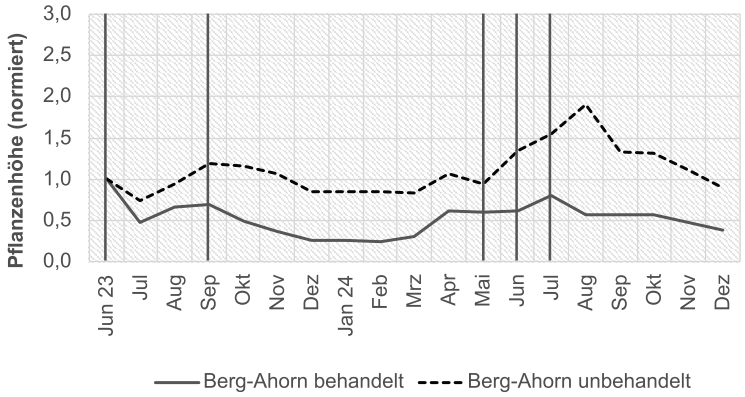


Abb. B.37: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe des Berg-Ahorns in Birgden (normiert)*

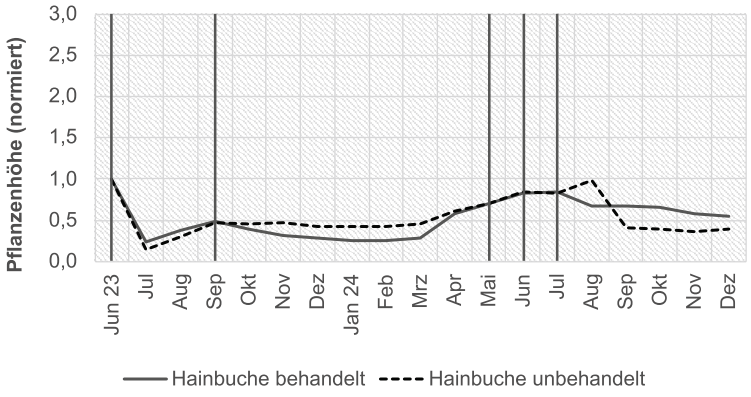


Abb. B.38: *Durchschnittliche Pflanzenhöhe der Gemeinen Hainbuche in Birgden (normiert)*

B.3.2 Abbildung der Gewichtsentnahme der Einzelpflanzenarten

Durchschnittliche Gewichtsentnahme der Einzelpflanzenarten in Gramm

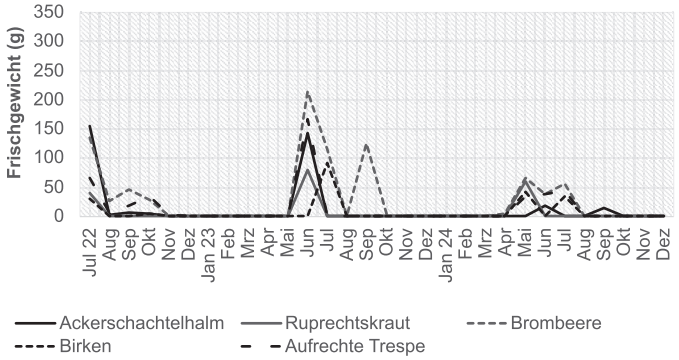


Abb. B.39: *Durchschnittliches Frischgewicht (g) von Ackerschachtelhalm, Ruprechtskraut, Brombeere, Birken und Aufrechter Trespe in Linnich*

