

Abschlussbericht

Projekttitlel	Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen mit Heißwasser - GleisFrei
DBU - Aktenzeichen	34693/01-34/0
Verfasser	Dr. Arnd Verschwele, Lilli Fröhlich (JKI) Klemens Höltken, Malte Höltken (ELMO)
Institution	Julius Kühn-Institut (JKI) Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland Messeweg 11/12 38104 Braunschweig www.julius-kuehn.de
Kooperationspartner	ELMO GmbH Geschäftsleitung: Klemens Höltken Am Stadtwalde 15 48432 Rheine https://elmotherm.eu/
Projektbeginn	01.06.2021
Projektlaufzeit	01.06.2021 – 31.05.2024
Ort, Jahr	Braunschweig, 2024

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Zusammenfassung	3
Bericht	4
Anlass und Zielsetzung des Projekts	4
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden	4
Ergebnisse und Diskussion	5
Biologische Wirkungsversuche zur Effizienzsteigerung von Heißwasser	5
Erste Wirkungsversuche mit Testpflanzen	6
Wirkung auf relevante Unkrautarten	8
Optimierung der Wasser- bzw. Energiemenge	9
Schlussfolgerungen für die Konstruktion des Prototypen	11
Entwicklung und Funktionstests des Prototypen	12
Wirksamkeitserfassung	12
Pflanzenerkennung	12
Wasserbereitstellung und Wasserausbringung	14
Wasserdüsen und Ausbringventile	14
Schaumausbringung	15
Heißluftbereitstellung und -ausgabe	16
Aggregation des Prototypen	16
Anordnung der Ausbringelemente	16
Aufbau der Einzelsysteme	17
Praktische Versuche auf dem Gleis	19
Kameratechnik und Pflanzenerkennung	19
Wärmeerzeugung und -messung	19
Konformitäts- und Sicherheitsanalyse	21
Einbindung in ein Pflegekonzept	21
Ökonomische und ökologische Effekte	22
Öffentlichkeitsarbeit	24
Fazit	26
Literaturangaben	26

Zusammenfassung

Die Vegetationskontrolle auf Bahntrassen muss in Zukunft weiterhin effizient, aber so weit wie möglich mit herbizidfreien Methoden durchgeführt werden. Gleisanlagen sollten aus Gründen der Betriebs- und Verkehrssicherheit von jeglichem Bewuchs freigehalten werden. Pflanzen beeinträchtigen durch ihr Wurzelwachstum und durch Ausscheidungen den Baukörper und gefährden die erforderliche Stabilität des Gleiskörpers. Auch die Funktion von Weichen, Versorgungsleitungen und Signalanlagen kann durch Pflanzenbewuchs erheblich geschädigt werden. Schließlich schränkt starker Bewuchs die Sicht auf den Fahrweg und den Randbereich ein, so dass die Verkehrssicherheit nicht mehr gegeben ist.

Ziel des Projekts „GleisFrei“ war es, einen Prototypen in Modulbauweise zu entwickeln, mit dem die Vegetation auf Gleisen deutlich effizienter und wirtschaftlicher kontrolliert werden kann, als dies mit den vorhandenen Geräten der Fall ist.

Das Projekt „GleisFrei“ lief über drei Jahre von Juni 2021 bis Mai 2024. Beteiligt waren das Julius Kühn-Institut, die Hafenbetriebsgesellschaft mbH Braunschweig und die Firma ELMO GmbH. Durch die enge Zusammenarbeit der Projektpartner konnten biologische und technische Fragestellungen intensiv bearbeitet werden, so dass der Prototyp iterativ optimiert wurde. Wichtige Erkenntnisse aus den biologischen Modell- und Wirkungsversuchen im JKI flossen in die Entwicklung und Konstruktion des Prototypen ein, die vom Projektpartner ELMO GmbH umgesetzt wurden. Die üblichen verfügbaren Düsen erfüllen nicht die Anforderungen für eine effiziente Heißwasserausbringung auf Gleisanlagen. So mussten während der Projektphase neuartige Düsentypen entwickelt werden. Außerdem konnte belegt werden, dass zusätzliche Heißluft die Umgebungstemperatur um die zu behandelnde Fläche erhöht und folglich die erforderliche Wärmemenge durch Heißwasser reduziert wird. Die Wirkungsversuche im JKI zeigten, dass vor allem bei ausdauernden Pflanzenarten der Bekämpfungserfolg durch die Zugabe von Heißschaum signifikant verbessert wird. Mit der alleinigen, einmaligen Applikation von Heißwasser, auch bei über 80 °C, konnte keine ausreichende Wirkungssicherheit erzielt werden. In den Modellversuchen zeigte sich zudem, dass der Abstand zwischen Düse und Pflanze so gering wie möglich sein sollte (max. 10 cm), um Wärmeverluste zu verringern.

Die Firma ELMO GmbH hat darauf aufbauend ein System entwickelt, das mit einer neuartigen Düsenform und mit der Kombination von Heißwasser, Heißluft und Heißschaum höhere Bekämpfungserfolge auf Gleistrassen erreichen kann. Darüber hinaus wurde eine Sensor- und Steuerungstechnik entwickelt, die es erlaubt, Pflanzen zu erkennen und nur diese zu behandeln. Mit dieser Teilflächenbehandlung sind deutliche wirtschaftliche und auch ökologische Vorteile verbunden, weil ein Großteil an Brennstoffen und Emissionen verringert werden und auch weil die Flächenleistung steigen kann. Darüber hinaus hat die Firma ELMO GmbH ein wesentlich verbessertes, neuartiges Heißwasser-Umlaufsystem entwickelt. Wie geplant stehen die Module für den Einsatz des Prototypen auf städtischen und betrieblichen Gleisanlagen zur Verfügung. Die Fahrgeschwindigkeiten und Flächenleistungen reichen jedoch noch nicht aus, um dieses herbizidfreie Verfahren auf stark frequentierten Fernstrecken einsetzen zu können. Hier besteht noch Handlungsbedarf in Bezug auf die benötigte Wärmemenge, die in kurzer Zeit erzeugt und gezielt auf die Pflanze aufgebracht werden muss.

Die technischen Optionen (Applikationstechnik, Künstliche Intelligenz, grüne Energieträger etc.) bieten zukünftig weitere Möglichkeiten, um die ökologischen Vorteile von thermischen Bekämpfungsverfahren auf Gleisen und auch auf anderen Flächen effizient zu nutzen. Der langfristige Bekämpfungserfolg wird jedoch nicht nur durch die Gerätekonstruktion bestimmt, sondern wesentlich auch durch das Management und Konzept der Gleispflege. Mit dem neuartigen Prototypen, der im Projekt „GleisFrei“ entwickelt und gebaut worden ist, lassen sich aber Einsparungen erreichen, die positive ökonomische und ökologische Effekte mit sich bringen.

Bericht

Anlass und Zielsetzung des Projekts

Gleisanlagen müssen aus Gründen der Betriebs- und Verkehrssicherheit von jeglichem Bewuchs freigehalten werden. Pflanzen beeinträchtigen durch ihr Wurzelwachstum und durch Ausscheidungen den Baukörper und damit die erforderliche Stabilität des Gleiskörpers. Auch die Funktion von Weichen, Versorgungsleitungen und Signalanlagen kann durch Pflanzenbewuchs erheblich geschädigt werden. Schließlich schränkt starker Bewuchs die Sicht auf den Fahrweg und den Randbereich ein, so dass die Verkehrssicherheit nicht mehr gegeben ist.

Im Vergleich zum bisherigen Stand der Technik sollte durch folgende Maßnahmen im Projekt „Gleis-Frei“ eine deutliche Verbesserung erreicht werden: (a) Durch eine automatische Erkennung und gezielte Behandlung wird die zu behandelnde Zielfläche verkleinert und dadurch Energie eingespart. Die Flächenleistung erhöht sich entsprechend. (b) Die Wärme- bzw. Energiemenge wird bedarfsgerecht und kontrollierbar an die Pflanzen gebracht. Dadurch werden besonders bei größeren Pflanzen höhere Wirkungsgrade und Bekämpfungserfolge erzielt. (c) Die Methoden Heißwasser, Heißschaum und Heißluft werden in einer bislang nicht realisierten Konstruktion ideal miteinander kombiniert. Effiziente Anwendungsmöglichkeiten werden dadurch deutlich zunehmen.

Ziel des Projekts „GleisFrei“ war es, einen Geräte-Prototyp zur thermischen Vegetationskontrolle mit Heißwasser und Heißschaum auf Gleis-Schotterbetten zu entwickeln, der auf einem schienengängigen Fahrzeug Unkräuter auf Gleisen situationsbezogen und gezielt mit Heißwasser und Heißschaum behandelt. Mit dem Ziel eines marktfähigen Prototyps für die nassthermische Unkrautbekämpfung wird dieses Projekt dazu beitragen, eine Lücke auf dem Gebiet der herbizidfreien Vegetationskontrolle auf Gleistrassen zu schließen. Der Prototyp soll im Vergleich zu herkömmlicher Technik deutlich variabler und effizienter sein, weil er in Modulbauweise verschiedene thermische Verfahren kombiniert und weil dieser Prototyp durch die neuartige Sensortechnik wesentlich spezifischer und energiesparender eingesetzt werden kann.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Zuge der Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurden im JKI Dosis-Wirkungsversuche angelegt und durchgeführt, um die Kontrollwirkung von Heißwasser und Heißschaum, begleitend zur technischen Entwicklung des Prototyps, zu untersuchen. Die Auswirkungen verschiedener Temperaturen und Heißwassermengen auf unterschiedliche Pflanzenarten waren Gegenstand standardisierten Halbfreiland-Untersuchungen. Der Erkenntnisgewinn floss direkt und schrittweise in die Entwicklung des Prototypen mit ein. Weitere Arbeiten betrafen die Planung und Durchführung von Tests vor Ort auf einem Gleisabschnitt im Hafen Braunschweig. Die Prüfung und Entwicklung der adaptierten Düsenform sowie der Kamera- und Sensortechnik nahmen einen breiten Raum ein. Während der technischen Weiterentwicklung des Prototyps ergaben sich neue Fragestellungen, die dann planmäßig wiederum in die Testplanung einfließen. So konnte durch neue biologische und technische Erkenntnisse der angestrebte Prototyp während der Projektphase iterativ optimiert werden.

