

IQ FireWatch

Erkennung $\neq$ Früherkennung: Ein Technologievergleich



White Paper: Waldbrandfrüherkennung

Made in Germany

A product of 

Im Wettlauf mit der Zeit

Die zunehmende Zahl von Waldbränden und die dramatischen Auswirkungen auf Menschen, Tiere, Infrastrukturen und Werte rücken die Bedeutung der frühen Erkennung von Bränden massiv in den Vordergrund. Diese verheerenden Auswirkungen, Schäden und CO₂-Belastung können nur verhindert werden, wenn die **Erkennung und Bekämpfung innerhalb eines sehr kurzen Zeitfensters** erfolgen. Es ist ein Wettlauf mit der Zeit! Um diesen Wettlauf zu gewinnen, bedarf es eine möglichst rasche Erkennung, eine kontinuierliche Überwachung muss sichergestellt werden, Alarmmeldungen müssen unmittelbar verifiziert werden können und es braucht fehlerfreie Informationen für die Einsatzführung.

Waldbrandschutz umfasst alle Maßnahmen zur **Prävention, Früherkennung und Bekämpfung** von Waldbränden. Ziel ist es, Menschen, Tiere, Wälder und Infrastruktur vor den Folgen großer Feuer zu schützen. Dabei kommt der Waldbrandfrüherkennung eine zentrale Rolle zu, da sie den entscheidenden Zeitvorsprung für wirksame Gegenmaßnahmen schafft.

In Europa hat sich die Waldbrandsituation in den letzten zehn Jahren deutlich verschärft. Längere Hitzeperioden, zunehmende Trockenheit und der Klimawandel führen zu einer wachsenden Zahl großflächiger Brände. 2025 erreichte Europa einen neuen Rekord: Bis August verbrannten laut Copernicus und europäischen Klimadiensten über eine Million Hektar Fläche. Besonders betroffen waren Spanien, Portugal, Griechenland und die Balkanregion. **Neben schweren ökologischen Folgen verursachen Waldbrände auch enorme wirtschaftliche Schäden.** Für Feuerbekämpfung, zerstörte Infrastruktur, Waldverluste und Folgeschäden werden die Kosten europaweit inzwischen auf mehrere Milliarden Euro pro Jahr geschätzt.

Neben dem Rückgrat eines effektiven Waldbrandschutzes – der kamerabasierten Früherkennung wie von IQ Fire-Watch eingesetzt – gibt es mittlerweile verschiedene technologische Instrumente mit unterschiedlichen Stärken und Defiziten.



Foto: Landesbetrieb Forst Brandenburg

RAIMUND ENGEL WALDBRANDSCHUTZ- BEAUFTRAGTER DES LANDES BRANDENBURG

Wir sind gefordert, alles Mögliche zu tun, um diese Umwelt zu schützen und alles zu unterlassen, was zur Zerstörung unserer Lebensgrundlage führt.

Inhaltsverzeichnis

1. Was ist Waldbrandfrüherkennung?	4 - 6
2. Bewertungsrahmen für den Technologievergleich	7 - 11
3. Satelliten im Waldbrandmanagement: Rechtzeitige Erkennung?	12 - 17
4. Mikrosensoren im Waldbrandmanagement: Belastbare Detektion?	18 - 22
5. Optische Rauchererkennung im Waldbrandmanagement: Optische Rauchsensoren vs. Standard-Kameras	23 - 28
6. Resümee: Welche Technologie ist die beste Wahl?	29 - 30
7. Literaturverzeichnis	31

Die Quellenverweise im Fließtext sowie die Literaturangaben in diesem White Paper folgen dem IEEE-Zitierstil mit den Quellangaben in runden Klammern.

Geschätzte Leserin, geschätzter Leser!

Glücklicherweise nimmt die Zahl an Instrumenten zu, mit denen eine frühzeitige Erkennung von Waldbränden ermöglicht wird. Es werden **unterschiedliche Erkennungstechnologien und Trägermedien** dafür genutzt – von Satelliten, über Drohnen, Gassensoren bis hin zu diversen optischen Sensoren. Doch was hilft wirklich? Gerade für Entscheidungsträger ist es oft schwierig, den Überblick zu bewahren und auf das sprichwörtlich „richtige Pferd zu setzen“. Geht es doch häufig um nicht unerhebliche finanzielle Mittel, die eingesetzt werden müssen.

IQ FireWatch ist als Anbieter einer terrestrischen, kamerabasierten Sensorik seit beinahe einem Vierteljahrhundert am Markt etabliert. In dieser Zeit haben wir unser System kontinuierlich weiterentwickelt und weltweit in unterschiedlichsten Einsatzszenarien implementiert. Diese praktische Erfahrung prägt unseren Blick auf das Thema Waldbrandfrüherkennung. Zugleich beschäftigen wir uns seit vielen Jahren intensiv mit ergänzenden und alternativen Technologien. Denn unser Anspruch ist es nicht, eine einzelne Lösung zu betrachten, sondern den bestmöglichen Schutz für Wälder ganzheitlich zu denken.

Vor diesem Hintergrund haben wir uns entschlossen, dieses **White Paper** zu erstellen. Ziel war es, die verschiedenen technologischen Ansätze zur Waldbrandfrüherkennung systematisch zu betrachten und einzuordnen. Unser Anspruch war es, dabei einen Überblick zu geben, was Früherkennung konkret bedeutet und welche Rolle sie im effektiven Waldbrandmanagement spielt. Darüber hinaus betrachten wir, wie gut die einzelnen Technologien den objektiven Anforderungen wirksamer Früherkennung gerecht werden und welche betrieblichen sowie wirtschaftlichen Konsequenzen sich daraus in der Praxis ergeben. Dabei ist uns bewusst, dass unterschiedliche Einsatzgebiete und Risikoprofile bis zu einem gewissen Grad auch unterschiedliche technologische Ansätze erfordern.

Natürlich betrachten wir in diesem **Vergleich** alle Erkennungstechnologien und Trägermedien, also die eingesetzten Systeme, durch unsere eigene Brille an Know-how und Erfahrung. Wir bemühen uns aber, möglichst neutral und technologiebasiert zu formulieren, dabei aber verständlich und objektiv zu bleiben. Am Ende ist für uns aber klar geworden, dass eine hochqualitative, kamerabasierte terrestrische Früherkennung als Rückgrat des Waldbrandschutzes unersetzlich ist. Am besten natürlich IQ FireWatch! Wir arbeiten Tag für Tag daran, unser System noch besser zu machen.

Wir hoffen, dass wir mit diesem White Paper einen möglichst fundierten und nachvollziehbaren Überblick geben können, welche Technologien der Früherkennung am Markt erhältlich sind, welche Stärken sie haben und wo ihre Defizite sind. Denn nur wenn man Früherkennung umfassend denkt, kann der bestmögliche Nutzen erzielt werden. Die Herausforderungen werden nicht kleiner!

Ich freue mich persönlich über Ihre Rückmeldungen!

Ihr

Dr. Kurt Winter
Geschäftsführer



Foto: Karl Schrotter

01

Was ist Waldbrandfrüherkennung?

Die vergangenen Waldbrandsaisonen haben gezeigt, dass Brände häufiger auftreten, länger andauern und größere Flächen erfassen. Steigende Temperaturen, länger anhaltende Trockenperioden und veränderte Vegetationsstrukturen erhöhen das Risiko großflächiger Schadensereignisse erheblich. Unter diesen Bedingungen ist eine frühzeitige Erkennung entscheidend. Sie ermöglicht eine schnellere Brandbekämpfung, eine präzisere Lageeinschätzung, frühere Evakuierungsentscheidungen und trägt insgesamt zu einem wirksameren Schutz von Menschen, Umwelt und Werten bei (13).

Neben den in diesem White Paper betrachteten technologischen Ansätzen gibt es auch traditionelle Formen der Waldbranderkennung durch menschliche Beobachtung. Diese reichen von zufälligen Sichtungen durch Spaziergänger oder Wanderer über Beobachtungen aus Flugzeugen bis hin zu systematisch organisierten Beobachtungstürmen oder Beobachtungsflügen. Diese Formen der Erkennung können wertvolle Hinweise liefern, erfolgen jedoch nicht kontinuierlich, systematisch und innerhalb eines definierten Zeitfensters. Ob sie als wirksame Früherkennung gelten können, ist daher ebenfalls an den in Abschnitt 1.2 definierten Kriterien zu prüfen.

Der auf den drei Bildern, aufgenommen durch IQ FireWatch, gezeigte Waldbrand ereignete sich im April 2025 in Niedersachsen, Deutschland. Er zeigt, wie schnell aus einem kleinen Rauchanzeichen ein ernsthafter Brand werden kann.



1.1

Effektives Waldbrandmanagement

Effektives Waldbrandmanagement basiert auf drei komplementären Säulen: Prävention, Früherkennung und Bekämpfung. Nur im Zusammenspiel entsteht ein wirksamer Schutz.

