



Waldbrandbekämpfungstechnologien

Themenkurzprofil Nr. 60 | Julia Czerniak-Wilmes • Tobias Jetzke | Februar 2023

In ganz Deutschland verbrennen jährlich mehrere Tausend Hektar Wald, wobei Hunderttausende Tonnen CO₂-Äquivalente ausgestoßen werden. Neben ökologischen Folgen verursachen Waldbrände auch ökonomische Schäden und können negative gesundheitliche Folgen haben. Im Zuge der Klimaerwärmung und der hieraus resultierenden erhöhten Trockenheit der Wälder steigt in Deutschland das Waldbrandrisiko. Aufgrund stark unterschiedlicher Gegebenheiten in den deutschen Wäldern – etwa klimatischen Bedingungen, Topografien oder Baumbestand – sind verschiedene Regionen auch unterschiedlich stark betroffen.

Waldbrandbekämpfung erfordert ein effizientes, ganzheitliches Management, welches Prävention, Früherkennung sowie die eigentliche Feuerbekämpfung umfasst. Zur technischen Unterstützung der Waldbrandprävention werden aktuell Prognosetools mit Algorithmen künstlicher Intelligenz (KI) entwickelt, die, anhand von Daten unterschiedlicher optischer oder meteorologischer Sensoren, die Risikobewertung durch präzisere Vorhersagen verbessern. Zur Früherkennung von beginnenden Bränden eignen sich unterschiedliche Monitoringtechnologien wie Satelliten, Drohnen (bestückt mit optischen Sensoren wie z.B. Infrarotkameras) oder bodennahe Sensornetze (ausgestattet u.a. mit Gassensoren). Solche Systeme sind in Ländern mit einer längeren Waldbrandhistorie bereits etabliert. Auch die Europäische Union bietet mit ihrem System „EFFIS“ einen Ansatz zur Waldbrandprävention und -früherkennung an. Auf nationaler Ebene existiert in Deutschland der Waldbrandgefahrenindex zur Risikoeinschätzung sowie die „IQ FireWatch“ zur Waldbrandfrüherkennung.

Aufgrund der örtlichen Zugänglichkeiten der Waldgebiete variieren die Anforderungen an Technologien zur Brandbekämpfung und hängen stark von den ge-

bietspezifischen Gegebenheiten ab. Löschfahrzeuge müssen geländegängig sein sowie im Falle besonderer Gefährdung durch z.B. munitionsbelastete Böden auch Schutz für die Einsatzkräfte bieten. Unbemannte ferngesteuerte oder autonom fahrende Fahrzeuge bieten das Potenzial, die Brandbekämpfung zu unterstützen, sind allerdings bislang noch Teil von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Auch Technologien, die die Kommunikation der Einsatzkräfte vor Ort unterstützen und Echtzeitsituationsberichte erstellen, wie fliegende 5G-Antennen für mobile Funknetze oder unbemannte Segelflieger für Echtzeitbildmaterial, sind noch Gegenstand der Forschung.

Waldbrandbekämpfung bzw. der Waldschutz ist in der Zuständigkeit der Bundesländer verortet. Aufgrund der unterschiedlichen Betroffenheit setzen einzelne Bundesländer verschiedene Schwerpunkte im Rahmen von Aktionsplänen zur Waldbrandbekämpfung inklusive hier relevanter Ansätze zur innovativen Technologie-nutzung.

Hintergrund und Entwicklung

Gemäß Waldbrandstatistik gab es in Deutschland 2018 und 2019 die meisten Waldbrände seit 15 Jahren (1.708 bzw. 1.523 Ereignisse) und die verbrannte Waldfläche erreichte 2019 mit rund 2.711 ha einen Spitzenwert (BLE 2022, S.21). In den darauffolgenden beiden Jahren sanken sowohl die Anzahl der Brände (2021: 548 Brände) als auch die verbrannte Fläche (2020: 369 ha, 2021: 148 ha) wieder, doch für 2022 deuten sich neue Spitzenwerte an (BLE 2022). Bis zum November 2022 sind bereits rund 4.239 ha Wald verbrannt (EK 2022a) und damit deutlich mehr als 2019.

Aufgrund der klimatischen und hydrologischen Gegebenheiten sowie der Waldzusammensetzung treten Waldbrände

regional sehr unterschiedlich auf. 2021 gab es die meisten Waldbrände in den Bundesländern Brandenburg, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen (BLE 2022). Insbesondere Brandenburg weist wegen der sandigen, trockenen Böden und der vorherrschenden Kiefernwälder ein hohes Waldbrandrisiko auf.

In Deutschland lassen sich lediglich 2 % der Waldbrände auf natürliche Ursachen wie Blitzschlag zurückführen (BLE 2022). Bekannte weitere Ursachen sind Fahrlässigkeit und Brandstiftung. Hinzu kommen andere handlungsbedingte Einwirkungen, wie z.B. die Entzündung von Munition auf Truppenübungsplätzen. Für etwa die Hälfte aller Waldbrände in Deutschland sind die Ursachen unbekannt. Das Klima und die Witterung haben jedoch einen maßgeblichen Einfluss auf das Waldbrandrisiko. Es wird davon ausgegangen, dass das Waldbrandrisiko im Zuge des Klimawandels aufgrund von steigenden Temperaturen und rückläufigen Niederschlägen zukünftig weiter ansteigen wird (Schimmelpfennig et al. 2018).