Ergebnisse und Diskussion

Biologische Wirkungsversuche zur Effizienzsteigerung von Heißwasser

Zu Projektbeginn wurde überprüft, ob die Wasser- und Temperaturverteilung im vorhandenen Testgerät ausreichend homogen ist. Dafür wurde das Modell ET3 MOBILE Therm für die Modellversuche genauer untersucht. Auf Lanzenbreite wurde die Verteilung der Wassermenge und die Temperaturverteilung bei verschiedenen Wassertemperaturen genau erfasst. Es lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Applikation von Heißwasser mit der Lanze für Exaktversuche nur bedingt geeignet war. Das System von Heißwassergerät mit Temperaturanzeige (Sensor am Durchlauferhitzer) zur Bereitstellung und Lanze zur Ausbringung war nicht exakt steuerbar. Dennoch konnten wie geplant unterschiedliche Temperaturbereiche untersucht und ausreichend genau gemessen werden.

Die Versuche zeigten, dass vor allem mit steigender Temperatur die Variabilität der Quer- und Längsverteilung zunimmt (Abb. 2). Daraus ergeben sich neue Anforderungen für die Ausbringungseinheit des Prototypen als auch für die Methodik der Modellversuche. Hier wurde deswegen zunächst die vergleichsweise schmale Behandlung von Einzelpflanzen einer Flächenbehandlung der Vorzug gegeben. Daraus ergaben sich wichtige Hinweise zur Gestaltung der Düsen für Anwendungen im Gleisbereich, die vor allem bei den geforderten höheren Fahrgeschwindigkeiten technisch verändert werden müssen. Weiterführende Versuche mit optimierten Düsen sind mit dem Prototypen im Gleisbereich durchgeführt worden (siehe S. 14).



Abbildung 1: Aufbau zur Messung der Quer- und Längsverteilung der Wassermengen für unterschiedliche Düsen- und Lanzentypen

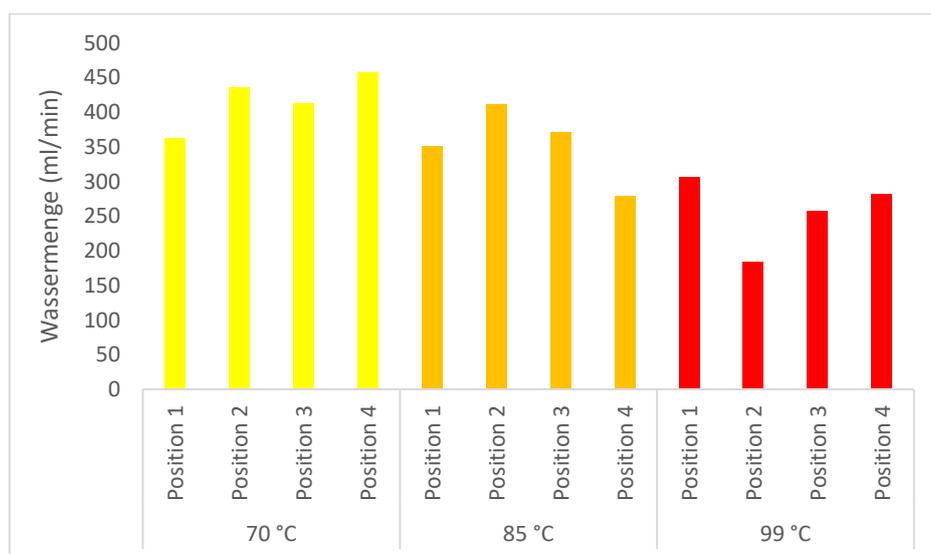


Abbildung 2: Wassermenge (ml/min) in Abhängigkeit von der Lanzenposition und Wassertemperatur

Erste Wirkungsversuche mit Testpflanzen

Nach den Vorversuchen zur Optimierung der Wasserausbringung wurde ein Versuchsprotokoll zur Anzucht der Pflanzen unter Halfreilandbedingungen und zur standardisierten Behandlung mit Heißwasser (und später mit Heißluft und Heißschaum) verfasst. Abbildung 3 zeigt beispielhaft die angezogenen Testpflanzen und den Versuchsaufbau für die Behandlung einzelner Pflanzen bzw. Töpfe. Für die Versuchsserien auf dem Hafengelände wurden diese Pflanzen je nach Versuchsaufbau in die Gleise gepflanzt, um standardisierte Bedingungen zu erhalten.



Abbildung 3: Anzucht der Testpflanzen und Versuchsaufbau zur Heißwasserbehandlung im JKI

Neben einer homogenen Wasserverteilung ist entscheidend, welche Wassermengen und –temperaturen für eine effiziente Vegetationskontrolle mindestens notwendig sind. Außer der Menge und Temperatur des Wassers sind die Zugabe von Schaum und die Behandlungstermine steuerbare Parameter.

Hierzu fanden im JKI weitere Modellversuche mit folgenden Prüfgliedern statt:

- Wassertemperatur: 80 °C / 98 °C
- Behandlung: Heißwasser (W) / Heißwasser + Heißschaum (WS)
- Heißwassermenge: 6 L/m² / 12 L/m²
- Behandlungsintervall: 1x / 2x
- Pflanzenart: Raps (*Brassica napus*) / Weizen (*Triticum aestivum*)

Es zeigte sich, dass *Brassica napus* als dikotyle Pflanzenart wesentlich empfindlicher auf die thermische Behandlung reagierte als *Triticum aestivum* als Beispiel für eine Gräserart. Hier wurde die Triebanzahl kaum reduziert. Die vorhandene Blattmasse wurde zwar geschädigt, aber ein Neuaustrieb ließ sich auch nach der zweiten Behandlung nicht verhindern. Zusätzlicher Heißschaum erhöhte die schädigende Wirkung unabhängig von Wassermenge und –temperatur deutlich. Bei Gräsern ist dagegen die

Wiederholung der Behandlung entscheidender (Abb. 4). Diese Ergebnisse geben wichtige Hinweise für die technischen Anforderungen an den Prototypen und auch für das Management der Vegetationskontrolle (siehe S. 12).

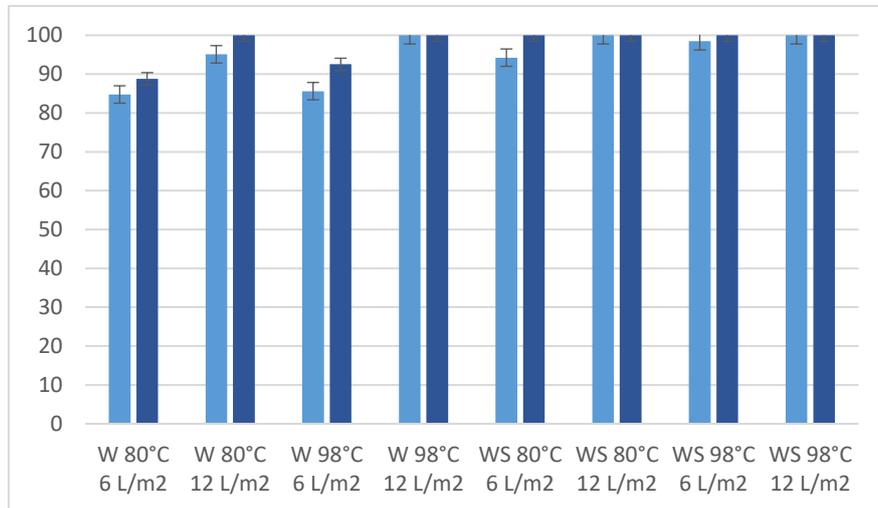


Abbildung 4a: Wirksamkeit (%) bei *Brassica napus* (W=Heißwasser, WS=Heißwasser und Schaum, linke Säule: einfache Behandlung, rechte Säule: zweifache Behandlung, Mittelwerte und Standardfehler

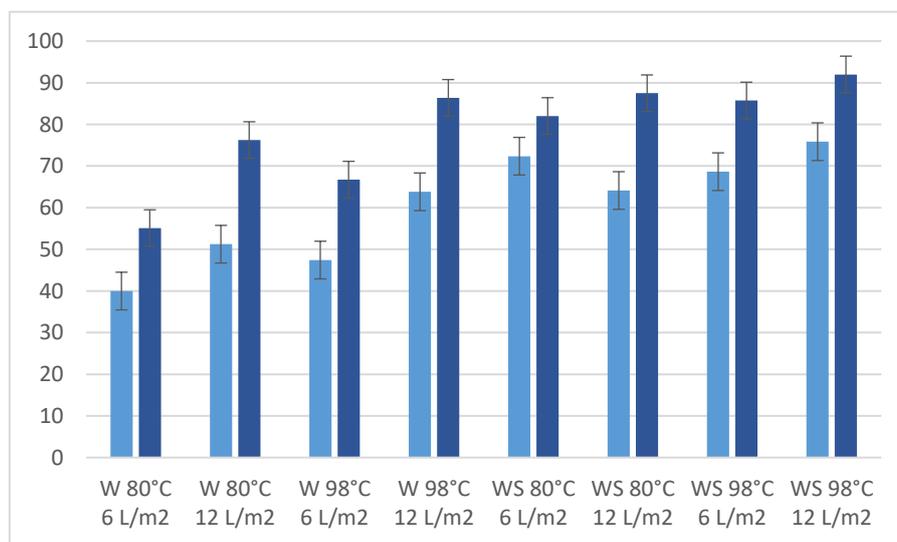


Abbildung 4b: Wirksamkeit (%) bei *Triticum aestivum* (W=Heißwasser, WS=Heißwasser und Schaum, linke Säule: einfache Behandlung, rechte Säule: zweifache Behandlung, Mittelwerte und Standardfehler

Die Wirkungsversuche mit den Testpflanzen Raps (*Brassica napus*) und Weizen (*Triticum aestivum*) ergaben, dass Wassertemperaturen von über 80 °C für hohe Bekämpfungserfolge notwendig sind. Die Erhöhung der Wassermenge von 6 auf 12 L/m² hat einen umso stärkeren Effekt, je geringer die Wirksamkeit nach der ersten Behandlung war. Gleiches gilt für die zweite Behandlung, die bei monokotylen Arten wie Weizen zu deutlich besseren Bekämpfungswerten führte (Abb. 4).

Wirkung auf relevante Unkrautarten

In einem weiteren Wirkungsversuch wurden ausgewählte relevante Unkrautarten untersucht. Es wurde der Frage nachgegangen, welche Temperatur und welche Wassermenge bei wiederholter Behandlung mindestens notwendig ist, um Pflanzen zu schädigen. Zudem sollte festgestellt werden, ob die Unkrautarten unterschiedlich auf eine nassthermische Behandlung reagieren. Die Methodik dieser Versuchsserie entsprach grundsätzlich der des vorangegangenen Versuchs.