Prävention umfasst die Aufklärung und Sensibilisierung der Bevölkerung sowie forstliche und technische Maßnahmen wie die Entfernung von Totholz oder kontrollierte Brennflächen (1). Letztere reduzieren die Brandlast und senken dadurch die Wahrscheinlichkeit größerer Waldbrände. Dennoch bleibt selbst bei konsequenter Präventionsarbeit ein erhebliches Restrisiko, bedingt durch klimatische Extremereignisse, zunehmenden Trockenstress in Wäldern, menschliches Fehlverhalten sowie begrenzte Möglichkeiten für eine flächendeckende Umsetzung präventiver Maßnahmen (12, 16, 17, 18, 21).

Früherkennung übernimmt eine zentrale Funktion innerhalb der Risikominderung: Sie greift genau in dem Moment ein, in dem Prävention nicht ausreicht, aber eine großflächige Ausbreitung eines Brandes noch verhindert werden kann. Dadurch kann die Brandbekämpfung rechtzeitig, gezielt und unter besseren Bedingungen erfolgen (13).

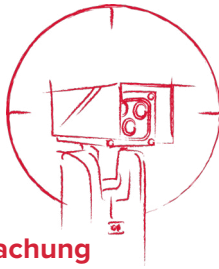
Bekämpfung bildet die reaktive Phase des Waldbrandmanagements. Je später ein Feuer entdeckt wird, desto stärker verlagert sich die Aufgabe hin zur reinen Schadensbegrenzung. Damit steigen die Risiken für die Einsatzkräfte. Zugleich nehmen Zeitbedarf, Ressourceneinsatz und Schäden deutlich zu (7). Gleichzeitig sinkt die Wahrscheinlichkeit, ein Brandereignis noch unter kontrollierbaren Bedingungen einzudämmen (13).



1.2 Definition der Früherkennung

Die nachfolgende Auswertung unterschiedlicher Technologien basiert auf vier grundlegenden Kriterien wirksamer Waldbrandfrüherkennung. Diese Kriterien dienen im gesamten White Paper als einheitlicher Bewertungsmaßstab für alle Formen der Waldbrandfrüherkennung.

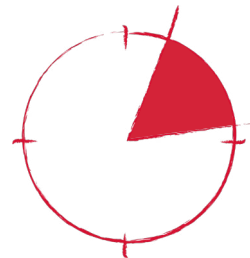
1



Unterbrechungsfreie Überwachung

Früherkennung erfordert die kontinuierliche, automatisierte Überwachung eines definierten Gebiets bei Tag und bei Bedarf auch bei Nacht. Nur durch eine dauerhaft verfügbare Datenerfassung lassen sich Überwachungslücken vermeiden und zeitkritische Ereignisse zuverlässig erfassen.

2



Kurzfristige Detektion

Ein wirksames Früherkennungssystem muss Waldbrände innerhalb eines fest definierten Zeitfensters erkennen, typischerweise unter 15 Minuten nach der Entstehung. Dieses Zeitfenster ist entscheidend, um ein frühzeitiges Eingreifen zu ermöglichen, bevor sich ein Brand unkontrolliert ausbreitet. Die tatsächliche Detektierbarkeit hängt dabei unter anderem von Brandart, Brennstoff, Witterung und Umgebungsbedingungen ab.

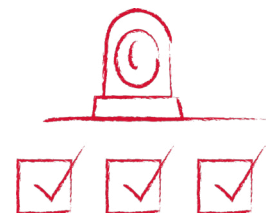
3



Unmittelbare Überprüfbarkeit

Früherkennung erfordert die sofortige visuelle Verifikation jeder Detektion. Dafür müssen verifizierbare Bilddaten zur Verfügung stehen, die eine zeitnahe Einschätzung des Ereignisses ermöglichen. Erst die visuelle Bestätigung erlaubt es, echte Brandereignisse sicher von Fehlalarmen zu unterscheiden und fundierte Entscheidungen zur Alarmierung, Priorisierung und Koordination von Einsatzkräften zu treffen.

4



Aussagekräftige und fehlerfreie Information

Für eine wirksame Einsatzführung müssen Warnmeldungen präzise, konsistent und handlungsrelevant sein. Sie müssen mindestens den Zeitpunkt der Erstdetektion, verifizierbare Bildinformationen sowie exakte Koordinaten des Verdachtsortes enthalten. Eine geringe Fehlalarmquote ist dabei essenziell, um unnötige Einsätze zu vermeiden, Ressourcen zu schonen und die Einsatzbereitschaft dauerhaft sicherzustellen.

02 Bewertungsrahmen für den Technologievergleich

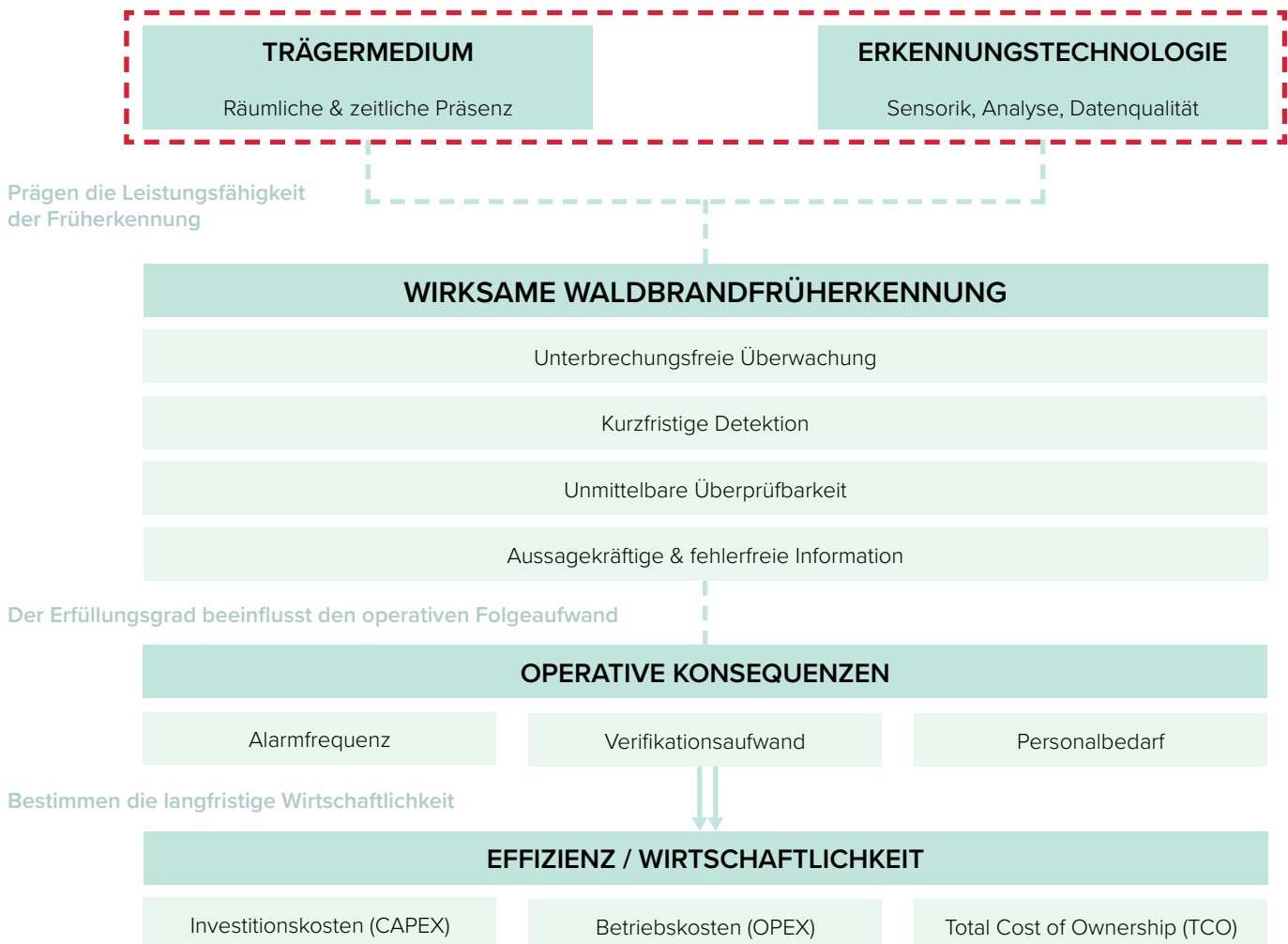
Die vier in Kapitel 1 definierten Kriterien bestimmen, ob ein System grundsätzlich für eine wirksame Waldbrandfrüherkennung geeignet ist. Der Erfüllungsgrad dieser Kriterien wird im Wesentlichen durch zwei Gestaltungsentscheidungen beeinflusst:

- **das Trägermedium**, das die physische Plattform der Überwachung bildet, und dadurch die räumliche und zeitliche Präsenz bestimmt,
- **die Erkennungstechnologie**, die Art, Qualität und Verarbeitung der erfassten Daten festlegt.

Gemeinsam formen Trägermedium und Technologie die **Systemarchitektur** eines Früherkennungssystems. Sie legt fest, ob eine frühe Erkennung strukturell möglich ist und wie verlässlich und aussagekräftig die Warnmeldungen sind.