Neben dem Klimawandel ist ein weiterer brandbegünstigender Faktor die Baumartenzusammensetzung in Deutschlands Wäldern. Zu einem Großteil (54 %) weisen die deutschen Wälder Nadelholzbestände auf. Wegen der Holzeigenschaften von Nadelbäumen (etwa einem erhöhten Harzanteil) können sie schneller entflammbar sein als Mischkulturen oder Laubbäume (UBA 2022b; WBW 2021). Dies geht auch aus einer Betrachtung der Waldbrandflächen nach Baumbestand hervor: Von 2011 bis 2021 verbrannten deutlich mehr Nadelholz- als Laubbaumbestände. Der höchste Wert wurde 2019 erreicht mit weit mehr als doppelt so viel verbrann-

ter Nadelholzfläche (1.986 ha) im Vergleich zu verbrannter Laubbaumfläche (726 ha) (BLE 2022).

Herausforderungen für die Waldbrandbekämpfung in Deutschland

Herausforderungen für die Waldbrandbekämpfung ergeben sich in Deutschland aus den regional stark unterschiedlichen Voraussetzungen hinsichtlich Zugänglichkeit der Wälder. Das zerklüftete Gebiet der Sächsischen Schweiz oder munitionsbelastete Gebiete in Brandenburg (Banner/Neumeyer 2022) sind Beispiele für Gebiete, die für Einsatzfahrzeuge kaum erreichbar sind bzw. nur unter erhöhter Lebensgefahr für die Einsatzkräfte (Smolka 2022). Auch die Befahrbarkeit von Zufahrtswegen kann regional unterschiedlich sein und die Zugänglichkeit von Waldgebieten beeinträchtigen (MI NRW/MLV NRW 2022).

Ein zusätzlicher Faktor, der die Waldbrandbekämpfung in einigen Gebieten in Deutschland erschwert, ist die mangelhafte Löschwasserversorgung insbesondere in Gebieten ohne Oberflächengewässer. In Nordrhein-Westfalen z.B. existieren geeignete Wasserentnahmestellen wie Talsperren lediglich in der Eifel, im Sauerland oder im Bergischen Land. Industrielle Gewässer wie Baggerseen finden sich vornehmlich im Ruhrgebiet, Münsterland oder Nord-Ostwestfalen. Allerdings können die Kapazitäten vorhandener Löschwasserstellen zu gering sein oder die genauen Standorte sind nicht ausreichend kartiert (MI NRW/MLV NRW 2022).

Eine weitere Herausforderung besteht in einer zum Teil unzureichenden Mobilfunknetzinfrastruktur (BMI 2022), die



während eines Einsatzes vor Ort die Kommunikation der Einsatzkräfte erschwert. Die Einsatzkommunikation der Feuerwehr in Deutschland basiert in der Regel auf einer reinen Sprachkommunikation bei der Übermittlung der Einsatzpläne an die verschiedenen Löschtrupps. Für eine effektive Brandbekämpfung wäre jedoch eine Übertragung von größeren Datenmengen sowie Bild- und Videomaterial an die Einsatzkräfte vor Ort wünschenswert, da erst detaillierte Kenntnisse über das Auftreten sowie die Ausbreitung des Brandes eine Echtzeitbeurteilung der jeweiligen Lage ermöglichen. Bild- und Videomaterial kann beispielsweise von Flugzeugen oder Drohnen geliefert werden. Digitale Karten mit regelmäßigen Aktualisierungen können von jeweiligen Einsatzzentralen übermittelt werden. Die Übertragung dieser Informationen ist allerdings nur dort möglich, wo ausreichend stabile und leistungsfähige Mobilfunknetze verfügbar sind. Insbesondere in ländlichen Regionen ist dies zurzeit nur sehr begrenzt der Fall (Seifert et al. 2022).

Letztlich erschweren auch unklare Besitzverhältnisse die Umsetzung von Maßnahmen zum Waldschutz. Ein Großteil der Waldfläche in Deutschland ist im Privatbesitz, jedoch besitzen die rund 1,8 Mio. Waldbesitzer/innen durchschnittlich jeweils nur 2,5 ha Waldfläche. Maßnahmen zum Brandschutz bedürfen der Zustimmung und zum Teil sogar der Unterstützung durch die Besitzer/innen, etwa bei der Bohrung von Löschwasserbrunnen oder dem Anlegen von Brandschutzwegen. Sind die Besitzverhältnisse ungeklärt, etwa weil Waldbesitzer/innen nicht auffindbar oder kontaktierbar sind, können einzelne Maßnahmen nicht umgesetzt werden (Rademaker 2022). Um der Waldbrandsituation zukünftig in Deutschland effizient entgegenzuwirken und die Ausmaße von Waldbränden zu minimieren, hat ein effektives Waldbrandmanagement nicht erst bei der Brandbekämpfung anzusetzen, sondern muss auch Prävention sowie Früherkennung umfassen.