Folgende Prüfglieder wurden untersucht:

- Pflanzenarten: *Solidago canadensis* (SOOCA) / *Hypericum perforatum* (HYPPE) / *Taraxacum officinale* (TAROF) / *Festuca rubra* (FESRU) / *Calamagrostis epigejos* (CALEP) / *Lolium perenne* (LOLPE)
- Temperaturen: 75 °C / 80 °C / 90 °C
- Wassermengen: 0,75 L/m² / 1,5 L/m² / 3,0 L/m²

Es zeigte sich, dass ein vollständiges Absterben der Pflanzen nach einmaliger Heißwasserapplikation auch bei einer Temperatur von 90° C und einer Heißwassermenge von 3 L/m² bei keiner der hier untersuchten Arten erreicht werden konnte. Ein Neuaustrieb von der Basis aus war durchgehend sichtbar. Es ließ sich aber auch hier feststellen, dass bei höherer Temperatur in Verbindung mit höherer Wassermenge die Wirksamkeit zunimmt (siehe Abb. 5).

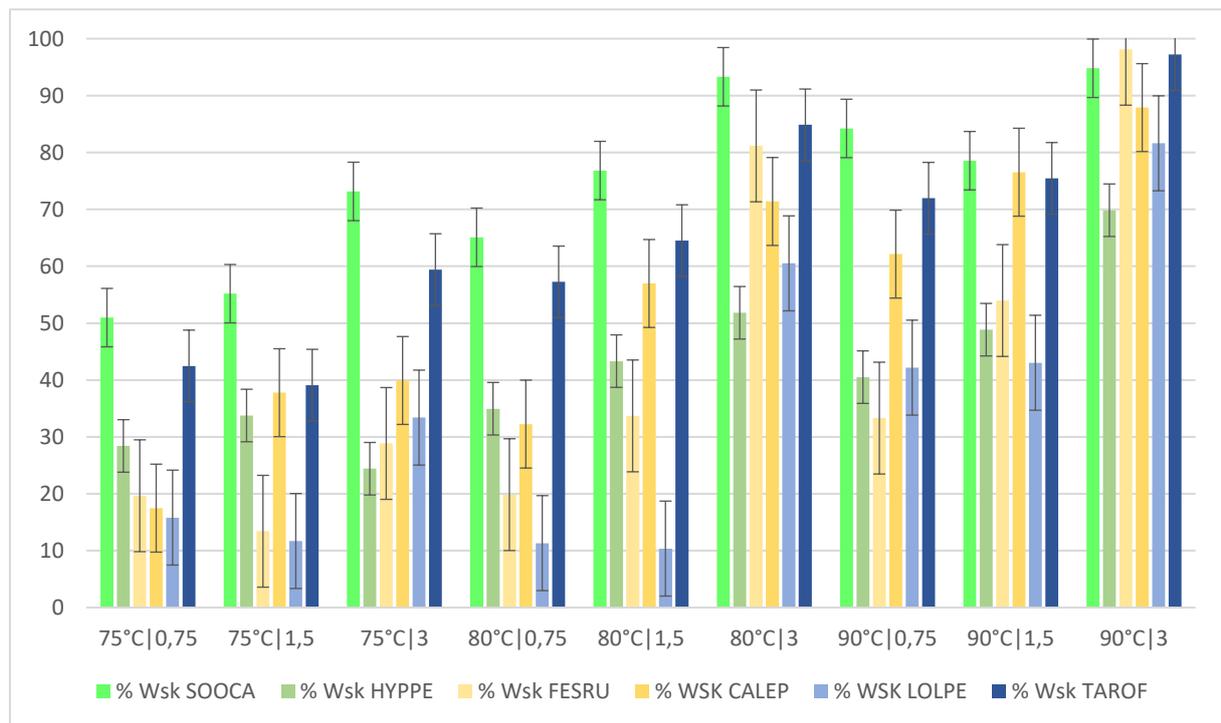


Abbildung 5: Wirksamkeit (%) von Heißwasser in Abhängigkeit von Wassertemperatur und -menge für relevante Pflanzenarten, Mittelwerte und Standardfehler

Die Ergebnisse dieses Versuchs waren Grundlage für die Planung des darauffolgenden Modellversuchs. Nach ersten Tests auf einem Gleisabschnitt im Hafen Braunschweig entstand ein genaueres Bild der einzusetzenden Applikationsdüsen, so dass für die Wirkungsversuche im JKI eine Ausbringereinheit mit

gezielter Steuerung konstruiert werden konnte. Auf diese Weise ließ sich die Heißwassermenge und die Applikationsdauer wesentlicher gezielter variieren und steuern, als dies in den vorherigen Versuchen der Fall war. Diese Applikationstechnik kam in den folgenden Versuchen zum Einsatz.

Optimierung der Wasser- bzw. Energiemenge

Aus den Wirkungsversuchen zu Projektbeginn ergab sich die Anforderung, eine homogenere Benetzung der Pflanzen mit Heißwasser zu erreichen und insgesamt eine höhere Wärmemenge auf die Zielfläche zu applizieren. Mit einer neuen Düsenform wurden daher folgende Varianten geprüft:

- Wassertemperatur: 80 °C / 97 °C
- Wassermenge: 1,5 L/m² / 3 L/m²
- Wassermenge aufgeteilt in 1 / 2 / 3 Sprühstößen

Temperaturen von 80 °C reichten hier nicht für eine signifikante Reduktion der Sprossmasse aus. Tendenziell zeigte die höhere Wassermenge einen besseren Bekämpfungserfolg, aber die Anzahl der Sprühstöße schien keinen sicheren Effekt zu haben (Abb. 6). Diese Versuche, wie auch weitere mit anderen Düsenformen ergaben, dass die marktgängigen Düsen nicht das gewünschte Ergebnis brachten und folglich eigene Konstruktionen notwendig wurden (siehe S. 15) Diese neue Düsenform muss auch bei größerem Abstand zur Zielfläche die Wärmemenge gleichmäßig auf die Blattfläche verteilen, so dass möglichst auch im Vegetationspunkt über einen längeren Zeitraum im Pflanzengewebe Temperaturen von mindestens 60 °C erreicht werden. Darüber hinaus müssen Wärmeverluste in der Düse und im Wasser-Kreislauf minimiert werden.

Abschließende Versuche sollten klären, ob durch Heißwasser auch die Keimung von Unkräutern verringert werden kann. Eine solche Wirkung trat zwar ein, allerdings erst, wenn bei Wassertemperaturen von über 80 °C und Einwirkzeiten von über 5 Sekunden. Bei den Pflanzenarten *Brassica napus* und *Festuca rubra* kam die Keimung bei einer Temperatur von 80 °C und einer Einwirkdauer von 60 Sekunden vollständig zum Erliegen. Temperaturen von über 90 °C erhöhten die Mortalität der Samen kaum. Unter praxisüblichen Bedingungen wird dieser Fall vermutlich jedoch nur sehr selten eintreten. Ähnliche Effekte sind auch für andere Pflanzenarten bekannt.

Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen mit Heißwasser - GleisFrei

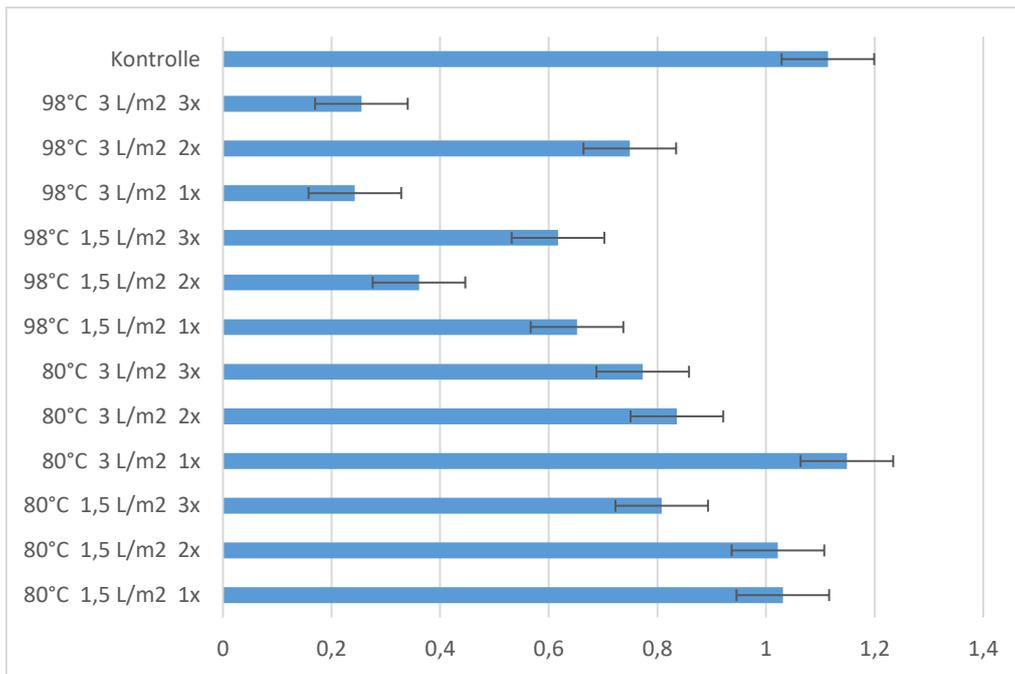


Abbildung 6a: Sprossmasse von *Brassica napus* (g/Pflanze) in Abhängigkeit von Wassertemperatur, Wassermenge und Anzahl der Sprühstöße, Mittelwerte und Standardfehler

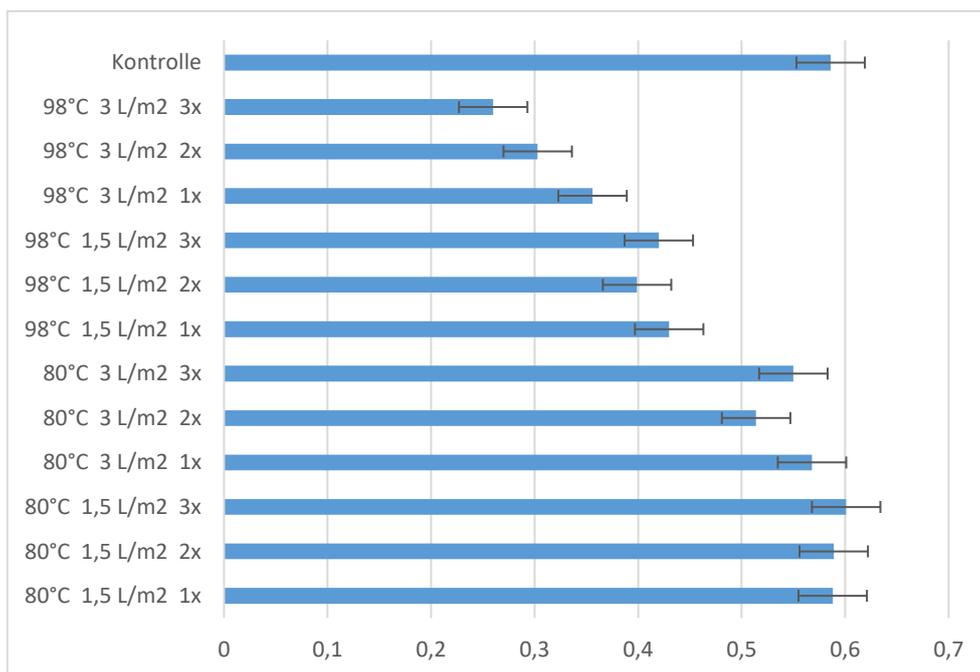


Abbildung 6b: Sprossmasse von *Triticum aestivum* (g/Pflanze) in Abhängigkeit von Wassertemperatur, Wassermenge und Anzahl der Sprühstöße, Mittelwerte und Standardfehler