Die folgenden Subkapitel betrachten zunächst beide Elemente einzeln, bevor die operativen und wirtschaftlichen Auswirkungen in der Theorie dargestellt werden.

Systemarchitektur

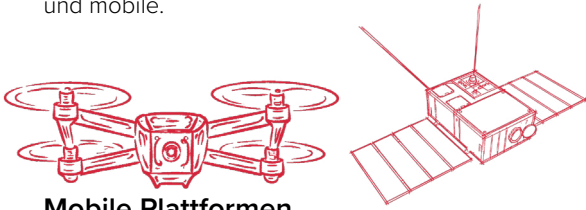


2.1 Systemarchitektur

Die Systemarchitektur ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Trägermedium und eingesetzter Technologie. In den folgenden Abschnitten werden diese strukturellen und technologischen Grundlagen einzeln betrachtet.

Trägermedien

Das Trägermedium bildet die physische Plattform eines Früherkennungssystems. Es trägt die Sensorik, bestimmt deren Position im Raum und legt damit fest, wie ein Gebiet beobachtet wird und unter welchen Bedingungen eine Detektion überhaupt möglich ist. Grundsätzlich lassen sich zwei Arten von Trägermedien unterscheiden: stationäre und mobile.



Mobile Plattformen

Mobile Plattformen – beispielsweise Drohnen, Flugzeuge oder Satelliten – verändern fortlaufend ihre Position. Sie können einen bestimmten Ort daher nur zeitweise beobachten. Dadurch entstehen Überwachungslücken, wechselnde Beobachtungsperspektiven und potenzielle blinde Bereiche. Ob ein Brand erkannt wird, hängt bei mobilen Systemen immer davon ab, ob sie zum richtigen Zeitpunkt über der betroffenen Fläche sind (6, 8, 9, 20), unabhängig von der eingesetzten Sensorik oder der Rechenleistung. Zudem können mobile Plattformen im Betrieb anspruchsvoll sein. Sie können regulatorischen Vorgaben (Luftraumbestimmungen, Flugfreigaben) unterliegen, erfordern geschultes Personal und sind in ihrer Einsatzfähigkeit von Wetter- und Sichtbedingungen abhängig. Reichweite, Kommunikationsverfügbarkeit und -stabilität sowie verfügbare Bandbreite begrenzen zudem die kontinuierliche Datenübertragung (5, 20).

Stationäre Plattformen

Zu den stationären Trägern gehören fest installierte Strukturen wie Mobilfunktürme, Sendetürme, hohe Gebäude, ehemalige Überwachungs- und Feuerwachtürme, Aussichtsplattformen, oder andere erhöhte Strukturen, aber auch Bäume. Sie ermöglichen eine dauerhafte und lückenlose Beobachtung. Dadurch können Ereignisse früh erkannt und Entwicklungen zuverlässig nachverfolgt werden.

Trotz erforderlicher Installations- und Genehmigungsprozesse bieten diese Plattformen organisatorische Vorteile:

Langfristige Nutzbarkeit durch dauerhafte Infrastruktur

Eine stabile Energieversorgung (Netzstrom oder autarke Solarlösungen)

Verlässliche Kommunikationsanbindungen für Echtzeitdatenübertragung



Relevanz für die Früherkennung

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die Wahl des Trägermediums maßgeblich darüber entscheidet, ob eine kontinuierliche Überwachung (Kriterium 1) und kurzfristige Detektion (Kriterium 2) strukturell überhaupt möglich ist.

Stationäre Plattformen erfüllen beide Voraussetzungen (Kriterium 1 und 2) und sind daher als Trägermedium für Erkennungstechnologien in der Früherkennung geeignet.

Mobile Plattformen erfüllen keines der beiden Kriterien. Sie können zwar wertvolle Zusatzinformationen liefern, sind aber primär reaktiv oder ergänzend einsetzbar. Sie beobachten einen Bereich nur zeitweise, eine Detektion hängt daher vom Zufall des richtigen Zeitpunkts ab.

Die Technologie: Methoden der Früherkennung

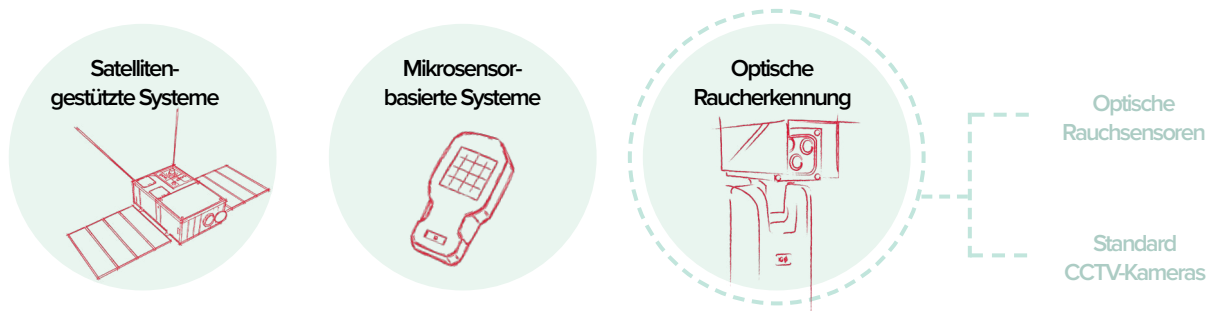
Während die Wahl des **Trägermediums** darüber entscheidet, ob eine frühe Erkennung grundsätzlich möglich ist, bestimmt die Wahl der **Erkennungstechnologie**, wie zuverlässig, überprüfbar und handlungsrelevant diese Erkennung im operativen Alltag ist und hat dadurch Auswirkung auf alle Kriterien der Definition Früherkennung. Sie bestimmt im Kern:

- ➔ welche physikalischen Signale (Rauch bzw. Wärmestrahlung) ein System nutzt,
- ➔ wie sensitiv und präzise diese erfasst werden,
- ➔ wie zuverlässig Daten verarbeitet, klassifiziert und verifiziert werden,
- ➔ und wie informativ und fehlerfrei die resultierenden Meldungen sind.

Waldbrände können durch **verschiedene Signale** erkannt werden, beispielsweise Rauch, Hitze oder Gaszusammensetzung. Rauch breitet sich sehr rasch nach der Entstehung eines Brandes vertikal über den Baumkronen aus und ist dadurch frühzeitig detektierbar (5, 26). Veränderungen in der Luftzusammensetzung entstehen ebenfalls bereits in einer frühen Phase eines Brandes. Hitzequellen sind dagegen meist schwieriger messbar, da hierfür eine direkte Sichtlinie auf die Flammen erforderlich ist (26). Jedes dieser Signale bringt spezifische Stärken und Grenzen mit sich, die durch die jeweils eingesetzte Technologie unterschiedlich genutzt werden können. Unterstützend können diese Technologien auch in Kombination oder aufeinanderfolgend eingesetzt werden.

Operative Systemarchitektur

Vor diesem Hintergrund existiert eine Vielzahl technischer Ansätze zur Waldbrandfrüherkennung (8). Dieses White Paper konzentriert sich auf drei strukturell und technologisch unterschiedliche Methoden, die sich sowohl hinsichtlich ihres Trägermediums als auch ihrer technologischen Architektur grundlegend unterscheiden:



Diese drei Ansätze werden in den folgenden Kapiteln detailliert analysiert — jeweils mit Blick auf die vier Kriterien der Früherkennung sowie die daraus resultierenden operativen und wirtschaftlichen Konsequenzen.

2.2 Operative Konsequenzen der Systemarchitektur

Wie gut ein System die vier Kriterien der Früherkennung erfüllt, bestimmt maßgeblich seine **operative Effizienz**. Besonders die Schnelligkeit und Genauigkeit der Meldungen wirken sich direkt auf den Verifikationsaufwand und den Personalbedarf aus.

Entscheidend ist dabei: Ein vollständig autonomer Einsatz ist weder realistisch noch sinnvoll. Kein bestehendes System kann die Waldbrandfrüherkennung ohne menschliche Kontrolle verlässlich durchführen. Alle Technologien erzeugen Situationen, in denen zwischen echten Ereignissen und Fehlalarmen unterschieden werden muss – und diese Bewertung lässt sich bislang nicht Maschinen überlassen, ohne erhebliche Risiken einzugehen. Deshalb müssen Warnmeldungen stets von geschulten Operatoren überprüft werden, bevor Einsatzkräfte alarmiert werden (9). Nur so lässt sich ein **verantwortungsvolles Gleichgewicht** zwischen hoher Empfindlichkeit (möglichst wenige übersehene Ereignisse) und einer niedrigen Fehlalarmrate (unnötige Einsatzfahrten vermeiden) sicherstellen.