Technologien zur Prävention von Waldbränden

Präventive Maßnahmen sind beispielsweise Waldpflege oder waldbauliche Maßnahmen wie Mischkulturbeforstung, die Errichtung von Schutzstreifen oder der Aufbau geeigneter Infrastrukturen wie Löschteiche oder befahrbare Straßen (Seifert et al. 2022). Vor dem Hintergrund der in den meisten Fällen durch menschliche Fahrlässigkeit verursachten Entstehung von Waldbränden sind ebenso eine Sensibilisierung und eine Bewusstseinsbildung der Bevölkerung unabdingbar (Moser 2022).

Über diese vorbeugenden Maßnahmen hinaus lassen sich auch innovative Technologien für die Waldbrandprävention nutzen. Dazu gehören vor allem prognostische Verfahren, mit denen Vorhersagen über das Waldbrandrisiko sowie die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Waldbrandes und den möglichen Verlauf getroffen werden sollen (Pang et al. 2022; Sundblad et al. 2021). Prognostische Verfahren berücksichtigen verschiedene Variablen wie Bodenbeschaffenheit, Temperatur, Niederschlag oder Windgeschwindigkeit.

Aufgrund der Vielzahl an Variablen, die miteinander in Wechselwirkung stehen, und der damit verbundenen Unsicherheiten sowie der Notwendigkeit einer Echtzeitvorhersage zur effizienten Brandbekämpfung stellt die akkurate Prognose von Waldbränden eine große Herausforderung dar (Brun et al. 2017). Die Vorhersagegenauigkeit eines Prognosetools ist abhängig von dem Informationsbedarf, der sich aus dem Einsatzzweck ergibt, d.h., ob beispielsweise spezifische Informationen über die Ausbreitung eines Feuers oder über die jeweilige Flammenhöhe benötigt werden (Drury 2019).

Zur Bestimmung des Waldbrandrisikos ist in Deutschland der Waldbrandgefahrenindex etabliert. Auf Basis meteorologischer Daten (Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Niederschlags- bzw. Schneemenge) wird für Deutschland das meteorologische Potenzial für die Gefährdung durch Waldbrände auf einer Skala von 1 (sehr geringe Gefahr) bis 5 (sehr hohe Gefahr) modelliert.¹

Ein von der Europäischen Kommission im Rahmen des Copernicus-Erdbeobachtungsprogramms verwaltetes Tool ist das „European Fire Information System“ („EFFIS“)². „EFFIS“ enthält fünf verschiedene Module von der Prävention bis zur Analyse der Auswirkungen von Waldbränden in Europa:

- Bewertung der Brandgefahr,
- schnelle Schadensbeurteilung (aktive Brandmeldung, Bewertung des Schweregrades sowie der Schädigung der Bodenbedeckung),
- Beurteilung der Emissionen und Rauchdispersion,
- Analyse des potenziellen Bodenabtrags sowie
- Analyse der Regeneration der Vegetation.

Zur Bewertung der Brandgefahr (Modul 1) wurde der „Wild-fire Risk Viewer“³ entwickelt, eine Webanwendung, die eine satellitenbasierte Kartenansicht von Europa bietet und u.a. die Darstellung dreier unterschiedlicher Risikokategorien von 1 (geringes Risiko) bis 3 (hohes Risiko) ermöglicht. Die Einordnung in diese unterschiedlichen Kategorien basiert auf einer Kombination der Effekte von Waldbränden u. a. auf Menschen, Ökosysteme und Gütern in gefährdeten Gebieten (EK 2022b, S. 25). Die Kartenansicht lässt sich zusätzlich mit verschiedenen Ebenen, wie der der Vegetation, Bodenbeschaffenheit oder Art der Nutzfläche, überlagern.

Zu den international weitverbreitetsten Systemen zur Waldbrandrisikoprognose gehört das „BehavePlus Fire Modeling System“⁴, das z.B. in den USA und Kanada genutzt wird (Andrews 2014). Dabei handelt es sich um ein Windows-basiertes Softwareprogramm, mit dem Brandverhalten und Auswirkungen modelliert werden sollen. Darüber hinaus existieren

1 <https://rcccm.dwd.de/DE/leistungen/waldbrandgef/waldbrandgef.html> (6.1.2023)
2 <https://effis.jrc.ec.europa.eu/> (8.12.2022)
3 <https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps/fire.risk.viewer/> (16.12.2022)
4 <https://www.frames.gov/behavplus/home> (16.12.2022)

tieren weitere Vorhersagetools wie „RedAPP“ (McLoughlin 2015), „CanFIRE“ (de Groot 2012) und „CFIS“ (Alexander/Cruz 2021). Der „Santa Ana Wildfire Threat Index“⁵ des Bundesstaates Kalifornien liefert analog zum deutschen Waldbrandgefahrenindex eine 6-tägige Vorhersage des Waldbrandrisikos. Ziel ist u. a. die Sensibilisierung der Bevölkerung für die Waldbrandprävention und bestenfalls lässt sich anhand solcher Prognosen und Risikoindizes die Reaktionszeit zur Waldbrandbekämpfung maßgeblich reduzieren.