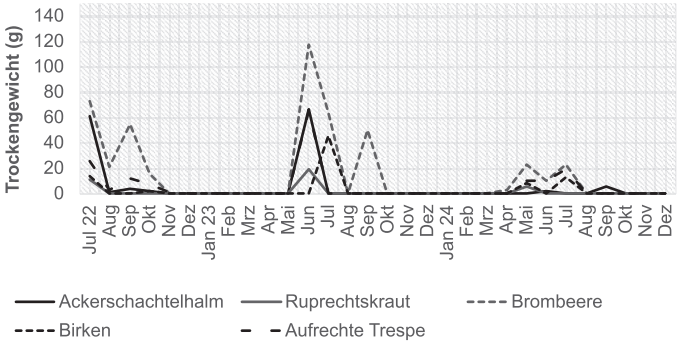


Abb. B.40: *Durchschnittliches Trockengewicht (g) von Ackerschachtelhalm, Ruprechtskraut, Brombeere, Birken und Aufrechter Trespe in Linnich*

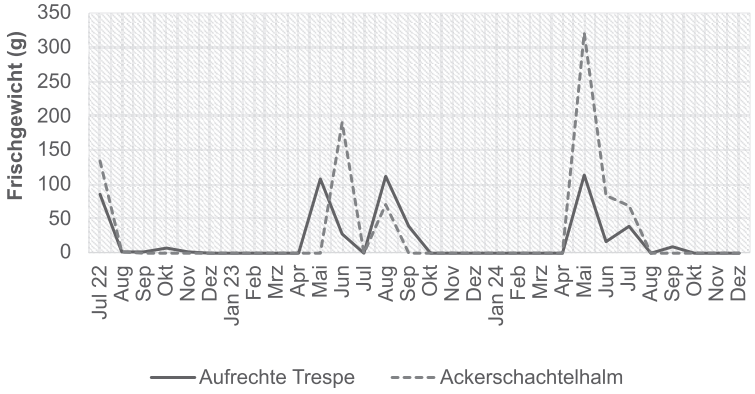


Abb. B.41: *Durchschnittliches Frischgewicht (g) der Aufrechten Trespe und des Ackerschachtelhalms in Puffendorf*

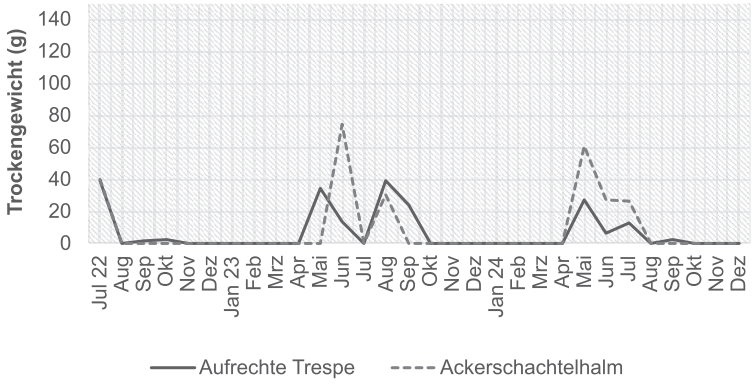


Abb. B.42: *Durchschnittliches Trockengewicht (g) der Aufrechten Trespe und des Ackerschachtelhalms in Puffendorf*

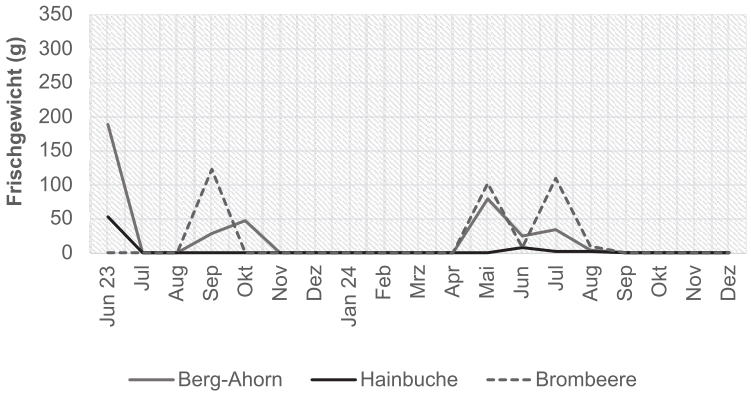


Abb. B.43: *Durchschnittliches Frischgewicht (g) von Berg-Ahorn, Gemeiner Hainbuche und Brombeere in Birgden*