Die Leistungsfähigkeit des Operatings ist unmittelbar abhängig von:

- ➔ der Art von Daten, die von der Technologie bereitgestellt werden (z.B. Bilder, Hotspot-Informationen oder Gasmesswerte)
- ➔ deren Qualität (z.B. unkomprimierte RAW-Bilder vs. komprimierte JPEG-Bilder)
- ➔ die Präzision und Konsistenz der Detektion
- ➔ die Möglichkeiten der Software zur Analyse und Verifikation

Je verlässlicher und informativer die gelieferten Daten sind, desto effizienter kann das Operating erfolgen. Systeme mit hohen Fehlalarmquoten verursachen dagegen einen deutlich höheren personellen und zeitlichen Aufwand: Mehr Meldungen müssen geprüft, Unsicherheiten abgeklärt und potenziell ausgelöste Einsatzketten gegebenenfalls zurückgenommen werden (9). Dies erhöht den Personalbedarf für die Überwachung und führt zu steigenden Betriebskosten. Die Qualität des Operatings wirkt sich damit unmittelbar auf die langfristige Wirtschaftlichkeit eines Systems aus (13).

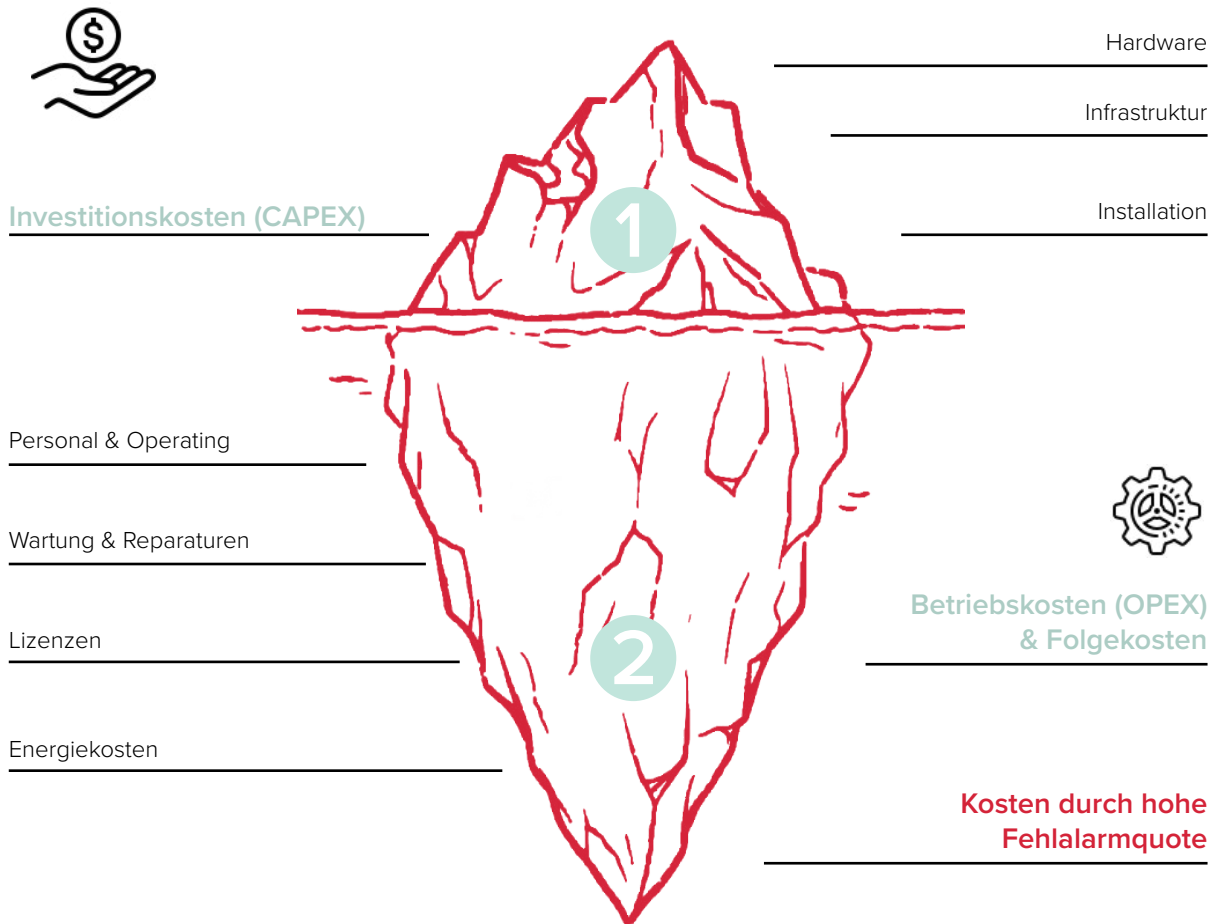
2.3 Langfristige Wirtschaftlichkeit

Grundsätzlich lassen sich **drei Kostenblöcke** unterscheiden, die in Kombination über die Wirtschaftlichkeit eines Systems entscheiden.

- 1 Investitionskosten (CAPEX)**
hierzu zählen insbesondere Hardware, Infrastruktur, Installation sowie die sichere Daten- und IT-Anbindung.
- 2 Betriebskosten (OPEX)**
darunter fallen Energie, Wartung, Reparaturen, Lizenzkosten sowie der Personalbedarf im täglichen Operating.
- 3 Total Cost of Ownership (TCO)**
die Gesamtkosten über die gesamte Lebensdauer, einschließlich Revitalisierungszyklen, Ersatzteilen und der Kosten pro überwachte Fläche.



Eisbergmodell der Gesamtkosten



Quelle: Eigene Darstellung.

Ein wesentlicher Faktor für die **Wirtschaftlichkeit** ist dabei die Reife und Belastbarkeit eines Systems im langfristigen Betrieb. Systeme, die über viele Jahre unter realen Einsatzbedingungen getestet wurden, zeichnen sich in der Regel durch eine stabile Detektionsleistung, planbare Wartungsintervalle und eine verlässliche technische Lebensdauer aus. Sie weisen vorhersehbare Ausfallmuster und kalkulierbare Betriebskosten auf. Diese Eigenschaften tragen genauso zur Wirtschaftlichkeit bei wie die reine Erkennungsleistung.

Gleichzeitig wirkt sich die operative Effizienz unmittelbar auf die Kosten aus: Systeme mit geringer Datenqualität oder hohen Fehlalarmquoten erzeugen einen größeren Personal- und Zeitaufwand und erhöhen damit die laufenden Betriebskosten. Systeme mit hoher Präzision, wenigen Fehlalarmen und stabiler technischer Performance reduzieren dagegen den Bedarf an Ressourcen und senken so die Kosten über den gesamten Lebenszyklus hinweg (9, 13, 29).

Die langfristige Wirtschaftlichkeit ergibt sich somit nicht allein aus den Anschaffungskosten, sondern aus dem Zusammenspiel struktureller, technologischer und operativer Faktoren (13). Wie unterschiedliche Technologien in diesem Gesamtkontext abschneiden, wird in den folgenden Kapiteln detailliert analysiert.

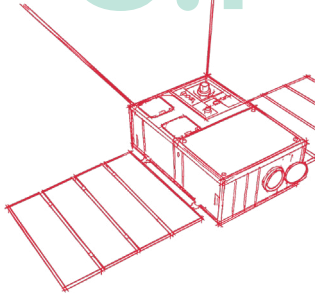
03 Satelliten im Waldbrandmanagement: Rechtzeitige Erkennung?

Satellitengestützte Systeme nehmen im Technologievergleich eine besondere Rolle ein. Im Gegensatz zu bodengebundenen Lösungen vereinen sie Trägermedium und Erkennungstechnologie in einem System: Der Satellit selbst bestimmt die räumlich-zeitliche Verfügbarkeit der Beobachtung und die darauf installierte Erkennungstechnologie die Art und Qualität der erfassten Daten (2).

Satelliten werden seit einigen Jahren im Waldbrandmanagement eingesetzt (27). Ihr Einsatz konzentriert sich dabei vor allem auf die großräumige Beobachtung, die Analyse von Brandausbreitung, die retrospektive Schadensbewertung sowie auf wissenschaftliche Auswertungen von Waldbrandereignissen (2, 6, 8, 24, 28). In diesen Anwendungsfeldern liefern satellitengestützte Systeme wertvolle Informationen.

In den letzten Jahren werden Satelliten zunehmend auch im Kontext der Waldbrandfrüherkennung diskutiert. Vor diesem Hintergrund untersucht dieses Kapitel, inwieweit satellitengestützte Systeme, die in Kapitel 1.2 definierte Früherkennung erfüllen. Die sich daraus ergebenden betrieblichen und wirtschaftlichen Konsequenzen werden ebenfalls analysiert.

3.1 Unterbrechungsfreie Überwachung?



Unterbrechungsfreie Überwachung	Kurzfristige Detektion	Unmittelbar überprüfbar	Aussagekräftige und fehlerfreie Information
-	-	+ / -	+ / -

Lückenhafte Beobachtung

Die Definition wirksamer Waldbrandfrüherkennung in Kapitel 1.2 fordert eine unterbrechungsfreie Überwachung eines definierten Gebiets. Gemeint ist damit nicht allein die prinzipielle Fähigkeit eines Sensors, bei Tag und Nacht Daten zu erfassen, sondern die kontinuierliche zeitliche Verfügbarkeit der Beobachtung ohne systembedingte Überwachungslücken.