Um die Leistungsfähigkeit von prognostischen Verfahren zur Vorhersage des Waldbrandrisikos bzw. der Waldbrandwahrscheinlichkeit zu verbessern, wird der Einsatz von Machine-Learning-(ML-)Algorithmen untersucht. Dabei werden verschiedene Daten kombiniert, beispielsweise Messdaten zu Luftfeuchtigkeit, Temperatur oder Niederschlag, sowie auch Satelliten- und Drohnenbilder. Die Verknüpfung unterschiedlicher Datenquellen ermöglicht es mitunter, bestimmte Merkmale wie beispielsweise trockene Pflanzen in hoher Auflösung zu erkennen. Auf der Grundlage der erfassten Daten lassen sich Features, d.h. relevante wiederkehrende Muster in den Daten, identifizieren (Sundblad et al. 2021). Diese Features wiederum können als Trainingsdaten verwendet werden und ermöglichen das Trainieren von ML-Algorithmen. Wendet man den Algorithmus auf umfassende und aktuelle Datensätze an, können sowohl Prognosen erstellt als auch das Ausmaß von Waldbränden simuliert werden (Sundblad et al. 2021).

Um die bislang in Deutschland eingesetzten Systeme zur Ermittlung der Waldbrandgefahr zu erweitern und zu verbessern, entwickelt die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung aktuell gemeinsam mit 46 wissenschaftlichen europäischen Institutionen ein ganzheitliches Brandmanagementsystem auf Basis von KI und ML-Algorithmen, mit dem sich das Entstehungsrisiko von Waldbränden präziser vorhersagen lassen soll (BAM 2022).

Technologien zur Früherkennung von Waldbränden

Das Ausmaß eines Brandes kann sich bereits in den ersten 30 Minuten nach der Entstehung deutlich abzeichnen (Zimmermann 2022). Der Brandfrüherkennung kommt daher eine besondere Bedeutung für die Effektivität und Effizienz der Bekämpfung zu. Ein Frühwarnsystem ist ein System, welches die Waldfläche mittels Satelliten, unbemannten Luftfahrzeugen oder drahtloser Sensorik kontinuierlich überwacht, um beispielsweise anhand von Wärmebildkameras Hitzepunkte in Wäldern sowie das Ausmaß der Brandfläche zu erkennen.

Ein Vorteil satellitenbasierter Frühwarnsysteme ist die großflächige Ermittlung von Brandherden auf Basis von Wärmebildern der Erdoberfläche (Sundblad et al. 2021). Mittlerweile finden sich zahlreiche Beispiele für Systeme, die anhand



von Satellitenbildern die Früherkennung von Waldbränden ermöglichen:

- Das von der National Aeronautics and Space Administration (NASA) bereitgestellte Tool „Fire Information for Resource Management Systems“ („FIRMS“)⁶, das basierend auf Satellitendaten des „Moderate-Resolution Image Spectroradiometer“ („MODIS“)⁷ weltweit in Echtzeit aktive Feuer und thermische Anomalien darstellt (Giglio et al. 2016).
- Das europäische Tool „EFFIS“ greift zur Waldbrandfrüherkennung auf Satellitendaten des Copernicus-Programms zurück (Sundblad et al. 2021).
- Der „SEVIRI-Monitor“ (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager)⁸ der Meteosat Second Generation (MSG)⁹ ist ein durch 13 ESA-Mitglieder ins Leben gerufenes Programm, welches vier meteorologische Satelliten betreibt. Es dient als satellitenbasiertes Frühwarn- und Überwachungstool, das z. B. im Jahr 2007 eingesetzt wurde, um großflächige Brände in Griechenland zu erkennen und zu überwachen (Sifakis et al. 2011).

Nachteil der satellitenbasierten Waldbranddetektion ist, dass die meisten dafür nutzbaren Erdbeobachtungssysteme nur Satellitenbilder mit beschränkter Auflösung zur Verfügung stellen, was eine präzise Lokalisation der brennenden bzw. verbrannten Fläche erschwert (Sundblad et al. 2021). Des Weiteren ist ein wolkenfreier Himmel für die genaue Bestimmung der Oberflächentemperatur Voraussetzung, da ansonsten die Temperatur der Wolkengrenze erfasst wird (DWD 2017).

5 <https://fsapps.nwcg.gov/psp/sawti> (16.11.2022)

6 <https://firms2.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#t:adv;d:2022-07-17.2022-07-18;@57.0,0.0,3z>, (16.11.2022)

7 Instrument auf einem NASA-Satelliten, welches täglich Daten über die Temperatur der Atmosphäre, Feuchtigkeit etc. übermittelt

8 <http://195.251.203.238/seviri/> (16.11.2022)

9 <https://earth.esa.int/eogateway/missions/meteosat-second-generation> (10.1.2023)