Schlussfolgerungen für die Konstruktion des Prototypen

Die Wirkungsversuche, einschließlich derer, die hier nicht im Detail beschrieben sind, lassen folgende Schlussfolgerungen zu: Um einen ausreichenden Bekämpfungserfolg zu erreichen, sind Wassertemperaturen von über 80 °C erforderlich. Die Hinzugabe von Schaum verstärkte signifikant die Wirkung. Allerdings ist bei einer üblichen moderaten Verunkrautung im Gleisbereich eine mindestens zweifache Behandlung erforderlich, um den Wiederaustrieb relevanter Unkräuter zu verhindern oder zumindest zu verzögern. Ausdauernde monokotyle Pflanzenarten wie *Festuca rubra* sind besonders schwierig zu bekämpfen. Berücksichtigt man zusätzlich weitere Ergebnisse und Erfahrungen muss von einer mindestens vierfachen Behandlung mit Heißwasser während der Vegetationsperiode ausgegangen werden. Die Wirkungsdaten wurden unterstützt durch Aufnahmen zur Wärmeverteilung. Diese ließen sich zwar nicht quantitativ auswerten, sie geben aber dennoch wichtige Hinweise zum Grad der Schädigung der Blattmasse bzw. des Vegetationspunktes und zeigen - ähnlich wie Thermosensoren - auch den zeitlichen Temperaturverlauf an.

Folgende Erkenntnisse aus den Modell- und Wirkungsversuchen ergaben sich für die Konstruktion des Prototypen:

- Die üblichen verfügbaren Düsen erfüllen nicht die Anforderungen für eine effiziente Heißwasserausbringung auf Gleisanlagen. Es müssen während der Projektphase neuartige Düsentypen entwickelt werden
- Heißluft kann die Umgebungstemperatur um die zu behandelnde Fläche erhöhen und folglich die erforderliche Wärmemenge durch Heißwasser reduzieren.
- Bei der üblichen Mischverunkrautung auf Gleisanlagen sollte der Zusatz von Heißschaum stets vorgesehen werden. Vor allem bei größeren, ausdauernden Pflanzen wird mit der alleinigen Applikation von Heißwasser (mindestens 80 °C) keine ausreichende Wirkungssicherheit erzielt.
- Der Abstand zwischen Düse und Pflanze muss so gering wie möglich sein (max. 10 cm), um unnötige Wärmeverluste zu verringern.
- Der langfristige Bekämpfungserfolg wird nicht nur durch die Gerätekonstruktion bestimmt, sondern wesentlich auch durch das Management und Konzept der Gleispflege. Mit einem effizienten Prototypen lassen sich aber Einsparungen erreichen, die auch positive ökonomische und ökologische Effekte mit sich bringen.
- Die Ergebnisse der Wirkungsversuche sind auch wertvoll für die Entwicklung von Heißwassergeräten, die außerhalb von Gleisanlagen eingesetzt werden.

Entwicklung und Funktionstests des Prototypen

Wirksamkeitserfassung

Die Arbeitspakete zur Quantifizierung der erforderlichen Wasser- bzw. Wärmemenge für verschiedene relevante Pflanzenarten lag im Aufgabenbereich des JKI. Die ELMO GmbH untersuchte die Wirksamkeit der Ausbringung in Bezug auf gelieferter Wasser- bzw. Wärmemenge im Bereich der Pflanzenoberfläche.

Zur Messung wurde ein System assembliert, welches es erlaubt, die transienten Temperaturverläufe im Gleisbett mit einer Abtastfrequenz von rund 10 Hz (10 Temperaturmessungen pro Sekunde) hinreichend genau aufzunehmen und darzustellen. Zur Aufnahme phänomenologischer Auswertungen wurde wie auch bei den Versuchen im JKI zudem Infrarot-Thermographie (FLIR) eingesetzt (Abb. 7).

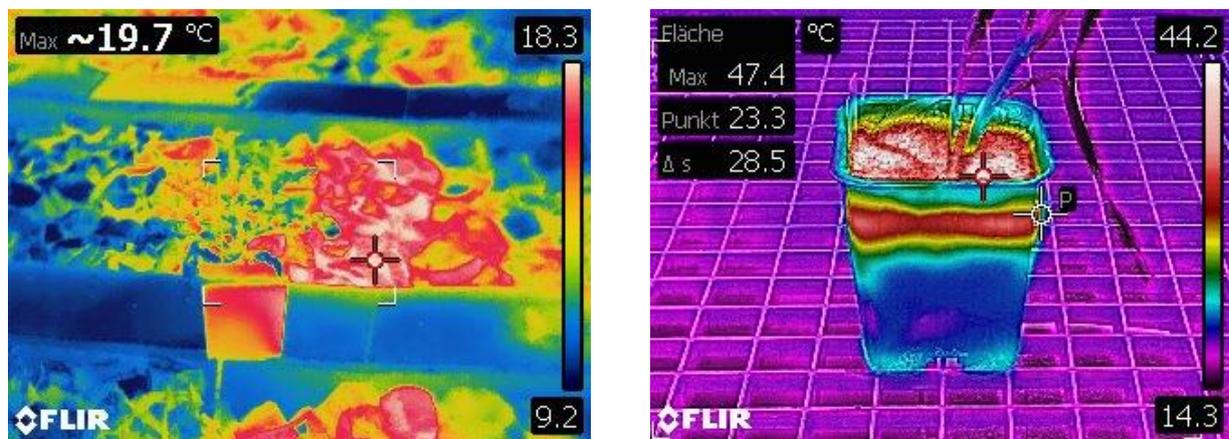


Abbildung 7: Phänomenologische Untersuchung thermischer Unkrautkontrolle (links: Gleisbett, rechts: Modellversuch)

Die Messdaten sind mit Ergebnissen statischer Versuche kongruent, und die Entwicklung des Testsystems zur Wirksamkeitserfassung war damit abgeschlossen.

Pflanzenerkennung

Zur geplanten punktgenauen Ausgabe des heißen Wassers gezielt auf Pflanzen und nicht auf im Gleisbett lebenden Tieren wurde ein kameragestütztes System auf Basis eines neuronalen Netzwerks entwickelt.

In einem ersten Schritt wurde das neuronale Netz mit eigens hergestellten Beispieldatenbanken angeleitet (Deep Learning). Hierzu wurden mit einem hierfür hergestellten Kamerafahrzeug vielfältige Bilder von Pflanzen in verschiedenen Gleisbettausprägungen (Schotter, Pflaster, Asphalt, etc.) angefertigt. Hiermit wurde zunächst die für die Pflanzenerkennung optimale Kamera und ihre Position ermittelt (Abb. 8).

Auf mehr als tausend der so ausgewählten Bilder wurden manuell die zu behandelnden Pflanzen markiert. Auf Grundlage der so markierten Bilder konnte ein neuronales Netz angeleitet werden, welches die in situ-Erkennung von Pflanzen ermöglicht. Die hierfür entwickelte Software wurde iterativ in den Bereichen der Erkennungszuverlässigkeit und Reaktionsgeschwindigkeit verbessert.

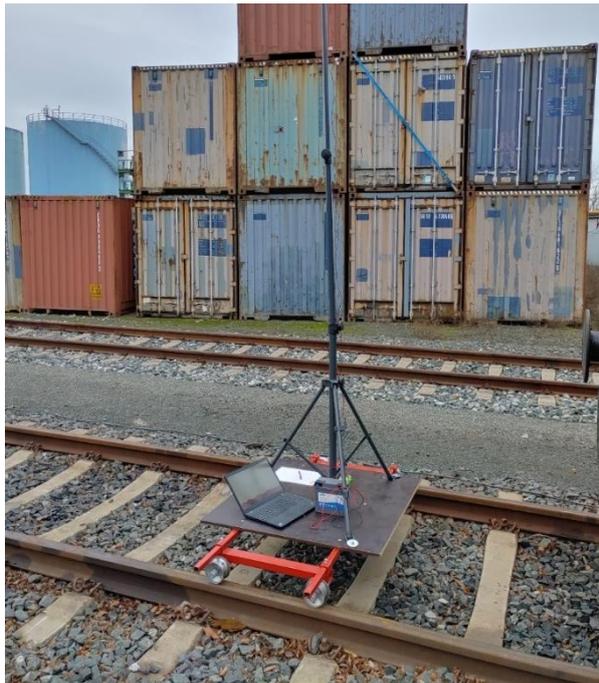


Abbildung 8: Testkamera zur Positions- und Winkelbestimmung, sowie zur Erstellung von Anlerndaten

Das System filmt den zu bearbeitenden Bereich mit einer Stereokamera. Der bildbearbeitende Rechner erkennt Grünpflanzen und kann über Stereoskopie und Image Velocimetry die Relativgeschwindigkeit der Pflanzen in Bezug zum Geräteträger erfassen (Abb. 9). Aus der Pflanzenposition und dem Bewegungsvektor wird die notwendige Öffnungszeit der jeweilig behandelnden Düsen errechnet.



Abbildung 9: Beispielbild der Stereokamera auf einem verkrauteten Gleisabschnitt mit Bestimmtheitsmaß für die Detektion einzelner Pflanzen.

Die Konfidenz der Erkennung wird mit einem Index angegeben. Durch die Erkennung im sichtbaren Spektrum werden auch andere grüne Elemente erkannt, wie etwa die Tasten der Fernbedienung auf dem Geräteträger.

Versuche mit dem implementierten System zeigten eine zufriedenstellende Arbeitsweise, wenngleich gerade das bildgebende System für jedes ausgeführte Gerät angepasst werden muss.