Erdbeobachtungssatelliten im niedrigen Erdbit (LEO) sind exemplarisch für mobile Trägermedien. Sie umkreisen die Erde in etwa 90 bis 100 Minuten meist in Höhen unter 1.000 Kilometern. Moderne Sensorsysteme ermöglichen dabei grundsätzlich eine Beobachtung bei Tag und Nacht (14), etwa durch die Erfassung thermaler Infrarotstrahlung (2), die räumlich-zeitliche Abdeckung ist jedoch durch die Umlaufbahn begrenzt. Aufgrund der Erdrotation und in Abhängigkeit von Höhe und Umlaufbahn überfliegt ein einzelner LEO-Satellit denselben Punkt auf der Erdoberfläche jedoch zeitverzögert (3), erst nach mehreren Stunden oder Tagen erneut (6, 8), wie die nachfolgende Grafik zeigt. Zwischen diesen Überflügen bestehen zwangsläufig Überwachungslücken, in denen keine Datenerfassung erfolgt. Ob ein Brand detektiert wird, hängt davon ab, ob seine Entstehung mit einem Überflug zusammenfällt und die atmosphärischen Bedingungen eine Erkennung zulassen.

Umlaufbahn eines beispielhaften LEO-Satelliten mit pro Umrundung veränderndem Überflugpfad über der Erdoberfläche.



Quelle: Eigene Darstellung nach (31).

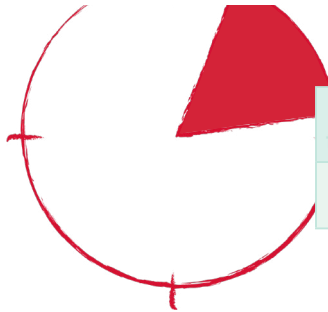
Auch geplante Satellitenkonstellationen mit hohen Stückzahlen, die zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht existieren, können diese strukturelle Einschränkung nicht vollständig überwinden. So hat beispielsweise ein Satellitenhersteller für eine Konstellation von über 100 Satelliten eine Wiederholungszeit (Revisit Time) von 30 Minuten angegeben (6, 30). Obwohl dies eine Verbesserung gegenüber den oben genannten stundenlangen bis mehrtägigen Lücken darstellt, bleibt die Erfassung eines Brandes im Frühstadium strukturell überflugabhängig. Eine systematische, kontinuierliche Überwachung wird dadurch kaum erreicht.

Geostationäre Satelliten (GEO) hingegen stellen ein quasistationäres Trägermedium dar. Sie beobachten kontinuierlich dieselbe Region der Erde über dem Äquator und könnten theoretisch eine ununterbrochene Überwachung ermöglichen (28). Allerdings operieren sie aus einer Entfernung von rund 36.000 Kilometern (27). Diese Distanz begrenzt die nutzbare räumliche Auflösung erheblich und erlaubt keine zuverlässige Detektion kleiner oder frühzeitiger Brandereignisse (9, 14, 22). Hinzu kommt, dass die Überlappung ihrer spektralen Eigenschaften mit Rauch, Wolken (2) und atmosphärischen Phänomenen die Erkennung tatsächlicher Ereignisse erschwert (9, 14). Die Zuverlässigkeit der Erkennung aus Höhen von GEO-Satelliten ist daher generell nicht robust und unterliegt Schwankungen bei sich ändernden atmosphärischen Bedingungen (2, 9, 14).

Obwohl satellitengestützte Systeme sowohl im niedrigen Erdorbit als auch in geostationären Umlaufbahnen grundsätzlich eine Überwachung bei Tag und Nacht ermöglichen (2, 14), erfüllen sie aufgrund von Überflugintervallen oder physikalischen Einschränkungen nicht das Kriterium der unterbrechungsfreien Überwachung (6).

3.2

Kurzfristige Detektion?



Unterbrechungs- freie Überwachung	Kurzfristige Detektion	Unmittelbar überprüfbar	Aussagekräftige und fehlerfreie Information
-	-	+ / -	+ / -

Zeitverzug

Unabhängig vom Satellitentyp erfolgt die Branderkennung bei satellitengestützten Systemen überwiegend über die Identifikation thermischer Anomalien im Infrarotbereich. Potenzielle Brandherde werden dabei als sogenannte **Hotspots** erkannt, deren Temperatur signifikant über der Umgebung liegt. Dieses Verfahren setzt voraus, dass ein Brand bereits eine gewisse **Intensität und Ausdehnung** erreicht hat, um sich eindeutig vom thermischen Hintergrund abzuheben (2, 3, 14). Eine vollumfängliche Datenübertragung ist meist erst möglich, wenn sich der Satellit in Reichweite einer geeigneten Bodenstation befindet. Daraus kann sich systembedingt eine **verzögerte Übertragung** ergeben. Je nach Konstellation, Überflugfrequenz und Infrastruktur kann diese Verzögerung zwischen mehreren Dutzend Minuten bis hin zu mehreren Stunden liegen (3, 5). Hochauflösende Bilddaten sind aufgrund ihres Datenvolumens besonders stark betroffen (3). Moderne Kommunikationstechnologien wie Intersatelliten-Links und Bodenstationsnetzwerke können diese Effekte teilweise reduzieren.

Diese zeitlichen Verzögerungen sind dabei nicht isoliert zu betrachten, sondern stehen in direktem Zusammenhang mit den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Überflugintervallen und der fehlenden unterbrechungsfreien Überwachung des Trägermediums Satellit.

Daraus ergibt sich der folgende mehrstufige **zeitliche Ablauf von der Datenerfassung bis zur Bereitstellung**:



Damit erfüllen satellitengestützte Systeme das Kriterium der kurzfristigen Detektion innerhalb von unter 15 Minuten gemäß der Definition wirksamer Waldbrandfrüherkennung insgesamt nicht.

3.3 Unmittelbare Überprüfbarkeit?



Unterbrechungs- freie Überwachung	Kurzfristige Detektion	Unmittelbar überprüfbar	Aussagekräftige und fehlerfreie Information
-	-	+ / -	+ / -

Eingeschränkte Verifikation

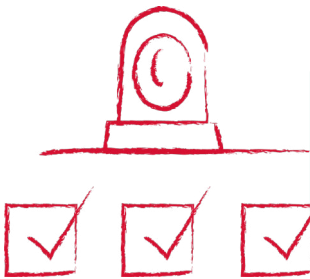
Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, stehen bei satellitengestützten Systemen hochauflösende Bilddaten häufig nicht in Echtzeit zur Verfügung und werden erst zeitlich verzögert übertragen (2). In der Frühphase einer Detektion liefern Satelliten in der Regel lediglich Zeitstempel, Koordinaten und Intensitätswerte thermaler Auffälligkeiten, jedoch keine unmittelbar einsehbaren Bildinformationen des Ereignisses (28).

Eine visuelle Überprüfung ist damit meist erst nachgelagert möglich, etwa beim nächsten Überflug einer Bodenstation oder nach der späteren Bereitstellung umfangreicherer Daten. Veränderungen eines Ereignisses lassen sich nicht kontinuierlich nachvollziehen, und Unsicherheiten – insbesondere die Unterscheidung zwischen realem Brandereignis und Fehlalarm – können nicht zeitnah geklärt werden (9).

Hinzu kommt, dass thermale Anomalien nicht ausschließlich durch Waldbrände verursacht werden. Industrielle Wärmequellen, Infrastruktur, Solaranlagen oder andere hitzeintensive Prozesse können ebenfalls Hotspots erzeugen, während Wolken, Rauchüberlagerungen und atmosphärische Effekte die Interpretation zusätzlich erschweren (2, 9, 14). Ohne unmittelbare visuelle Verifikation steigt dadurch das Risiko von Fehlalarmen oder Fehlinterpretationen.

Damit erfüllen satellitengestützte Systeme das Kriterium der unmittelbaren Überprüfbarkeit gemäß der Definition wirksamer Waldbrandfrüherkennung nur eingeschränkt.

3.4 Aussagekräftige und fehlerfreie Information?



Unterbrechungs- freie Überwachung	Kurzfristige Detektion	Unmittelbar überprüfbar	Aussagekräftige und fehlerfreie Information
-	-	+ / -	+ / -

Orientierung

Die von satellitengestützten Systemen bereitgestellten Informationen sind für den operativen Einsatz in der Frühphase eines Waldbrandes nur eingeschränkt aussagekräftig. Ursache hierfür ist insbesondere die physikalisch begrenzte räumliche Auflösung der Sensoren (28). Selbst moderne thermale Satellitensensoren arbeiten mit optischen Auflösungen von bis zu mehreren hundert Metern, sodass ein Brand bereits eine gewisse Ausdehnung erreicht haben muss, um zuverlässig detektiert und lokalisiert werden zu können (2, 10, 14).