Um die genannten Nachteile ausgleichen zu können, können Satellitenbilder mit weiteren Sensordaten kombiniert werden, um ein umfassendes Bild einer Brandsituation zu erhalten (Fischer 2021). Durch Nutzung von Video-, Infrarot- und Thermalkameras sowie RGB- und Gassensorik können Daten über Temperatur- und Raumentwicklung erfasst werden. Derartige Sensorsysteme können sowohl stationär und bodennah eingesetzt werden, etwa indem sie in Bäumen oder auf Mobilfunkmasten angebracht werden, als auch mobil und aus der Luft, indem sie an Drohnen montiert werden (Jablonski 2020; Löb 2020). Allerdings sind bei der Wahl von Sensorsystemen die jeweiligen Eigenschaften zu berücksichtigen. Optische Sensoren (z.B. RGB¹⁰-Kamera) sind lediglich bei guten Lichtverhältnissen einsetzbar, wohingegen Infrarot-, Thermal- und Gassensoren unabhängig von der Tageszeit zuverlässig Daten erfassen können. Zudem weisen mobile und stationäre Systeme Eigenschaften auf, die berücksichtigt werden müssen. Zwar kann aus der Luft eine große Fläche überwacht werden, eine lückenlose, dauerhafte Überwachung von Wäldern unter Verwendung von Drohnen ist aufgrund der begrenzten Akkukapazität jedoch nicht möglich. Bodennahe Sensoren hingegen können nur dann eine hohe Auflösung und eine hohe Präzision bei der Erkennung von Brandmerkmalen erreichen, wenn ein dichtes Sensornetz aufgebaut wird. Ein Beispiel für ein stationäres Früherkennungssystem ist das in den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Niedersachsen, Sachsen und Sachsen-Anhalt seit 2001 genutzte System „IQ FireWatch“ (Seifert et al. 2022), bei dem unterschiedliche Kameras auf Windkraftanlagen, Mobilfunkmasten oder anderen Anlagen, wie beispielsweise Aussichtstürmen, montiert sind (Fischer 2021). Zur Waldbrandfrüherkennung werden auch weitere Ansätze verfolgt, wie beispielsweise die Nutzung von Smartphone-Apps, die Personen nutzen können, um die Entdeckung eines Waldbrandes sowie dessen GPS-Daten zu melden (Seifert et al. 2022).

Das noch in Entwicklung befindliche IoT-Sensornetzwerk „DRYAD“ des deutschen Start-ups Dryad Networks GmbH soll anhand solarbetriebener Gassensoren nicht nur Waldbrände frühzeitig erkennen, sondern auch weiterführende Analysen ermöglichen, etwa zur Bestimmung der Raumentwicklung oder des Schadensausmaßes.¹¹ Der Einsatz von Gassensoren ist darüber hinaus auch Gegenstand von Forschungsarbeiten, etwa im Rahmen des 5G-Waldwächter-Projekts der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus Senftenberg (BTU 2022).

Technologien zur Waldbrandbekämpfung

Eine vorhandene Infrastruktur aus Straßen, die für Löschfahrzeuge befahrbar sind, sowie Wasserentnahmestellen sind zur effektiven und effizienten Bekämpfung eines Waldbrandes unabdingbar (Seifert et al. 2022). Während eines

Einsatzes sind weiterhin geeignetes Equipment für die Einsatzkräfte, ausreichende Transportkapazitäten sowie Löschgeräte für die erfolgreiche Waldbrandbekämpfung unverzichtbar. Zum Vordringen in zerklüftete Waldgebiete eignen sich die für die Straße ausgelegten Löschfahrzeuge der Feuerwehr nur bedingt. Hierzu sind neben Löschflugzeugen/-hubschraubern geländegängigere Fahrzeuge erforderlich, wie beispielsweise Kettenfahrzeuge (Seifert et al. 2022). In einigen Jahren könnten zusätzlich Löschdrohnen eingesetzt werden (Zeit Online 2022). Darüber hinaus können gebietsspezifische Besonderheiten, etwa munitionsbelastetes Gelände, extreme Gefahren bergen. Löschaktivitäten in solchen Gebieten bedingen den besonderen Schutz der Einsatzkräfte und den Einsatz von gepanzerten oder ggf. auch ferngesteuerten Löschfahrzeugen. Beim 2022 durch massive Sprengkörperexplosionen entstandenen Brand im Grunewald in Berlin war beispielsweise der Einsatz sowohl von Löschpanzern als auch -robotern erforderlich, da es den Einsatzkräften anders nicht möglich war, näher an die munitionsbelasteten Brandherde heranzukommen (RND 2022a). Um künftig die Nutzung autonomer Löschroboter zu erleichtern, wird im Deutschen Rettungsrobotik-Zentrum e. V. in Dortmund aktuell ein Kompetenzzentrum aufgebaut, in dem Wissenschaftler/innen, Firmen und Anwender/innen gemeinsam unterstützende Rettungsroboter in realistischen Testumgebungen erproben können (DRZ 2021; Seifert et al. 2022).

Neben geeigneten Löschfahrzeugen gehört zur effizienten Waldbrandbekämpfung außerdem die Gewährleistung der Kommunikation zwischen den Einsatzkräften, welche insbesondere in ländlichen Regionen in Deutschland aufgrund mangelnder Verfügbarkeit von Mobilfunknetzen erschwert sein kann (BMI 2022). Im Rahmen von Forschungsarbeiten der TH Wildau (2022) wird daher im Projekt „ALADIN“ der Einsatz einer mobilen 5G-Antenne zur Unterstützung der Kommunikation der Einsatzkräfte bei Waldbränden in Kom-



¹⁰ Definition des RGB-Farbraums: <https://www.ionos.de/digitalguide/websites/webdesign/rgb-farben/> (6.2.2023)

¹¹ <https://de.dryad.net/> (6.1.2023)

bination mit einem unbemannten Motorsegler sowie einer unbemannten Löschraupe untersucht (Smolka 2022). Vorteile des Segelfliegers gegenüber propellerbetriebenen Drohnen sind die lange Flugzeit von bis zu 8 Stunden, währenddessen Bilder des Einsatzortes in Echtzeit übertragen werden können (Smolka 2022). Zur Steuerung des automatisierten Fluges ist lediglich das Setzen von Wegepunkten erforderlich, sodass sich die Einsatzkräfte auf die Kernaufgabe des Brandlöschens konzentrieren können.