Für einen geringen Wärmeverlust unterhalb der Düse ist ein möglichst geringer Abstand zur Zielfläche bzw. Pflanze erforderlich. Dieser Abstand wird allerdings oft durch bauliche Anlagen im Gleisbereich

bestimmt. Mittelfristig sollte die Kamertechnik daher auch dazu genutzt werden, diese Hindernisse zu erkennen und den Düsenbalken entsprechend zu steuern.

Wasserbereitstellung und Wasserausbringung

Anders als bei bisherigen Systemen, zielt der im Projekt GleisFrei entwickelte Prototyp nicht auf die kontinuierliche ganzflächige Ausbringung ab. Vielmehr soll zum schonenden Einsatz von Ressourcen die Strecke nur intermittierend behandelt werden. An den Düsen zur Ausbringung muss demnach auch nach langen inaktiven Zeiten ausreichend energiereiches bzw. ausreichend heißes Wasser bereitgestellt werden. Ferner soll, insbesondere zur Erreichung hoher Anwendungsgeschwindigkeiten, die Schaltzeit der Ausbringung minimiert werden. Um dies zu gewährleisten, wurde ein neues mehrstufiges Heißwasserumlaufsystem entwickelt, welches in der Lage ist Heißwasser in ausreichenden Mengen hinreichend schnell bereitzustellen. Initiale Versuche mit Heißwasserbevorratung in isolierten Kesseln und linearer Ausgabe hat zu stark schwankenden Ausbringtemperaturen, -drücken und -mengen geführt und wurde daher verworfen.



Abbildung 10: Test des linearen Ausbringsystems mit Brenner und isoliertem Kessel

Dieses System ist aufgrund seiner modularen Bauweise bereits für die Anpassung auf verschiedenen kommunalen Arbeits- bzw. Schienenfahrzeugen vorgesehen.

Wasserdüsen und Ausbringventile

Zur Applizierung des bereitgestellten heißen Wassers auf die Pflanzen wurden in einer Parameterstudie mehrere Geometrien für Ausbringdüsen in mehreren hundert Einzelversuchen systematisch untersucht (Abb. 10). Ziel der Untersuchung war es, Düsenquerschnitt, Abstrahlwinkel und –geometrie mit samt ihrer Ansteuerungsparameter wie Durchflussmenge und Vordruck derart auszuwählen, dass eine Pflanze unter Minimierung der Wärmeverluste sicher getroffen werden kann.

Da die Parameterstudie unter handelsüblich erwerbbaaren Off-The-Shelf-Düsen keine brauchbare Lösung hervorbrachte, wurde die Düse zur Wasserausbringung eigens für diese Anwendung neu konstruiert und iterativ verbessert (Abb. 11). Die Breite der entwickelten Ausbringdüsen wurde dabei auf die Anforderungen aus der Pflanzenerkennung und damit definierten Sektorisierung der Ausbringbreite angepasst. Die Eigenentwicklung wurde insbesondere durch unakzeptabel hohe Temperaturverluste in der Ausbringung in Kombination mit hohen notwendigen Ausbringdrücken bei der Verwendung handelsüblicher Düsen notwendig.



Abbildung 11: Teststand zur Parameterstudie für Ausbringdüsen, eigenentwickelte Düsen, montiert auf Ausbringeinheit.

Den Düsen vorgeschaltet sind elektrische Schaltventile, die Wasser bzw. Schaum zu den Auslassdüsen durchleiten. Um Ventile zu ermitteln, welche den Ansprüchen an Temperaturfestigkeit, Druckfestigkeit und Schaltgeschwindigkeit genügen, wurden mehrere handelsübliche Ventile getestet (Abb. 12). Die in dem Testverfahren ausgewählten Ventile sind geeignet, um die Applikationsgeschwindigkeit weit über des in diesem Projekt geforderten Geschwindigkeit zu bedienen.

Schaumausbringung

Zur finalen thermischen Isolation des ausgebrachten Wassers und damit zur Steigerung der Applikationsgeschwindigkeit und -effizienz ausgebrachter Schaum wird durch geschaltete Schaumdüsen appliziert. Wie bei der Wasserausbringung wurde hierzu eine Vielzahl von kommerziell erhältlichen Schaumdüsen in einer Parameterstudie getestet. Auch die Modifikation von handelsüblichen Düsen erlaubten hierbei die Bereitstellung ausreichend stabilen und dichten Schaums.

Folglich wurden, wie bereits bei der Wasserausbringung beschrieben, die Schaumdüsen eigens entwickelt und iterativ verbessert (Abb. 12). Auch die Schaumdüsen sind auf die Sektorisierung der Ausbringbreite angepasst.



Abbildung 12: Apparatur zum Test von Düsen und Ventilen

Heißluftbereitstellung und -ausgabe

Die Ausgabe der Heißluft erfolgt primär um die bodennahen Kaltluftschichten zu verdrängen und somit die Verlustwärmeleistung der Heißwasserausgabe an die Umgebungsluft zu minimieren. Hierzu wurde Heißluft mit einem Gasbrenner hergestellt und in die Ausbringeinheit umgelenkt.

Die Behandlungsversuche mit diesem ersten System zeigen vielversprechende Ergebnisse, und der Effekt der Heißluft konnte validiert werden. Zwar benötigt speziell dieses System noch weitere Entwicklung in Bezug auf Luftführung und Heißluftrekuperation, jedoch kann mit hoher Konfidenz die Lufterwärmung als erfolgreicher Baustein für hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten angesehen werden.

Aggregation des Prototypen

Anordnung der Ausbringelemente

Um einer höheren Einwirkzeit des heißen Wassers beim Überfahren der Pflanze bei höheren Geschwindigkeiten zu ermöglichen, wurden die Ausbringventile mit den Düsen in vier Linien angebracht. Jede Linie wird dabei an die Zielbearbeitungsgeschwindigkeit angepasst. Die letzte Linie ist mit Schaumdüsen bestückt. Die Linien können beliebig breit ausgeführt werden, wobei die Düsenbreite 5 cm beträgt. Bei Überfahrt über eine Pflanze werden diese vier Linien derart gesteuert, dass die Pflanze durch jede Linie einmal getroffen wird. Die zwischen den Linien angeordnete Heißluftausbringung läuft dabei kontinuierlich.

Die Ausbringeinheit wurde zunächst nur mit einer Anfangsaufheizung und einer seitlichen Schürze versehen, die die Heißluft an den zu behandelnden Pflanzen halten soll (Abb. 13 und Abb. 14).



Abbildung 13: Ausbringeinheit mit vier Düsenreihen und Windschürzen (Heißluft + Heißwasser + Heißschaum)



Abbildung 14: Ausbringeinheit für die Versuche auf dem Gleis im Hafen Braunschweig

Aufbau der Einzelsysteme

Die Aggregation der einzelnen Systemkomponenten und das Zusammenspiel aus Erkennung, Steuerung, Mediumbereitstellung und Ausbringung stellt in sich eine nicht-triviale Aufgabe dar. Dieses Arbeitspaket wurde mit der Einschränkung kleinerer Anpassungen soweit fertiggestellt, dass einerseits die notwendigen Systemversuche zur Wirksamkeitsuntersuchung durchgeführt werden konnten, als auch der Aufbau auf ein funktionales kommunales System verstanden ist und durchgeführt werden kann.

Grundsätzlich wurden die einzelnen Komponenten so wie geplant erstellt und unter Praxisbedingungen getestet (Abb. 15).

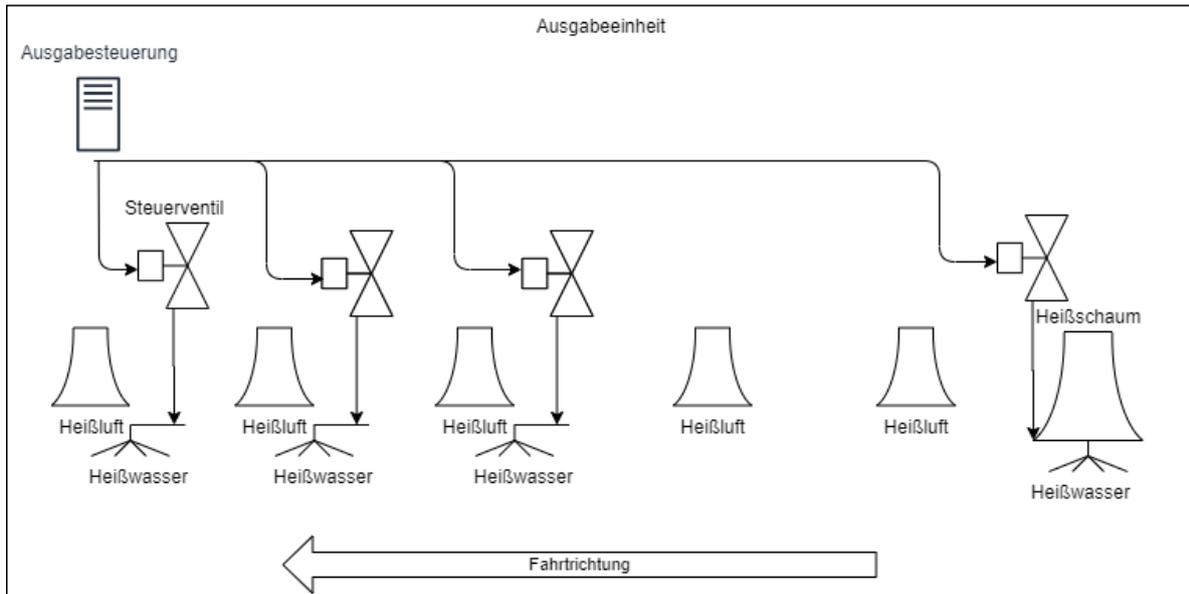


Abbildung 15: Testsystem aggregiert, oben: Plan gemäß Antrag, unten: montiert auf Trägerfahrzeug und Anhänger

Praktische Versuche auf dem Gleis

Auf dem Versuchsgleis im Hafen Braunschweig wurden verschiedene Module in Bezug auf ihre Wirkung gegen relevante Unkrautarten getestet. Zunächst kam das Heißwassergerät allein auf einem Tragwagen zum Einsatz (Abb. 16). Im späteren Projektverlauf wurden Heißluft und Heißschaum hinzugefügt und die Kameratechnik getestet und weiterentwickelt.