Auch durch mathematische Modelle, mit denen die Pixelgrößen rechnerisch verringert werden, wird die für die Früherkennung notwendige Auflösung meist nicht erreicht. Die resultierenden Warnmeldungen liefern daher häufig lediglich eine **räumliche Einordnung** des Ereignisses (10). Eine präzise Lokalisierung des Brandherdes, wie sie für eine gezielte Alarmierung und Einsatzplanung erforderlich ist, ist auf dieser Grundlage nur eingeschränkt möglich (10, 28). Zusätzliche Maßnahmen zur Verifikation und Lageeinschätzung sind erforderlich, was den Reaktionsprozess weiter verzögert (9).

Hinzu kommt, dass die **Informationsdichte satellitengestützter Meldungen begrenzt** ist. In der Regel stehen lediglich Zeitstempel, Koordinatenbereiche und Intensitätswerte thermaler Auffälligkeiten zur Verfügung (28). Kontextinformationen, wie etwa zur Ausdehnung, Ausbreitungsrichtung oder zur tatsächlichen Rauchentwicklung, fehlen oder sind erst zeitlich nachgelagert verfügbar (3, 28). Dies erschwert eine belastbare Einschätzung der Lage, insbesondere in komplexem Gelände oder bei mehreren gleichzeitigen Ereignissen (9, 28). Für Einsatzkräfte bedeutet dies eine erhöhte Unsicherheit in der Entscheidungsfindung. Fehlinterpretationen können nicht ausgeschlossen werden, und eine Priorisierung von Einsätzen auf Basis der gelieferten Informationen ist nur eingeschränkt möglich (9, 29). Die Qualität der bereitgestellten Informationen reicht damit nicht aus, um eine schnelle, präzise und fehlerarme Einsatzführung in der Frühphase eines Brandereignisses zuverlässig zu unterstützen (9, 28).

Damit erfüllen satellitengestützte Systeme das Kriterium der aussagekräftigen und fehlerfreien Information gemäß der Definition wirksamer Waldbrandfrüherkennung nicht vollständig.

3.5 Kosten-Nutzen-Vergleich

Satellitengestützte Systeme erfordern **hohe Investitionen in Entwicklung, Start und Betrieb der Satelliteninfrastruktur** (2, 6, 11). Diese Kosten werden in der Regel durch staatliche Programme oder große kommerzielle Betreiber getragen. Für Anwender erscheinen satellitengestützte Lösungen daher zunächst vergleichsweise kostengünstig, da keine eigene Sensorinfrastruktur aufgebaut werden muss und der Zugang häufig über bestehende Plattformen erfolgt.

In der Praxis relativiert sich dieser Eindruck jedoch. Wie in den Abschnitten 3.1 bis 3.4 gezeigt, führen Überflugabhängigkeit, zeitverzögerte Detektion, eingeschränkte Überprüfbarkeit und begrenzte Informationsqualität zu einem erhöhten operativen Aufwand. Verdachtsmeldungen müssen häufig nachträglich geprüft, mit zusätzlichen Informationsquellen abgeglichen oder durch andere Systeme verifiziert werden. Dies bindet Personal und verzögert Entscheidungsprozesse (9, 28). Hinzu kommen laufende Kosten für die Nutzung und Verarbeitung der Satellitendaten. Hochauflösende Daten, zeitnahe Auswertungen oder priorisierte Datenzugänge sind in der Regel kostenpflichtig. Gleichzeitig erhöhen verspätet erkannte Brände das Schadensausmaß und führen zu steigenden Folgekosten in der Brandbekämpfung und Schadensbewältigung (13). Ein weiterer wirtschaftlicher Aspekt ist die **begrenzte Lebensdauer** insbesondere erdnahe Satelliten. Ersatzstarts, technologische Erneuerungen oder der Ausbau von Konstellationen sind langfristig notwendig, jedoch für Anwender nicht direkt steuerbar und von externen Investitionsentscheidungen abhängig (27, 30).

In der Gesamtbetrachtung ergibt sich damit ein ungünstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis für die Waldbrandfrüherkennung. Die scheinbar niedrigen Einstiegskosten stehen einem hohen indirekten Aufwand, eingeschränkter Wirksamkeit in der Frühphase und potenziell erheblichen Folgekosten gegenüber (11). Satellitengestützte Systeme eignen sich daher wirtschaftlich sehr gut für Analyse- und Monitoringaufgaben, nicht jedoch als primäres Instrument der zeitkritischen Früherkennung.

3.6

Einordnung: Erkennung vs. Früherkennung

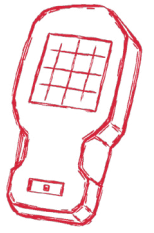
In der Praxis werden satellitengestützte Systeme im Waldbrandmanagement vor allem ergänzend eingesetzt, etwa zur großräumigen Lageübersicht oder zur nachgelagerten Analyse von Brandereignissen, nicht jedoch als primäre Quelle für die Erstmeldung eines neu entstehenden Brandes (2, 8, 9, 11). Für die Waldbrandfrüherkennung konnten satellitengestützte Systeme bislang nicht belegen, dass sie unter realen Einsatzbedingungen in zeitkritischen Situationen durchgehend zuverlässig funktionieren.

Die wesentlichen Gründe lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 
- Unterbrechungsfreie Überwachung:**
Überflugabhängigkeit bei LEO-Satelliten sowie physikalische Einschränkungen bei GEO-Satelliten verhindern eine dauerhaft lückenlose Beobachtung.
 - Kurzfristige Detektion:**
Hotspot-basierte Erkennung und mehrstufige Datenübertragung führen zu systembedingten Zeitverzögerungen, sodass eine Detektion im geforderten Minutenbereich nicht gewährleistet ist.
 - Unmittelbare Überprüfbarkeit:**
Hochauflösende Bilddaten stehen häufig nicht oder nur zeitlich verzögert zur Verfügung, was eine zeitnahe visuelle Verifikation erschwert.
 - Aussagekräftige Information:**
Begrenzte räumliche Auflösung und fehlende Kontextinformationen erschweren die exakte Lokalisierung und dadurch die Einsatzplanung.
 - Kosten-Nutzen-Aspekt:**
Scheinbar niedrige Einstiegskosten stehen erhöhtem operativem Aufwand, eingeschränkter Wirksamkeit in der Frühphase und potenziell höheren Folgekosten gegenüber.

Es ist nicht absehbar, dass satellitengestützte Systeme die Anforderungen wirksamer Waldbrandfrüherkennung kurzfristig erfüllen können.

04 Mikrosensoren im Waldbrandmanagement: Belastbare Detektion?

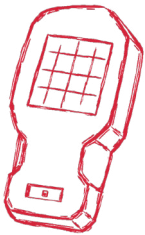


Mikrosensorbasierte Systeme werden seit einigen Jahren als alternative Ansätze zur automatisierten Waldbranddetektion diskutiert (2, 8, 22). Dabei handelt es sich um kleine, bodennahe Sensoren, die an Bäumen, Masten oder anderen **stationären Strukturen** installiert werden und **Veränderungen der Luftzusammensetzung** erfassen, wie bspw. Gase, Partikel oder physikalische Parameter, die mit einem Brandereignis in Verbindung stehen können (22).

Mikrosensoren werden häufig mit dem Anspruch positioniert, Brände direkt im Wald und in einem sehr frühen Stadium zu erkennen. Insbesondere ihre Nähe zum potenziellen Brandherd sowie die Möglichkeit einer dichten Verteilung werden dabei als Vorteile hervorgehoben. Der empirische Nachweis einer dauerhaft zuverlässigen, großflächigen Früherkennung unter realen Einsatzbedingungen ist **bislang begrenzt**. Die meisten verfügbaren Erfahrungen stammen aus Pilotprojekten oder kleinräumigen Anwendungen, deren Übertragbarkeit auf größere Gebiete nur eingeschränkt belegt ist (19, 22). Auch aus wirtschaftlicher Sicht werden mikrosensorbasierte Systeme häufig als kostengünstige Alternative zu anderen Technologien dargestellt (8, 22).

Vor diesem Hintergrund untersucht dieses Kapitel, inwieweit mikrosensorbasierte Systeme, die in Kapitel 1.2 definierte Waldbrandfrüherkennung erfüllen. Die Bewertung erfolgt – analog zu Kapitel 3 – entlang der vier Kriterien der Waldbrandfrüherkennung und der daraus resultierenden operativen und wirtschaftlichen Konsequenzen.

4.1 Unterbrechungsfreie Überwachung?



Unterbrechungsfreie Überwachung	Kurzfristige Detektion	Unmittelbar überprüfbar	Aussagekräftige und fehlerfreie Information
+ / -	+ / -	-	-

Punktuelle Messung

Mikrosensorbasierte Systeme erfassen **Messwerte punktuell** an den jeweiligen Installationsorten. An diesen einzelnen Messpunkten kann die Datenerfassung grundsätzlich kontinuierlich bei Tag und Nacht erfolgen. Eine unterbrechungsfreie Überwachung eines gesamten Waldgebiets ergibt sich daraus jedoch nicht automatisch (19, 22).