Um den Einsatzkräften Echtzeitinformationen zur Verfügung zu stellen, werden in den USA Einsatzmanagementtools (Incident Management Tools) verwendet. Dabei handelt es sich um Softwaretools, die relevante Daten wie Bilder des Einsatzortes, Witterungsbedingungen oder Evakuierungszonen live übertragen und eine Plattform zur Koordination von Waldbrandeinsätzen bieten (MIT Lincoln Laboratory 2018). Vergleichbare Systeme existieren in Deutschland bereits zur Entscheidungsunterstützung für das Katastrophenmanagement von Krankenhäusern und haben auch im Zuge der Flutkatastrophe im Ahrtal stärkere mediale Aufmerksamkeit erhalten. In diesem Zusammenhang forschte das Geographische Institut Heidelberg (2022) der Universität Heidelberg an der Entwicklung und Bereitstellung von „Disaster Maps“ bzw. Werkzeugen für das Monitoring, die Geo- und Social-Media-Daten für das Katastrophenmanagement kombinieren. Auch in Waldbrandsituationen könnten solche Tools eine Ergänzung zu bestehenden Lageinformationen bieten und die Einsatzkräfte bei der Koordinierung im Einsatzgebiet unterstützen.

Gesellschaftliche und politische Relevanz von Waldbrandbekämpfungstechnologien

Waldbrände stellen sowohl aus Sicht des Umwelt- und Klimaschutzes als auch im Hinblick auf den Gesundheitsschutz eine Herausforderung dar. So gelangen durch Waldbrände Feinstaubpartikel in die Luft, welche Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen auslösen können (Parington 2021). Bei jedem Brand werden zudem Treibhausgase freigesetzt, die in Summe eine hohe Belastung für die Umwelt bedeuten. 2019 trugen Waldbrände mit einem Ausstoß von 0,2 Mio. t CO₂-Äquivalenten zwar nur in geringem Maße zum gesamtdeutschen CO₂-Ausstoß (2019: 805 Mio. t) bei (UBA 2022a u. 2022b), jedoch gestaltete sich der ökologische Schaden weitaus höher. Die deutsche Waldvegetation ist bislang – auch aufgrund des hohen Anteils an Kiefern- und Fichtenmonokulturen – nicht an Brände angepasst, anders als beispielsweise die Vegetation in typischen Waldbrandregionen in Afrika oder Südamerika (Smolka 2022). Dies führt zu langwierigen Erholungsprozessen der Vegetation, die teilweise nur mit intensiver Bewässerung erfolgreich verlaufen (RND 2022b). Mit den langen Erholungsphasen einher geht auch der Verlust von ökologisch wichtigen Waldflächen, welche aufwendig wiederaufzuforsten sind, sowie die nachhaltige Vernichtung des Lebensraums vieler Tierarten (RND 2022b).



Allerdings können durch Waldbrände auch ökologische Nischen entstehen, in denen die Biodiversität zunimmt.

Zudem können Waldbrände auch hohe ökonomische Schäden verursachen. Der wirtschaftliche Schaden in einem Jahr mit vergleichsweise wenigen Waldbränden wie 2021 betrug in Deutschland geschätzt rund 0,67 Mio. Euro (BLE 2022). Damit reduzierte sich die Summe auf rund ein Drittel im Vergleich zum Vorjahr, jedoch lag der finanzielle Schaden pro ha mit ca. 4.500 Euro weit über dem Mittelwert der Jahre von 1993 bis 2020 (2.500 Euro/ha) (UBA 2022b). Im Falle eines Waldbrandes haften die Besitzer/innen für vernichtete Bäume, geschlagenes Holz, Lösch- und Abräumkosten sowie für das Wiederaufforsten des Waldes. Um den finanziellen Schaden zu begrenzen, existieren Waldbrandversicherungen, von denen jedoch in der Regel lediglich von Privatbesitzer/innen Gebrauch gemacht wird (BLE 2022). Bund und Länder kommen in der Regel selbst für die Schäden auf.

Waldschutz ist Ländersache

In Deutschland obliegt die Zuständigkeit für den Waldschutz und somit auch für den vorbeugenden Waldbrandschutz den einzelnen Bundesländern. Abhängig von ihrer Waldbrandgefährdung haben die Bundesländer spezifische Regelungen zur Waldbrandvorbeugung sowie zur -bekämpfung erlassen, die in Landeswald- und Landesforstgesetzen sowie in Feuerwehr-, Brandschutz- und Katastrophenschutzgesetzen formuliert sind (Kaulfuß 2011).