Abbildung 16: Heißwassergerät im Einsatz auf dem Versuchsgleis im Hafen Braunschweig

Kameratechnik und Pflanzenerkennung

Ein entscheidender Schritt für den Projektpartner war, die einzusetzende Kamera für die automatisierte Pflanzenerkennung zur gezielten Behandlung, mit Hilfe von Fotomaterial anzulernen. Dazu wurden vom JKI in eine umfangreiche Zahl von Pflanzen relevanter Arten in verschiedenen Wuchsstadien angezogen und für die Kamera- und Wirkungstests zur Verfügung gestellt. Auf diese Weise konnten Aufnahmen für das Anlernen der KI (künstliche Intelligenz) realisiert werden. Weitere diverse Pflanzenaufnahmen wurden seitens des JKI gemacht und dem Projektpartner ELMO GmbH zur Verfügung gestellt. Für die Projektziele war es zunächst ausreichend, einzelne Pflanzen über die digitale Bildanalyse zu erkennen. Die Bilder sollen später auch zur Identifizierung der Pflanzenart und Kategorisierung der Pflanzenmasse genutzt werden. Dadurch lässt sich langfristig nicht nur die Behandlungsintensität steuern, auch digitale Karten zur Bekämpfungskontrolle können damit erstellt werden.

Wärmeerzeugung und –messung

Die durchgeführten Versuche zeigten durch Wärmebildaufnahmen und Temperaturschriebe die Effektivität des Gesamtsystems (Abb. 17 und Abb. 18). Durch die prinzipbedingte physikalische Ungenauigkeit thermographischer Temperaturmessung erlaubt dieses Bild zwar keine Quantifizierung von Temperaturen, zeigt aber eine qualitative Temperaturverteilung.



Abbildung 17: Thermographie der Ausbringeinheit.

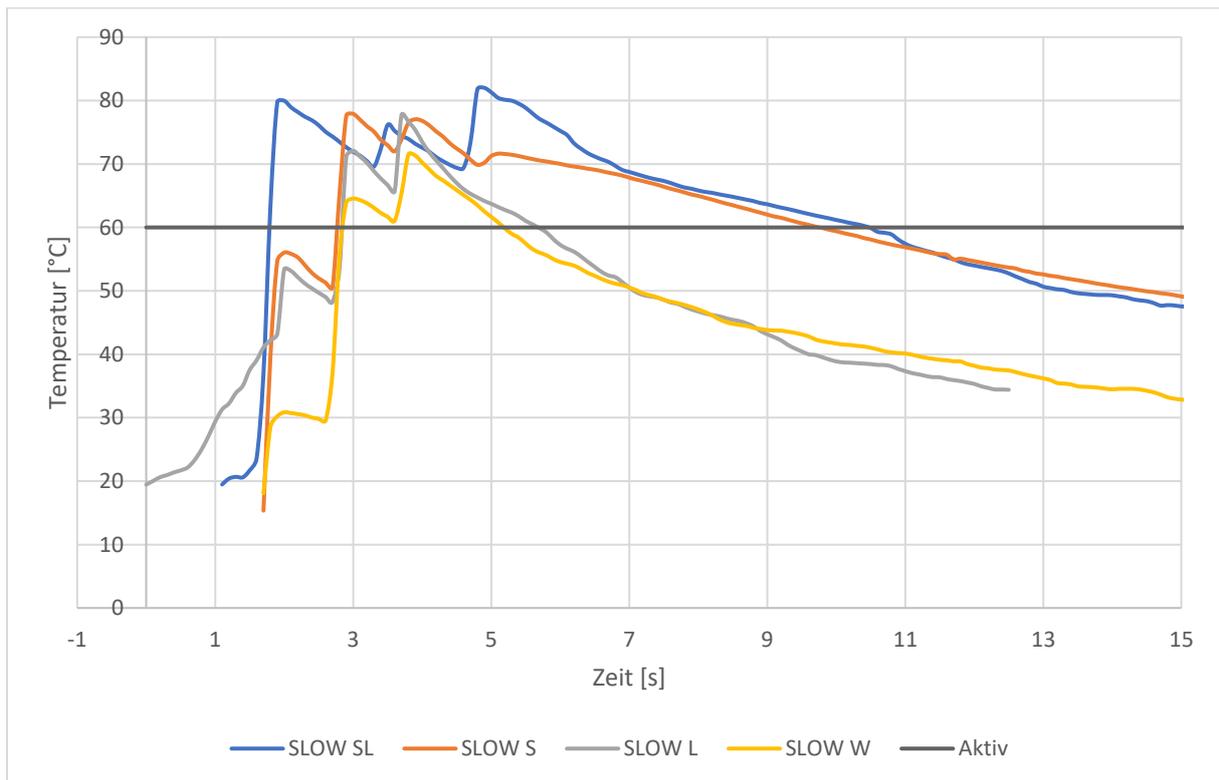


Abbildung 18: Temperatur an den behandelten Pflanzen in mehreren Konfigurationen bei 1 m/s Bearbeitungsgeschwindigkeit (S= Schaum, L= Luft, W = Wasser, Aktiv: 60 °C als notwendige letale Temperatur).

Im Auslegungspunkt der Ausgabeeinheit (etwa 2,5 m/s) sind für die nachhaltige Behandlung der Pflanzen ausreichende Wärmemengen in Pflanzenhöhe ausgebracht worden. Die Trefferquote der getesteten Pflanzen betrug etwa 80 %. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Testpflanzen nicht im Gleisbett, sondern auf der Oberfläche in Pflanztöpfen standen, um eine ausreichende Wasserversorgung zu gewährleisten. Testfahrten im Gleisbett ergaben eine Erkennungsrate durch das Kamerasystem oberhalb von 90 %. Die Erkennungsgeschwindigkeit des Kamerasystems erlaubten hierbei eine wesentlich höhere Vorwärtsgeschwindigkeit als durch die Auslegung des Ausbringsystems vorgegeben war.

Konformitäts- und Sicherheitsanalyse

Die gängigen Anforderungen an Gerätesicherheit und -gestaltung können in ausgeführten Geräten nachgewiesen werden. Die Anforderungsanalyse für den Betrieb auf kommunalen Bahnstrecken mit den jeweiligen individuell anwendbaren Normen, Vorgaben und Regulierungen muss für jedes im Sondermaschinenbau hergestellte Gerät separat betrachtet und umgesetzt werden. Durch die föderale Struktur kann keine geschlossene Analyse durchgeführt werden. Die modulare Konstruktion des Prototypen und die flexible Handhabung ermöglicht jedoch ein breites Anwendungsspektrum für kommunale und betriebliche Gleisanlagen.

Einbindung in ein Pflegekonzept

Der Aufbau und Einsatz eines Prototypen muss gut an die örtlichen Bedingungen angepasst sein und setzt eine ausführliche Bedienungsanleitung voraus. Darüber hinaus muss die Verwendung des Heißwasser-Geräts für die Vegetationskontrolle auf Gleistrassen in ein umfassendes Pflegekonzept eingebunden werden.

Ein solches Pflegekonzept setzt ein planerisches und systematisches Vorgehen voraus, um auch langfristig erfolgreich zu sein. Der bauliche Zustand der Gleistrasse und der Randwege ist dabei eine wesentliche Voraussetzung für eine geringe Ausgangsverunkrautung und für einen wirksamen Einsatz des Prototypen. Ein mangelhafter baulicher Zustand von Gleisanlagen und Randwegen erschwert die Unkrautbekämpfung und führt langfristig zu höheren Betriebskosten.

Schließlich sollten die Ausgangsverunkrautung und das Bekämpfungsziel bekannt sein und auch dokumentiert werden. Dazu bieten sich digitale GIS-Programme an, die bereits zur Erfassung georeferenzierter Daten verwendet werden. Die Ergebnisse geben Hinweise, um wichtige Stellschrauben am Gerät und im Einsatz zu verändern. Solche objektiven und valide Daten sollten auch mit anderen Nutzern ausgetauscht werden, um die thermische Vegetationskontrolle insgesamt zu verbessern.

Grundsätzlich sind im Vergleich zur chemischen Vegetationskontrolle mehr technische und biologische Kenntnisse und auch umfangreiche Erfahrungen erforderlich. Es kann von Vorteil sein, Behandlungen zu variieren, um zusätzliche Erkenntnisse für zukünftige Anwendungen zu gewinnen. Darüber hinaus sollten die Maßnahmen frühzeitig über die Vegetationsperiode geplant werden, wobei die immer noch geringe Flächenleistung des Prototypen zu berücksichtigen ist. Zeitfenster für die Behandlung müssen mit den Betriebs- und Fahrzeiten auf den Gleisen abgestimmt werden.

Schließlich sollte zur Überprüfung der Bekämpfungserfolg zumindest stichprobenartig erfasst und dokumentiert werden. Deutliche Abweichungen vom Bekämpfungsziel müssen analysiert werden. In solchen Fällen muss ggf. geklärt werden, ob Anpassungen am Gerät selbst (Temperatur, Modulbauweise etc.) oder bei der Anwendung (Termin, Fahrgeschwindigkeit etc.) notwendig sind. Weitere Hinweise

zum Pflegekonzept und Vegetationsmanagement auf Gleisen sind im JKI-Wissensportal Unkräuter auf Wegen und Plätzen zu finden (<https://wege-plaetze.julius-kuehn.de>)

Ökonomische und ökologische Effekte

Ein wichtiges Ziel des Projekts war es, durch eine Effizienzsteigerung der thermischen Unkrautbekämpfung die Wirtschaftlichkeit dieses herbizidfreien Verfahrens zu erhöhen. Betriebskosten hängen u.a. von variablen Personal- und Energiekosten ab. Abbildung 19 verdeutlicht jedoch, welche Einsparungen durch Teilflächenbehandlungen und durch höhere Flächenleistungen erzielt werden können. Eine detaillierte flächenbezogene Kostenkalkulation hängt stark von den individuellen Faktoren Personalbesatz, Ort und Art der Wasserfügbarkeit, vorhandene und angestrebte Verunkrautung ab. Schließlich beeinflussen auch die Erreichbarkeit und Befahrbarkeit z. B. mit Zwei-Wege-Fahrzeugen der Gleisanlagen die Verfahrenskosten.

Die Effizienzsteigerung ist eng korreliert mit ökologischen Vorteilen. Mit höherer Flächenleistung und Einsatz der Kameratechnik zur Teilflächenbehandlung sinkt der Energiebedarf deutlich und damit auch der CO₂-Ausstoß (Abb. 20). Ähnlich positiv sind Nebenwirkungen wie Lärmemissionen und Belastungen der Anwender zu bewerten.