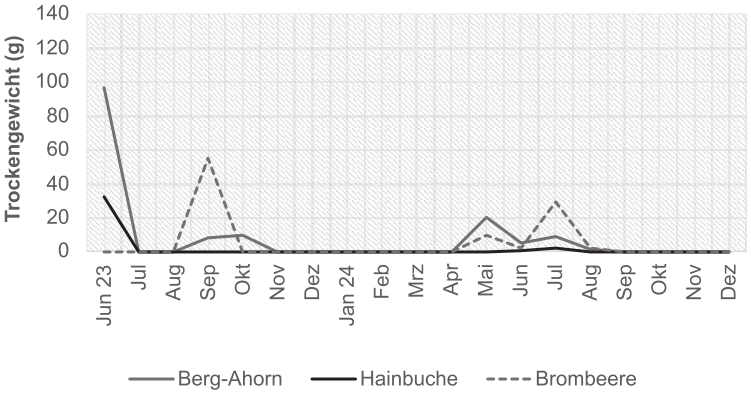


Abb. B.44: *Durchschnittliches Trockengewicht (g) von Berg-Ahorn, Gemeiner Hainbuche und Brombeere in Birgden*

Durchschnittliche Gewichtsentnahme der Einzelpflanzenarten, normiert auf den ersten Monat

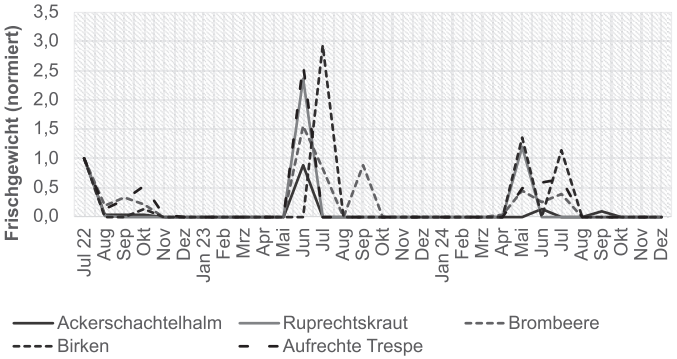


Abb. B.45: *Durchschnittliches Frischgewicht von Ackerschachtelhalm, Ruprechtskraut, Brombeere, Birken und Aufrechter Trespe in Linnich (normiert)*

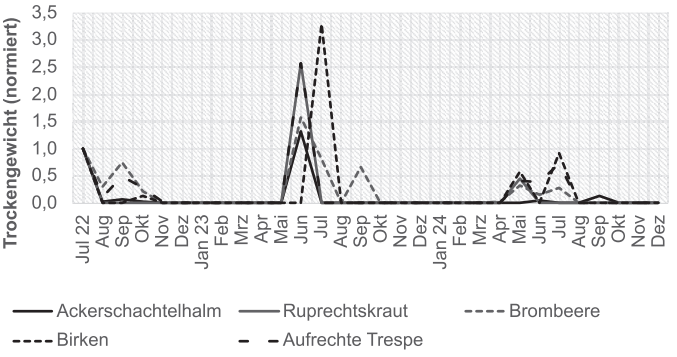


Abb. B.46: *Durchschnittliches Trockengewicht von Ackerschachtelhalm, Ruprechtskraut, Brombeere, Birken und Aufrechter Trespe in Linnich (normiert)*