Im Zuge der zunehmenden Waldbrandgefahr haben besonders betroffene Bundesländer Aktionspläne für die Waldbrandbekämpfung entwickelt, welche Ansätze zur innovativen Technologienutzung für die Waldbrandbekämpfung enthalten:

- Nordrhein-Westfalen setzt dabei u.a. auf die Luftüberwachung sowie angemessene Ausstattung der Feuerwehr

- ps://www.gdv.de/gdv/fliegende-feuermelder-waldbraende-mit-neuester-technik-bekaempfen-69862 (16.11.2022)
- ▶ Geographisches Institut Heidelberg (2022): Disaster Mapping und Katastrophenmanagement. 28.1.2022, https://www.geog.uni-heidelberg.de/gis/heigit_disastermanagement.html (15.12.2022)
 - ▶ Giglio, L.; Schroeder, W.; Justice, C. (2016): The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. In: Remote sensing of environment 178, S. 31–41
 - ▶ de Groot, B. (2012): CANFIRE Model. Frontline Express, Bulletin 62, <https://d1ied5g1xfgp8.cloudfront.net/pdfs/34093.pdf> (5.2.2023)
 - ▶ Jablonski, F. (2020): Autonome Drohnen sollen Wälder überwachen. Fünf G, 19.6.2020, <https://fuenf-g.de/2020/06/19/autonome-drohnen-sollen-waelder-ueberwachen/> (13.12.2022)
 - ▶ Kaulfuß, S. (2011): Gesetzliche Grundlagen und Pflichten der Waldbesitzer bei der Waldbrandvorbeugung. waldwissen.net, 12.5.2016, <https://www.waldwissen.net/de/waldwirtschaft/schadensmanagement/waldbrand/waldbrand-gesetzliche-grundlagen> (25.11.2022)
 - ▶ Löb, R. (2020): In Görlitz sollen bald Drohnen Waldbrände erkennen. Blaulicht-Magazin, 25.8.2020, <https://blaulicht-magazin.net/in-goerlitz-sollen-bald-drohnen-waldbraende-erkennen/> (13.12.2022)
 - ▶ McLoughlin, N. (2015): Demonstration of Canadian fire behavior calculator REDApp. Northern Rockies Fire Science Network, 28.1.2015, <https://www.nrfirescience.org/resource/13238> (15.12.2022)
 - ▶ MI Niedersachsen (Niedersächsisches Ministerium für Inneres und Sport) (2020): Innenministerium legt Aktionsplan zur Waldbrandbekämpfung vor. 24.4.2020, <https://www.mi.niedersachsen.de/startseite/aktuelles/presseinformationen/innenministerium-legt-aktionsplan-zur-waldbrandbekampfung-vor-187776.html> (16.12.2022)
 - ▶ MI NRW (Ministerium des Inneren des Landes Nordrhein-Westfalen); MLV NRW (Ministerium für Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen) (2022): Waldbrandvorbeugung und Waldbrandbekämpfung in Nordrhein-Westfalen. (Bock, K.; Ohler, C.; Jäckle, E.; Schwarz, C.; Meier, R.; Menden, N.; Drescher, F.; Schlechter, C.; Schmitte, J.; Dolgner, H.) https://www.wald-und-holz.nrw.de/fileadmin/Wald_in_NRW/Waldbrand/Waldbrandvorsorgekonzept_August_2022_final_8_8_2022_003_.pdf (5.2.2023)
 - ▶ MIT Lincoln Laboratory (2018): Next-Generation Incident Command System. Emergency agencies around the world are using NICS to coordinate rapid and organized response to disasters. <https://www.ll.mit.edu/r-d/projects/next-generation-incident-command-system> (16.11.2022)
 - ▶ Moser, T. (2022): Waldbrände, Buschfeuer, Flurbrand: Wie unterscheiden sich die Brandtypen? Redaktionsnetzwerk Deutschland, 19.6.2022, <https://www.rnd.de/wissen/waldbraende-welche-brandtypen-gibt-es-eine-uebersicht-M5NCKIXAKJDCZKQ4SQV2Y4GMMM.html> (11.11.2022)
 - ▶ Pang, Y.; Li, Y.; Feng, Z.; Feng, Z.; Zhao, Z.; Chen, S.; Zhang, H. (2022): Forest Fire Occurrence Prediction in China Based on Machine Learning Methods. In: Remote Sensing 14(21), Art. 5546
 - ▶ Parington, M. (2021): Waldbrände in Südeuropa. Wissenschaftler: Erhöhte Gefahr für Atemwegserkrankungen. Mark Parrington im Gespräch mit Ralf Krauter. Deutschlandfunk, 23.8.2021, <https://www.deutschlandfunk.de/waldbraende-in-suedeuropa-wissenschaftler-erhoehte-gefahr-100.html> (25.11.2022)
 - ▶ Rademaker, M. (2022): Warum Waldeigentum verpflichtet. Zeit Online, 26.12.2022, <https://www.zeit.de/politik/2022-12/waldbesitzer-brandenburg-klimaschutz-brandschutz-cem-oezdemir/komplettansicht> (4.1.2023)
 - ▶ RND (Redaktionsnetzwerk Deutschland) (2022a): Zweiter Roboter hilft bei Löscharbeiten im Grunewald – Gefahrenbereich muss verkleinert werden. <https://www.rnd.de/panorama/brand-im-grunewald-berlin-zweiter-roboter-hilft-bei-loescharbeiten-2LFL4FXOM5OWTDWVY-C6CILB3E.html> (15.12.2022)
 - ▶ RND (2022b): Waldbrände in Sachsen und Brandenburg - Wie wirken sich die Feuer auf die CO₂-Bilanz aus? <https://www.rnd.de/wissen/waldbraende-wie-wirken-sich-die-feuer-auf-die-co2-bilanz-aus-KN6S6ZKUE-JEULIZJQPMHPS4EIIY.html> (25.11.2022)
 - ▶ Schimmelpfennig, S.; Heidecke, C.; Beer, H.; Bittner, F.; Klages, S.; Krengel, S.; Lange, S. (2018): Klimaanpassung in Land- und Forstwirtschaft. Ergebnisse eines Workshops der Ressortforschungsinstitute FLI, JKI und Thünen-Institut. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Working Paper Nr. 86, Braunschweig
 - ▶ Seifert, S.; Ziesak, M.; König, A.; Müller Starck, G.; Seifert, T.; Linde, A.; Bayer, S.; Schumacher, J. (2022): Technische Innovationen für Waldumbau und nachhaltiges Waldmanagement. Scientes Mondium UG, Altomünster, unveröffentlicht
 - ▶ Sifakis, N.; Iossifidis, C.; Kontoes, C.; Keramitsoglou, I. (2011): Wildfire Detection and Tracking over Greece Using MSG-SEVIRI Satellite Data. In: Remote Sensing 3(3), S. 524–538
 - ▶ Smolka, L. (2022): Mit neuen Technologien gegen Waldbrände. rbb24, 10.7.2022, <https://www.rbb24.de/panorama/beitrag/2022/07/waldbrandbekaempfung-forscher-firmen-projekte-brandenburg.html> (16.11.2022)
 - ▶ Sundblad, B.-M.; Malmberg, P.; Larsson, K. (2021): Comparison of airway conductance and FEV(1) as measures of airway responsiveness to methacholine. Discrimination of small differences in bronchial responsiveness with Gaw and FEV(1). In: Clinical physiology 21(6), S. 673–681
 - ▶ TH Wildau (Technische Hochschule Wildau) (2022): Waldbrandbekämpfung mit fliegender Antenne und ferngesteuerter Löschraupe. KaWe-Kurier, 23.8.2022, <https://kw-kurier.de/waldbrandbekaempfung-mit-fliegender-antenne-und-ferngesteuerter-loeschraupe/> (16.11.2022)
 - ▶ TMIL (Thüringer Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft) (2019): Grünes Herz Thüringen. Aktionsplan