Bereits im Vorfeld der Projektplanung sowie auch bei den vielfältigen Projektpräsentationen (siehe Öffentlichkeitsarbeit) wurde der mögliche Einfluss von Heißwasser auf die Fauna, insbesondere auf die Eidechsen diskutiert. Hierzu liegen kaum valide Daten vor, und es war auch nicht Ziel des Projekts, diese unerwünschten Nebenwirkungen zu untersuchen. Es liegt jedoch auf der Hand, dass der Habitat Schotter bzw. Eidechsen durch den Einsatz des Prototypen geschont werden, weil nicht die gesamte Fläche behandelt werden muss. Welche Bedeutung eine mögliche Schädigung von Eidechsen durch Heißwasser-Behandlungen haben könnte, konnte auch beim abschließenden Beiratstreffen nicht sicher geklärt werden.

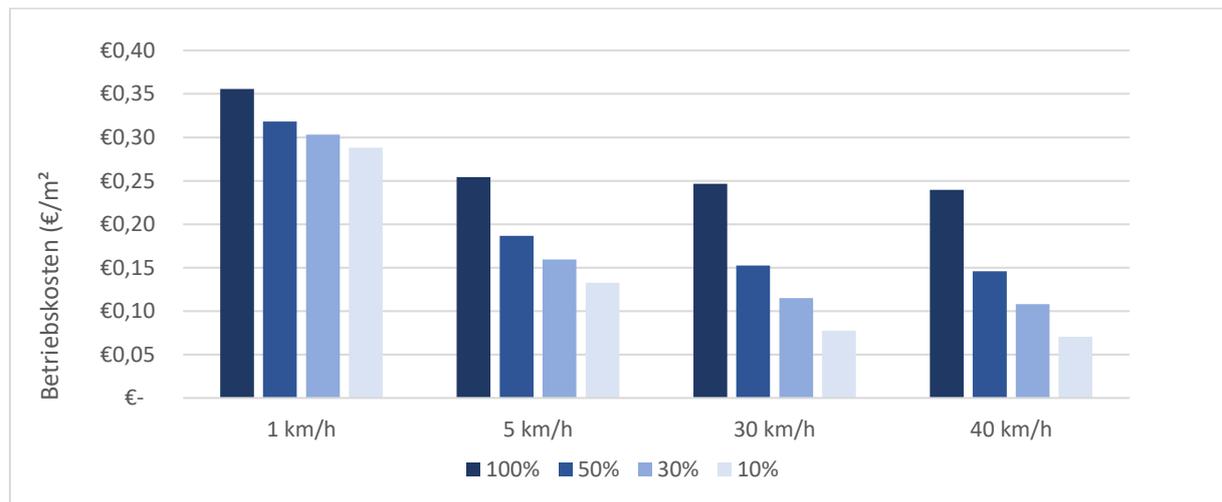


Abbildung 19: Kalkulierte Betriebskosten (€/m²) für eine einfache Behandlung in Abhängigkeit vom Anteil der behandelten Fläche und der Fahrgeschwindigkeit

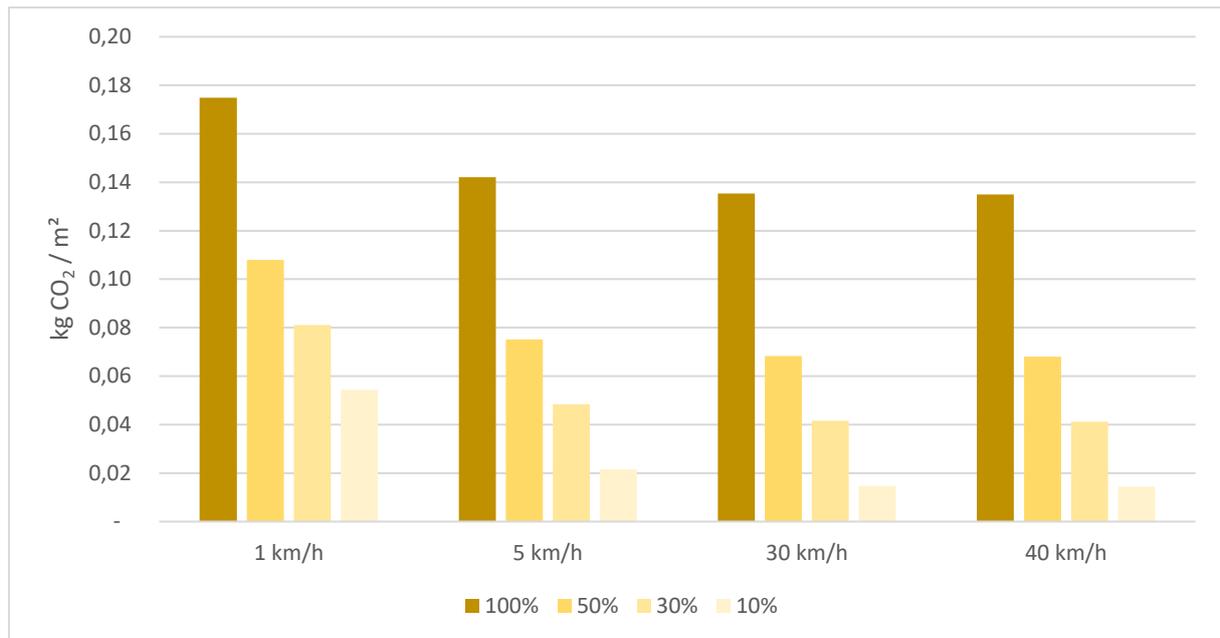


Abbildung 20: CO₂-Emmission für eine einfache Behandlung in Abhängigkeit vom Anteil der behandelten Fläche und der Fahrgeschwindigkeit

Um insgesamt die Innovation und Effizienz des GleisFrei-Prototypen mit dem aktuellen Stand der Technik zu vergleichen, wird auf die Bewertung von Nolte et al. (2018) zurückgegriffen. In dieser internationalen Studie wird das Heißwasserverfahren ganzheitlich für Gleisanlagen nach einer spezifischen Gewichtung (Tab. 1) bewertet. Abbildung 21 zeigt das Ergebnis übersichtsartig für die sechs definierten Hauptleistungen. Dabei wird aktuell von einem Verfahren ausgegangen, das die gesamte Trassenbreite behandelt und mit fossilen Brennstoffen betrieben wird. Prototyp I bezeichnet das hier entwickelte Gerät, das mit einer Fahrgeschwindigkeit von 2-4 km/h über die gesamte Trassenbreite arbeitet und ebenfalls fossile Brennstoffe nutzt. Der optimierte Prototyp II könnte basierend auf den neu gewonnenen Erkenntnissen mittelfristig mit 10 km/h fahren und mit grünem Wasserstoff oder anderen regenerativen Energiequellen betrieben werden. Sofern die Kamera- und Sensortechnik noch weiter verbessert werden kann, so dass sensible Bereiche (Signalanlagen, Eidechsen etc.) ausgespart werden, könnten mit dem Prototyp II noch bessere Ergebnisse erreicht werden.

Diese Auswertung zeigt, dass in Bezug auf Verfahrenskosten und bestimmter ökologischer Parameter der GleisFrei-Prototyp eine deutliche Verbesserung darstellt. Weitere Potenziale sind vorhanden, wenn die biologischen und technischen Erkenntnisse optimal umgesetzt werden (Abb. 21).

Tabelle 1: Bewertung von Leistungen bzw. Parametern des Heißwasserverfahrens auf Gleisanlagen, Noten: 0-5, 5= sehr gut

Leistung / Parameter	Gewichtung	Aktuell	Prototyp I	Prototyp II
1.1 Verfahrenskosten	100	2	3	4
1 Ökonomische Leistung	100	2	3	4
2.1 Arbeitsgeschwindigkeit	40	2	3	4
2.2 Behandlungshäufigkeit	40	3	3	3

2.3 Prozesse-Kompatibilität	20	4	4	4
2 Arbeits-Leistung I	100	2,8	3,2	3,6
3.1 Schadrisiko für Gleise	40	3	3	4
3.2 Schadrisiko für elektrische Anlagen	35	3	3	4
3.3 Sekundäre Effekte	25	3	3	4
3 Arbeits-Leistung II	100	3	3	4
4.1 Energieverbrauch	55	2	3	4
4.2 Wasserverbrauch	30	2	4	4
4.3 Emissionen	15	3	4	4
4 Umwelt-Leistung I	100	2,2	3,5	4,0
5.1 Umweltrisiko	40	5	5	5
5.2 Gesundheitsrisiko	40	3	3	3
5.3 Abbaubarkeit	20	5	5	5
5 Umwelt-Leistung II	100	4,2	4,2	4,2
6.1 Sicherheitsrisiko	30	3	3	4
6.2 Gesetzgebung	40	5	5	5
6.3 Akzeptanz	30	5	5	5
6 Soziale Verträglichkeit	100	4,4	4,4	4,7

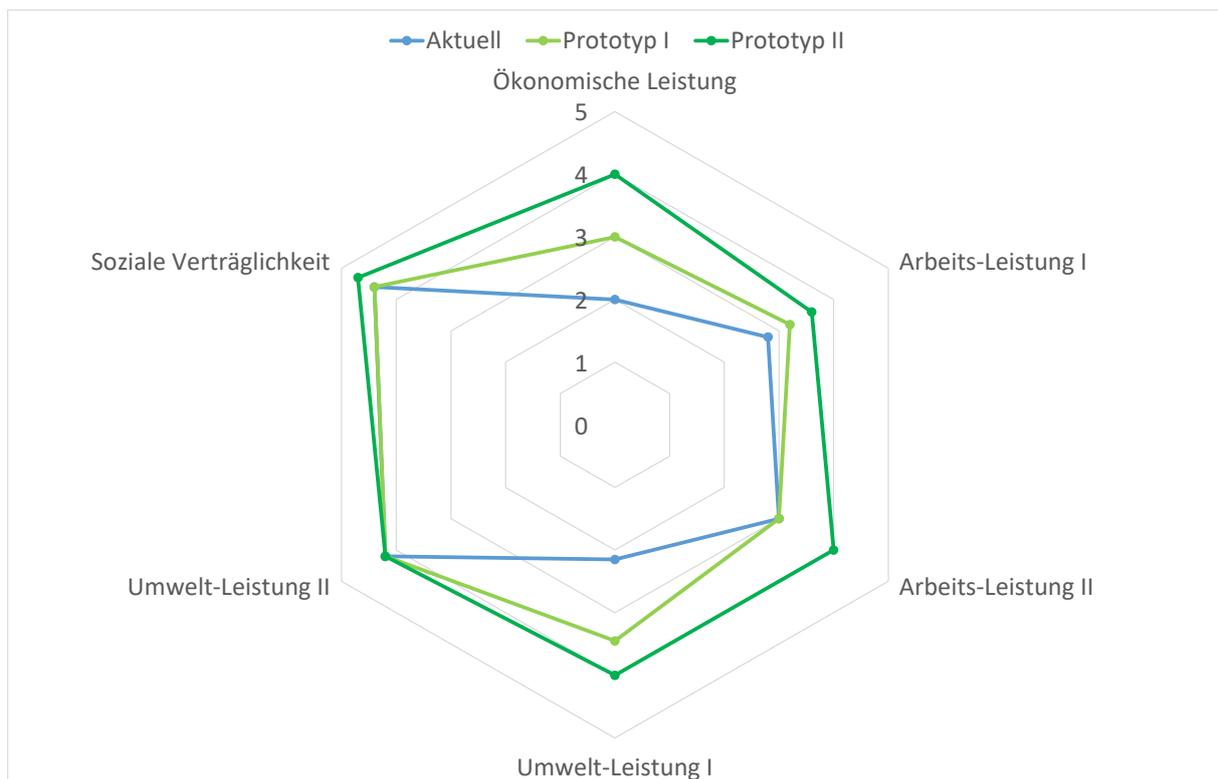


Abbildung 21: Bewertung der Hauptleistungen von Heißwasserfahren (aktuell im Vergleich zum Prototypen)