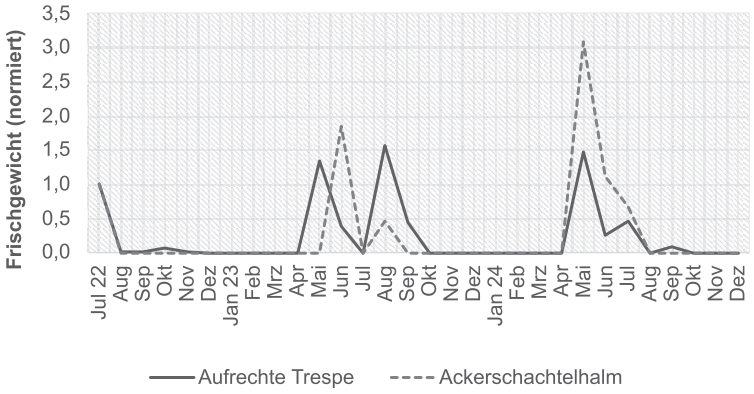


Abb. B.47: *Durchschnittliches Frischgewicht der Aufrechten Trespe und des Ackerschachtelhalms in Puffendorf (normiert)*

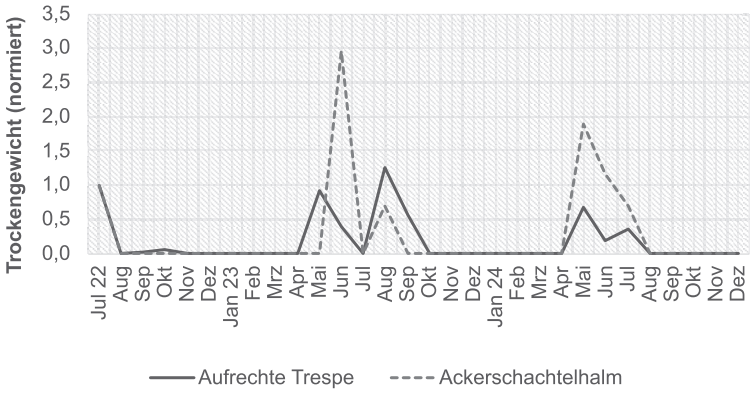


Abb. B.48: *Durchschnittliches Trockengewicht der Aufrechten Trespe und des Ackerschachtelhalms in Puffendorf (normiert)*

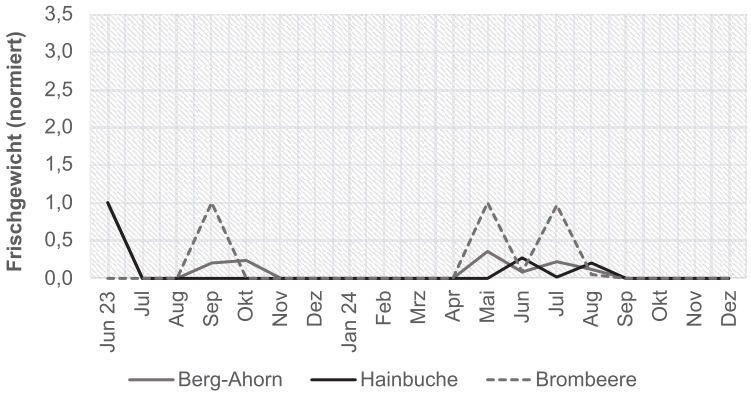


Abb. B.49: *Durchschnittliches Frischgewicht von Berg-Ahorn, Gemeiner Hainbuche und Brombeere in Birgden (normiert)*

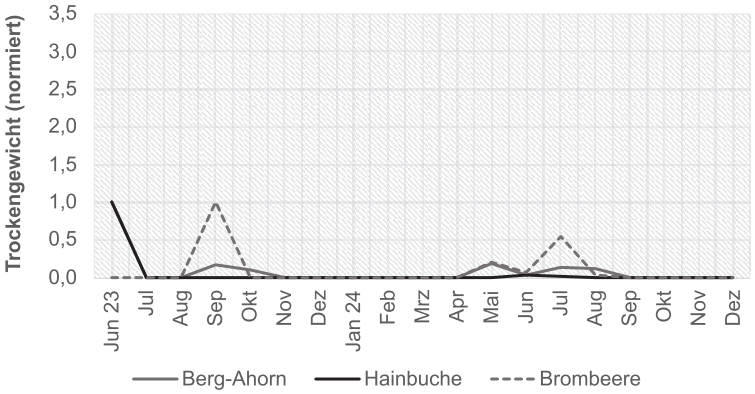


Abb. B.50: *Durchschnittliches Trockengewicht von Berg-Ahorn, Gemeiner Hainbuche und Brombeere in Birgden (normiert)*