Wald 2030 ff. https://www.staatskanzlei-thueringen.de/fileadmin/user_upload/TSK/Medienservice/Medieninformationen/2019/AktionsplanWald2030ff.pdf (6.1.2023)

- ▶ UBA (Umweltbundesamt) (2022a): Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung> (10.1.2023)
- ▶ UBA (2022b): Waldbrände. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/waldbraende#ursachen-fur-waldbrande> (24.11.2022)
- ▶ WBW (Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2021): Die Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel. Gutachten des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik. https://www.bmel.de/Shared-Docs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/waldpolitik/gutachten-wbw-anpassung-klimawandel.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (5.2.2023)

- ▶ Zeit Online (2022): Feuerwehrverband hofft auf Lösch-Drohnen bei Waldbränden. <https://www.zeit.de/news/2022-07/27/feuerwehrverband-hofft-auf-loesch-drohnen-bei-waldbraenden> (3.1.2022)
- ▶ Zimmermann, I. (2022): Hightech gegen Waldbrände: Die ersten Minuten entscheiden. Brand-Früherkennung. Mitteldeutscher Rundfunk, 5.8.2022, <https://www.mdr.de/wissen/waldbraende-verhindern-technik-sachsen-rauchmelder-kameras100.html> (14.11.2022)

Das Horizon-Scanning ist Teil des methodischen Spektrums der Technikfolgenabschätzung im TAB.

Horizon
SCANNING

Mittels Horizon-Scanning werden neue technologische Entwicklungen beobachtet und diese systematisch auf ihre Chancen und Risiken bewertet. So werden technologische, ökonomische, ökologische, soziale und politische Veränderungspotenziale möglichst früh erfasst und beschrieben. Ziel des Horizon-Scannings ist es, einen Beitrag zur forschungs- und innovationspolitischen Orientierung und Meinungsbildung des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung zu leisten.

In der praktischen Umsetzung werden im Horizon-Scanning softwaregestützte Such- und Analyseschritte mit expertenbasierten Validierungs- und Bewertungsprozessen kombiniert.

Herausgeber: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)

Gestaltung und Redaktion: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH

Bildnachweise: Stuart_Shaw/iStock (S. 1); David Aughenbaugh/iStock (S. 2); Wirestock/iStock (S. 4); PaulGulea/iStock (S. 5); sarawuth702/iStock (S. 6)

ISSN-Internet: 2629-2874