Öffentlichkeitsarbeit

Alle Aktivitäten im Rahmen des Projekts wurden von einem Beirat begleitet. Beteiligt waren sowohl Umweltverbände, Vertreter von Verkehrsbetrieben als auch Vertreter der Deutschen Bahn. Es fand ein erstes Zusammentreffen mit den Beiratsmitgliedern im Dezember 2021 statt (aufgrund der Corona-

Pandemie online). Ein weiteres abschließendes Beiratstreffen fand im Mai 2024 in Präsenz im Hafen Braunschweig statt.

Zu folgenden Gelegenheiten wurde die Projektarbeit vorgestellt:

- DBU Kick-Off Meeting zu der Förderinitiative „Vermeidung und Verminderung von Pestiziden in der Umwelt“, Osnabrück, 17. September 2021
- JKI-Fachgespräch „Wege & Plätze“ (virtuell), 16. Dezember 2021
- Beiratstreffen des Projekts (virtuell), 8. Dezember 2021
- Webinar der VDV-Akademie, Online-Veranstaltung, 9. September 2022
- DZFS-Fachtagung: Vegetationskontrolle entlang von Schienenwegen (virtuell), 29. September 2022
- JKI-Fachgespräch „Vegetationsmanagement auf Wegen, Plätzen und Gleisen“, Braunschweig, 4. Dezember 2023
- 31. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung, Braunschweig, 27.-29. Februar 2024
- Workshop der Arbeitsgruppe „Gleisanschluss“, Schkopau, 21. März 2024
- Beiratstreffen des Projekts, Hafen Braunschweig, 15. Mai 2024
- JKI-Fachtagung Vegetationsmanagement auf Wegen, Plätzen und Gleisen, Braunschweig, 4.-5. Juni 2024

Mit diesen Veranstaltungen konnten sehr viele Entscheidungsträger und Personen erreicht werden, die für die Vegetationspflege im Gleisbereich und Betriebsflächen verantwortlich sind. Der Hafen Braunschweig war direkt eingebunden in die Projektarbeit vor Ort, wodurch sich ein Austausch zu Anliegen und Problemen aus der Praxis ergab.

Des Weiteren erschienen Artikel zum Projektinhalt in den Fachzeitschriften „B_I galabau“, Kommunaltechnik, Der Flächenmanager, TASPO-Magazin sowie im Julius-Kühn-Archiv. Nachfolgend eine Auswahl von Artikeln, die frei zugänglich sind (Stand 22. Juli 2024):

Bauer, S. (2022): Kommunaltechnik: Wie lassen sich künftig Bahntrassen vegetationsfrei halten? B_I galabau, 12, 2022, 56-60, <https://www.janssen-landschaftspflege.de/wp-content/uploads/2023/01/Janssen-Landschaftspflege-Wie-lassen-sich-kuenftig-Bahntrassen-vegetationsfrei-halten.pdf>

Bauer, S. (2023): Vegetationsfreie Bahntrassen: Verzicht der DB auf Glyphosat spiegelt Stand der Forschung. B_I galabau. <https://bi-medien.de/fachzeitschriften/galabau/baupraxis/vegetationsfreie-bahntrassen-verzicht-der-db-auf-glyphosat-spiegelt-stand-der-forschung-g15488>

Fröhlich, L., Verschwele, A., Möllers, D. (2024): Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen mit Heißwasser „GleisFrei“, in: Tagungsband: 31. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung; 27.-29. Februar 2024, Braunschweig, Julius-Kühn-Archiv. 31. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung; Braunschweig, 2024.02.27-29, Julius Kühn-Institut, Quedlinburg, 42. <https://doi.org/10.5073/20240108-112103-0>

Verschwele, A. (2024): Fachtagung: Vegetationsmanagement auf Wegen, Plätzen und Gleisen - Was gibt es Neues? JKI-Wissensportal, <https://wissen.julius-kuehn.de/wege-plaetze/tagung>

Fazit

Die wesentlichen Hypothesen und Ziele des Projekts „GleisFrei“ wurden bestätigt bzw. erreicht. Umfangreiche Wirkungsversuche konnten zeigen, dass Heißwasser-Behandlungen deutlich effektiver sind, wenn sie mit Heißluft und Heißschaum kombiniert werden. Für einen ausreichenden Bekämpfungserfolg sind mehrfache Behandlungen mit Temperaturen von über 80 °C erforderlich, wobei mit annähernd 100 °C signifikant höhere Wirkungsgrade erzielt werden.

Als herausfordernd stellte sich die Konstruktion der Düsen sowie die Entwicklung der Kamertechnik und die digitale Pflanzenerkennung heraus. Beides ist in der erforderlichen Form nicht auf dem Markt verfügbar, konnte aber während der Projektlaufzeit optimiert werden.

Die Module des Prototypen konnten grundsätzlich wie geplant entwickelt und technisch umgesetzt werden. Es wurde belegt, dass damit deutliche Effizienzsteigerungen im Vergleich zu bisher verfügbaren Heißwassergeräten erreicht werden konnten, die einhergehen mit den notwendigen ökonomischen und ökologischen Vorteilen. Die technischen Innovationen sollten daher auch für andere befestigte urbane Flächen zum Einsatz kommen.

Eine erfolgreiche Verwendung des Prototypen für die Vegetationskontrolle auf Gleistrassen muss in ein langfristiges und umfassendes Pflegekonzept eingebunden werden.

Literaturangaben

- Ascard, J. (1995): Effects of flame weeding on weed species at different developmental stages. *Weed Research* 35, 397-411.
- Atmatzidis, E.; Behrendt, S.; Kreibich, R.; Seidemann, Th. (1995): Ökologischer Vergleich der Verfahren zur Vegetationskontrolle bei der Deutschen Bahn AG unter Berücksichtigung von Kostenberechnungen. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Werkstattbericht 22, ISBN 3-929173-22-0, https://www.izt.de/fileadmin/downloads/IZT_WB22.pdf.
- Below, M. (2016): Leitlinien zum Vegetationsmanagement bei der Deutschen Bahn. In: Verschwele, A. (Hrsg.) (2016): Erfolgreiches Unkrautmanagement auf Wegen und Plätzen, Erling-Verlag GmbH & Co KG, ISBN: 978-3-86263-128-5, 46-52.
- Bohren, Ch.; Adolph, G.; Tanner, L. (2020): Wirkungsvergleich Heißwasser und Herbizid – Schweizer Bahnen wollen ab 2025 weitgehend auf Herbizideinsatz verzichten. *Julius-Kühn-Archiv* 464, 420-426.
- Brandes, D. (2016): Vegetationsökologie von Wegen und Plätzen. In: Verschwele, A. (Hrsg.) (2016): Erfolgreiches Unkrautmanagement auf Wegen und Plätzen, Erling-Verlag GmbH & Co KG, ISBN: 978-3-86263-128-5, 7-26.
- Dittrich, R.; Degenkolb, L.; Schuck, M.; O. Dittrich (2012): Unkrautauftreten auf Wegen und Plätzen in Sachsen und Wirkung thermischer Bekämpfungsverfahren. *Journal für Kulturpflanzen* 64, 196-204.
- Eggers, Th.; Zwerger, P.; Aderhold, D. (2001): Bewuchsentwicklung und Bildung typischer Pflanzenbestände auf Gleisanlagen. *Nachrichtenblatt Deutscher Pflanzenschutzdienst* 52, 91-97.

- Hallmann, C.; Seppelt, R. (2002): Statistische Auswertung zum DB-Projekt „Reduzierte Aufwuchsbeseitigung. Abschlussbericht der TU Braunschweig, Institut für Geoökologie, Langer Kamp 19c, 38106 Braunschweig, 79 Seiten.
- Laermann, H.-Th. (1985): Verkehrssicherheit und Umweltschutz – Aufwuchsbekämpfung auf Gleisanlagen bei der Deutschen Bundesbahn. Mitteilungen der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Heft 229.
- Melander B.; Holst, N.; Grundy, A.C.; Kempenaar, C.; Riemens, M.M.; Verschwele, A.; Hansson, D. (2009): Weed Occurrence on Pavements in Five European Towns. *Weed Research* 49, 516–525.
- Nolte, R.; Behrendt, S.; Magro, M. (2018): Herbie – Guidelines, State of the Art and Integrated Assessment of Weed Control and Management for Railways. ISBN: 978-2-7461-2775-3, International Union of Railways, Paris; https://uic.org/IMG/pdf/herbie_project_2.pdf.
- Rask, A.M.; Kristofferson, P. (2007): A Review of Non-chemical Weed Control on Hard Surfaces. *Weed Research* 47, 370-380.
- Sölter, U.; Verschwele, A. (2014): Thermal, mechanical and chemical control of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) in different habitats. *Julius-Kühn-Archiv* 443, 507-510.
- Tanner, L. (2020): Probleme der automatischen Pflanzenerkennung im Gleisbett. Persönliche Mitteilung der SBB AG (Bern) vom 09.06.2020.
- Verschwele, A. (2006): Unkräuter auf Wegen und Plätzen – erste Ergebnisse aus dem CleanRegion-Projekt. *Mitteilungen der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* 400, 244-245.
- Verschwele, A. (2012): Unkräuter auf Wegen und Plätzen und ihre Bekämpfung. *Julius-Kühn-Archiv* 434, 273-280.
- Verschwele, A.; Stieg, D. (2016): Entwicklung eines Standard-Prüfverfahrens für Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung. *Julius-Kühn-Archiv* 452, 471-476.