C Eigene Veröffentlichungen

[1] Archut, C.; Jendrny, N.; Skiba, M.; Soemantri, A.; Pfaff, R.; Schindler, C.: Development of a mechanical weeding system for railway tracks. In: Journal Results in Engineering, 28 (2025) 107688. 9 Seiten. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107688

[2] Jendrny, N.; Archut, C.; Schulte-Marxloh, A.; Eberius, M.; Conrath, U.; Schindler, C.: Rating-Based Design of a Vehicle for Herbicide-Free Vegetation Control on Rails. In: Pombo, J. (Hrsg.), „Proceedings of the Sixth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance“, Civil-Comp Press, Edinburgh, UK, Online volume: CCC 7, Paper 19.1 (2024) doi:10.4203/ccc.7.19.1 (https://www.ctresources.info/ccc/paper.html?id=10297)

[3] Archut, C.; Jendrny, N.; Schulte-Marxloh, A.; Eberius, M.; Conrath, U.; Schindler, C.: Experimental comparison of herbicide-free methods for weed management on railway tracks. Transportation Research Procedia, Jg. 72. (2023) S. 1169–1176 https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.574

[4] Archut, C.; Jendrny, N.; Schulte-Marxloh, A.; Eberius, M.; Conrath, U.; Schindler, C.: Selection of a non-chemical method for weed management on railway tracks, in J. Pombo, (Hrsg.), „Proceedings of the Fifth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance“, Civil-Comp Press, Edinburgh, UK, Online volume: CCC 1, Paper 10.2, (2022). doi:10.4203/ccc.1.10.2 (https://www.ctresources.info/ccc/download/ccc.9553.pdf)

[5] Schulte-Marxloh, A.; Schüler, M.; Archut, C.; Jendrny, N.; Schindler, C.; Bergs, T.; Conrath, C.: Analysis of waterjet treatment for herbicide-free vegetation management on railway tracks. In: Proceedings of the WJTA Conference and Expo, New Orleans, USA (2022). (https://www.wjta.org/images/wjta/2022conference/Proceedings/A6-2022.pdf)

D Betreute studentische Arbeiten

[1] Vichare, S. (2025). Development and design of a mechanism for collecting weeds during the operation of mechanical weeding on railway tracks. Masterarbeit, Institut für Schienenfahrzeuge, RWTH Aachen.

[2] Soemantri, A. (2025). Konstruktion und Bau eines Prüfstands zur Entwicklung des Verfahrens „Mähen“ auf Gleisanlagen. Bachelorarbeit, Institut für Schienenfahrzeuge, RWTH Aachen.

[3] Zhang, L. (2025). Adaptation of a mechanical weeding system for its operation avoiding traffic disturbance on rail lines. Masterarbeit, Institut für Schienenfahrzeuge, RWTH Aachen.

[4] Hendricks, H. (2023). Erstellung eines Maschinenkonzeptes zur Vegetationskontrolle im Gleisbett mittels der Verfahren Mähen und Absaugen. Masterarbeit, Institut für Schienenfahrzeuge, RWTH Aachen.

[5] Fernandez-Ramos, S. (2022). Einfluss der Einhaltung von Grenzwerten der Längsbeschleunigung und des Längsrucks auf den Fahrplan. Masterarbeit, Institut für Schienenfahrzeuge, RWTH Aachen.

[6] Luo, H. (2022). Entwicklung eines schienengebundenen Applikators zum maschinellen Jäten auf Gleisanlage. Bachelorarbeit, Institut für Schienenfahrzeuge, RWTH Aachen.