Da jeder Sensor nur einen sehr begrenzten Wirkungsbereich abdeckt, ist **für eine flächendeckende Überwachung eine sehr hohe Sensordichte** erforderlich (2, 19, 22). Je nach Hersteller variiert der Radius von wenigen Dutzend Metern bis hin zu mehreren Hundert Metern (8). In der Praxis entstehen zwischen einzelnen Sensoren zwangsläufig unbeobachtete Bereiche, in denen Brandereignisse nicht oder erst verzögert erfasst werden können. Ob ein Brand frühzeitig erkannt wird, hängt daher maßgeblich davon ab, ob er in unmittelbarer Nähe eines Sensors entsteht (19, 22). Hinzu kommt, dass mikrosensorbasierte Systeme anfällig für **betriebsbedingte Unterbrechungen** sind. Wartung, Reinitialisierung, Energieversorgung sowie Umwelteinflüsse wie Feuchtigkeit, Verschmutzung oder Vegetation können einzelne Sensoren temporär außer Betrieb setzen (22). Dadurch können temporäre Überwachungslücken entstehen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mikrosensorbasierte Systeme zwar lokal kontinuierlich messen, eine unterbrechungsfreie Überwachung eines gesamten Waldgebiets jedoch nur bei sehr hoher und dauerhaft verfügbarer Sensordichte erreichbar wäre. Diese Voraussetzung ist in der Praxis häufig nicht gegeben, sodass das Kriterium der unterbrechungsfreien Überwachung gemäß der Definition wirksamer Waldbrandfrüherkennung insgesamt nur eingeschränkt erfüllt wird.

4.2 Kurzfristige Detektion?



Unterbrechungs- freie Überwachung	Kurzfristige Detektion	Unmittelbar überprüfbar	Aussagekräftige und fehlerfreie Information
+ / -	+ / -	-	-

Verzögerte Signale

Mikrosensorbasierte Systeme detektieren Brandereignisse in der Regel indirekt, etwa über Veränderungen der Luftzusammensetzung, Gaskonzentrationen oder physikalischer Parameter. Die Erkennung setzt voraus, dass entsprechende Signale den jeweiligen Sensor räumlich erreichen und eine definierte Schwelle überschreiten. Unter optimalen Bedingungen und bei sehr dichter Sensorverteilung können mikrosensorbasierte Systeme vergleichsweise früh reagieren. In realen Einsatzszenarien variieren die Detektionszeiten jedoch stark und können – abhängig vom System – teilweise deutlich über den für eine wirksame Früherkennung kritischen Zeitfenstern liegen (19, 22). Im Unterschied zu optischen Verfahren erfolgt die Detektion dabei nicht unmittelbar am Entstehungsort, sondern kann zeitlich durch Diffusions- und Ausbreitungsprozesse verzögert werden (19). Wie schnell ein Brand erkannt wird, hängt wesentlich von der Entfernung zwischen Brandherd und Sensor, von Windverhältnissen, Topografie sowie von der Sensorempfindlichkeit ab (2, 22). Eine Detektion innerhalb eines festen Zeitfensters lässt sich dadurch strukturell nicht garantieren (19, 22).

Damit ist die kurzfristige Detektion bei mikrosensorbasierten Systemen nicht allein eine Frage der Sensortechnik, sondern eine Folge der lokalen Erfassungslogik und der physikalischen Ausbreitung der detektierten Signale. Eine zuverlässige Erkennung innerhalb des in Kapitel 1.2 definierten Minutenbereichs kann daher nicht durchgängig gewährleistet werden.

4.3 Unmittelbare Überprüfbarkeit?



Unterbrechungs- freie Überwachung	Kurzfristige Detektion	Unmittelbar überprüfbar	Aussagekräftige und fehlerfreie Information
+ / -	+ / -	-	-

Messwerte ohne visuelle Verifikation

Mikrosensorbasierte Systeme liefern bei einer Detektion ausschließlich numerische Messwerte oder daraus abgeleitete Alarmsignale, etwa auf Basis veränderter Gaskonzentrationen oder physikalischer Parameter. Ein Brandverdacht wird damit nicht visuell dargestellt, sondern lediglich als abstrakter Messwert oder Schwellenüberschreitung ausgegeben (22).

Eine unmittelbare Überprüfung des Ereignisses ist auf dieser Basis nicht möglich. Insbesondere fehlen visuelle Informationen, anhand derer ein Brand eindeutig bestätigt, lokalisiert oder in seiner Entwicklung eingeschätzt werden könnte. Ob es sich tatsächlich um ein Brandereignis handelt oder um eine andere Ursache der gemessenen Veränderung, lässt sich aus den Sensordaten allein nicht sicher bestimmen, wenngleich KI-gestützte Anlernprozesse eine exaktere Erkennbarkeit von Vegetationsbränden ermöglichen sollen. Natürliche Emissionen, biologische Prozesse oder andere Umwelteinflüsse können ähnliche Messsignale erzeugen (19).

Zudem kann der sogenannte **Lofted Plume Effect** dazu führen, dass Rauch- oder Gasbestandteile durch thermische Aufwinde in höhere Luftschichten transportiert und über größere Distanzen verlagert werden, wie auf der nachfolgenden Grafik visualisiert. In solchen Fällen detektiert ein Sensor zwar ein Signal, dieses lässt sich jedoch nicht eindeutig dem tatsächlichen Entstehungsort eines Brandes zuordnen (23). Gleichzeitig ist der fälschlicherweise alarmierende Sensor blockiert.

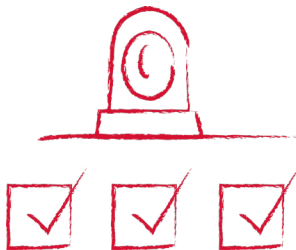
Lofted Plume Effect



Quelle: Eigene Darstellung.

Die Problematik, Meldungen umgehend visuell zu überprüfen, erhöht den zeitlichen Aufwand, bindet Ressourcen und birgt das Risiko unnötiger Einsätze. Insbesondere bei großflächigem Einsatz erhöht sich dadurch der operative Aufwand. Eine visuelle Verifikation ist erst durch den gleichzeitigen Einsatz optischer Prüfung (oft mittels Drohnen) oder durch Einsatzkräfte vor Ort möglich (8, 19, 22). Die unmittelbare Überprüfbarkeit einer Detektion nach Punkt 3 der Definition der Früherkennung ist nicht gegeben.

4.4 Aussagekräftige und fehlerfreie Information?



Unterbrechungs- freie Überwachung	Kurzfristige Detektion	Unmittelbar überprüfbar	Aussagekräftige und fehlerfreie Information
+ / -	+ / -	-	-

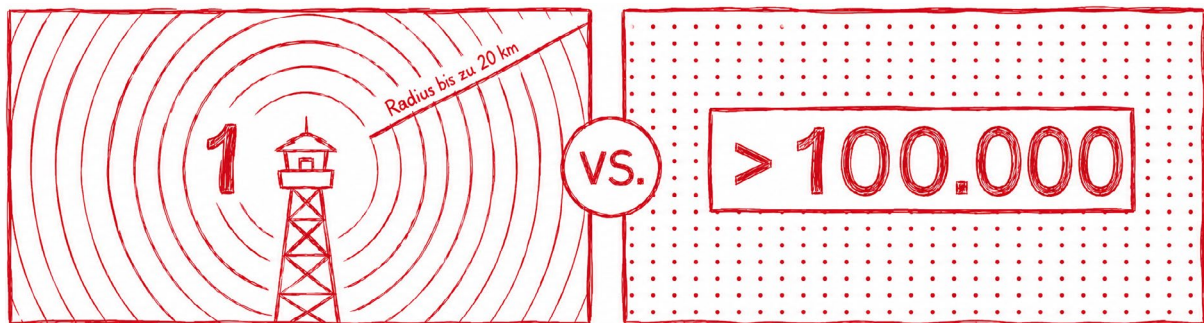
Signalinterpretation statt lokalisierter Sicherheit

Mikrosensorbasierte Systeme liefern im Alarmfall **Messwerte sowie die Koordinaten** des auslösenden Sensors. Diese Informationen zeigen an, wo ein Signal detektiert wurde, erlauben jedoch keine verlässlichen Aussagen über den tatsächlichen Ort, das Ausmaß oder die Entwicklung eines möglichen Brandereignisses (23). Ein dichtes Sensornetz kann die räumliche Einordnung verbessern und die Wahrscheinlichkeit erhöhen, dass ein Ereignis räumlich eingegrenzt wird (19). Die grundlegende Problematik bleibt jedoch bestehen: Da Sensoren nur **punktuell messen und detektierte Signale durch atmosphärische Effekte** verlagert werden können, ist die Position des Sensors nicht automatisch mit dem Entstehungsort eines Brandes gleichzusetzen (23). Die bereitgestellten Daten bleiben damit räumlich und inhaltlich mehrdeutig (19).