[7] Klostermann, T. (2022) Konzeptentwicklung eines Alternativverfahrens zum chemischen Vegetationsmanagement an Sicherheits- und Kommunikationstechnik im Schotterbett und im Bahnübergang. Bachelorarbeit, Institut für Schienenfahrzeuge, RWTH Aachen.

[8] Skiba, M. (2021). Methodische Analyse zur Ermittlung der Hauptbeitragsleister für Steifigkeitsverluste in einer PKW-Sicherheitslenksäule mit Versuchs- und Berechnungsabgleich. Bachelorarbeit, Institut für Schienenfahrzeuge, RWTH Aachen.

[9] Joshi, K. (2020). Jerk Study Concerning Ride Comfort of Rail Vehicles. Projektarbeit, Institut für Schienenfahrzeuge, RWTH Aachen.

E Lebenslauf

Persönliche Daten

Vorname:	Carolina
Name:	Archut
Geburtsname:	Rios Serrano
Geburtstag:	15. Dezember 1988 in Cuernavaca, Mexiko
Nationalität:	Mexikanisch

Berufliche Werdegang

2018 – 2025	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Schienenfahrzeuge (ifs), RWTH Aachen.
2017 – 2018	Werkstudentin im Bereich Konstruktion bei der Firma CENTITECH GmbH, Aachen
2012 – 2014	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Nationalen Institut für Elektrotechnik und Umweltfreundliche Energien (INEEL), Mexiko

Ausbildung

2014 – 2018	Masterstudium Computer Aided Conception in Mechanical Engineering, RWTH Aachen
2007 – 2012	Bachelorstudium im allgemeinen Maschinenbau, UAEM-Morelos, Mexiko
2007	Abitur am CUAM-Morelos, Mexiko

In der Reihe **Schriftenreihe Schienenfahrzeuge** zuletzt erschienen:

Schönhuber, Paul:
Fahrdynamische Analyse und Optimierung eines neuartigen Leichtbaudrehgestells für Güterwagen
ISBN: 978-3-98555-353-2
Erscheinungsdatum: 15.07.2026

Kölker, Michael:
Bestimmung des Einflusses des Walzens auf den Verschleiß von Schienenfahrzeugrädern am Beispiel einer Stadtbahn
ISBN: 978-3-98555-310-5
Erscheinungsdatum: 17.11.2025

Bettinger, Tobias:
Schwingkomfortbewertung in Straßenbahnen mittels Maschinellen Lernens
ISBN: 978-3-98555-149-1
Erscheinungsdatum: 27.03.2023

Lekue, Jagoba:
Error Estimation in Wheel-Rail Normal Contact Area Measurements Using Pressure Sensitive Film
ISBN: 978-3-98555-086-9
Erscheinungsdatum: 23.06.2022

Simonis, Andreas:
Lastermittlung bei Achterbahnfahrzeugen
ISBN: 978-3-86359-761-0
Erscheinungsdatum: 20.09.2019

Jung, Hyun-Suk:
Bedarfsgerechtes Flachrangieren mit einem autonomen Zweiwege-Rangiergerät
ISBN: 978-3-98555-321-1
Erscheinungsdatum: 16.12.2025

Stratmann, Ina:
Genauigkeit und Grenzen von Kohlepapier und Druckmessfolie im Kontakt Hertz'scher Körper und von Rad und Schiene
ISBN: 978-3-98555-292-4
Erscheinungsdatum: 01.07.2025

Walawalkar, Ashwin:
A Method for Dynamic Payload Estimation in Hydraulic Excavators
ISBN: 978-3-98555-129-3
Erscheinungsdatum: 05.01.2023

Bennett, Mehmet Nureddin:
Active Tip-Over Prevention for Mobile Excavators
ISBN: 978-3-86359-805-1
Erscheinungsdatum: 14.01.2020

Edition Wissenschaft
Apprimus