Damit erfüllen mikrosensorbasierte Systeme das Kriterium der aussagekräftigen und fehlerfreien Information gemäß der Definition wirksamer Waldbrandfrüherkennung insgesamt nicht

4.5 Kosten-Nutzen-Vergleich

Mikrosensorbasierte Systeme werden häufig als kostengünstige Lösung für die Waldbrandfrüherkennung dargestellt, da einzelne Sensoren vergleichsweise preiswert sind (8). In der Praxis relativiert sich dieser Eindruck jedoch bei großflächigem Einsatz, wenn Tausende bis Zehntausende Geräte erforderlich sind (22), wie die nachfolgende Grafik zeigt. Um eine relevante Abdeckung zu erreichen, ist ein sehr **dichtes Sensornetz** erforderlich, das Installation, Energieversorgung, Kommunikation und laufende Wartung in großem Umfang notwendig macht.



Quelle: Eigene Darstellung.

Ein IQ FireWatch System überwacht einen Radius von 20 km. Für eine vergleichbare Abdeckung wären rechnerisch bei einem Radius von 50 m über 100.000 Mikrosensoren notwendig.

Hinzu kommen **erhöhte operative Aufwände** durch nachgelagerte Verifikationsprozesse, Fehlalarme und zusätzliche Prüfmaßnahmen. Diese Faktoren wirken sich sowohl auf die Reaktionszeit als auch auf die laufenden Betriebskosten aus. Insgesamt ergibt sich damit ein ungünstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis für den Einsatz als primäres System der zeitkritischen Waldbrandfrüherkennung.

4.6 Einordnung: Signal vs. belastbare Früherkennung

Mikrosensorbasierte Systeme können im Waldbrandmanagement eine ergänzende Rolle spielen, etwa in besonders sensiblen Bereichen, in Talsenken oder als redundantes Element innerhalb eines mehrstufigen Systems. Sie liefern zusätzliche Umweltinformationen und können unter bestimmten Bedingungen frühzeitig auf Veränderungen hinweisen (19, 22, 11).

Für eine flächendeckende, kontinuierliche und überprüfbare Waldbrandfrüherkennung stoßen mikrosensorbasierte Systeme jedoch an strukturelle Grenzen. Die punktuelle Messung, die starke Abhängigkeit von Umwelteinflüssen, die fehlende visuelle Verifikation sowie der erhöhte operative Aufwand erschweren eine belastbare Erstmeldung in der frühen Phase eines Brandes.

Zusammenfassend ergibt sich folgende Einordnung entlang der Kriterien der Waldbrandfrüherkennung:

- 1 Unterbrechungsfreie Überwachung:**
Kontinuierliche Messung am jeweiligen Sensorstandort, jedoch aufgrund der begrenzten Reichweite keine flächendeckende Überwachung ohne sehr hohe Sensordichte.
- 2 Kurzfristige Detektion:**
Die Ausbreitung von Rauch und Gasen ist stark abhängig von Wind, Topografie und Brandverlauf. Eine frühzeitige Erkennung ist nur möglich, wenn mehrere dieser Faktoren gleichzeitig günstig zusammenwirken.
- 3 Unmittelbare Überprüfbarkeit:**
Reine Messdaten liefern keine visuelle Bestätigung. Zeitkritische Entscheidungen müssen ohne Bildgrundlage getroffen werden. Eine Kopplung mit bildgebenden Verfahren (z.B. Drohnen) führt zu zusätzlichem Zeitverlust.
- 4 Aussagekräftige und fehlerfreie Information:**
Alarmmeldungen beziehen sich primär auf den Sensorstandort. Eine präzise Brandlokalisierung und belastbare Lagebeurteilung sind nur eingeschränkt möglich.
- 5 Kosten-Nutzen-Aspekt:**
Ein flächendeckender Einsatz erfordert große Stückzahlen, regelmäßige Wartung und Kalibrierung. Mit zunehmender Skalierung steigen Systemkomplexität und operativer Aufwand.



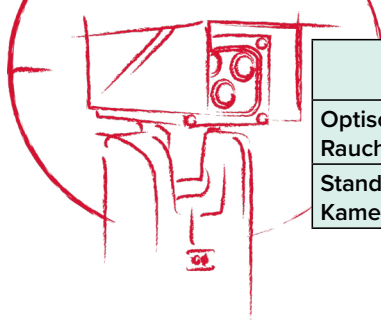
Optische Rauchererkennung ist seit vielen Jahren Bestandteil der technischen Waldbrandfrüherkennung. Dabei werden visuelle Sensoren auf erhöhten, **stationären Trägermedien** installiert, um Rauchentwicklungen frühzeitig zu erfassen.

Innerhalb dieser Systemklasse bestehen jedoch erhebliche Unterschiede in Sensorik, Datenverarbeitung und Systemarchitektur (8). Einerseits gibt es **spezialisierte optische Rauchsensoren**, die für die Vegetationsbranddetektion entwickelt wurden und deren Hardware- und Softwarekomponenten auf diese Aufgabe ausgelegt sind. Andererseits werden **Standard-CCTV-Kameras** (Closed-Circuit Television) eingesetzt, die ursprünglich für allgemeine Überwachungsaufgaben konzipiert sind und für die Waldbranderkennung um generische Künstliche Intelligenz-Modelle oder einfache Bewegungserkennung erweitert werden.

Im Folgenden werden beide Ansätze anhand der Kriterien wirksamer Früherkennung sowie ihres praktischen Aufwands systematisch analysiert.

5.1

Unterbrechungsfreie Überwachung?



	Unterbrechungs- freie Überwachung	Kurzfristige Detektion	Unmittelbar überprüfbar	Aussagekräftige und fehlerfreie Information
Optische Rauchsensoren	+	+	+	+
Standard- Kameras	+ / -	+ / -	+	+ / -

Kontinuierliche Präsenz

Eine wirksame Waldbrandfrüherkennung erfordert die kontinuierliche Überwachung eines fest definierten Gebiets bei Tag und Nacht. Optische Systeme werden hierfür auf stationären, erhöhten Trägermedien installiert und ermöglichen – abhängig vom eingesetzten System – die Beobachtung großer Waldflächen aus großer Entfernung.

Sowohl spezialisierte optische Rauchdetektionssysteme als auch CCTV-basierte Lösungen können so konzipiert werden, dass sie einen Überwachungsbereich **vollständig abdecken**, etwa durch rotierende, schwenk- und neigbare Kameras (PTZ) oder durch den kombinierten Einsatz mehrerer Kameras. Auch die Geschwindigkeit einer Rotation kann dabei je nach eingesetztem System stark variieren. Unterschiede ergeben sich vielmehr aus der Auslegung der Sensorik und der Bilddatenverarbeitung. Spezialisierte optische Systeme sind gezielt für die frühzeitige Erkennung schwacher Rauchentwicklungen über große Distanzen konzipiert.

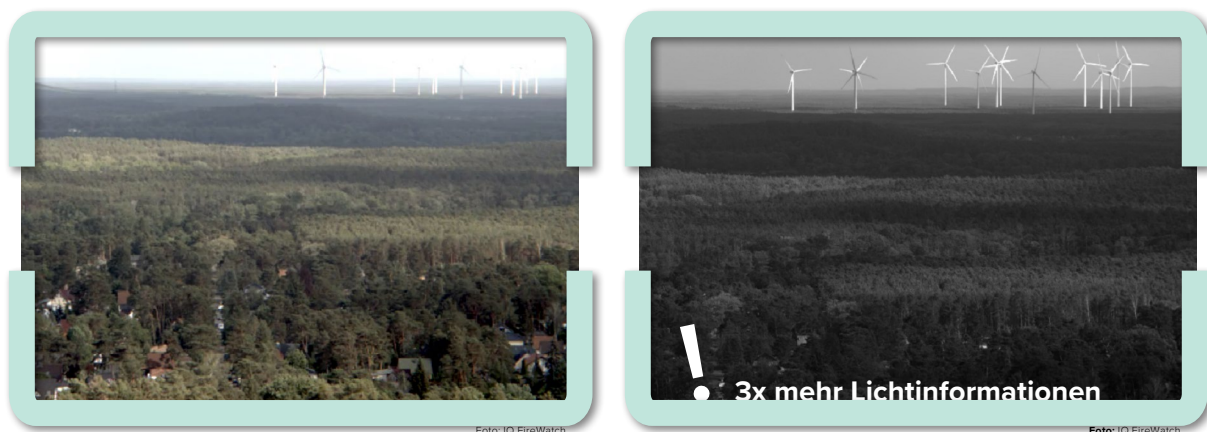
IQ FireWatch steht exemplarisch für diese Klasse spezialisierter optischer Rauchdetektionssysteme. Die eingesetzte **multispektrale Sensorik** und die darauf abgestimmte Bildverarbeitung zielen darauf ab, Rauchentwicklungen auch bei großen Beobachtungsdistanzen sowie unter wechselnden Lichtverhältnissen zuverlässig zu erfassen. Hierzu werden mehrere Sensorkanäle kombiniert, darunter monochrome Sensoren zur hochauflösenden Rauchererkennung am Tag, RGB-Sensoren für zusätzliche Spektralinformationen sowie ein Nahinfrarotsensor für die Rauchdetektion in der Nacht.

Durch das Zusammenspiel dieser Spektralbereiche steigt die Detektionsqualität deutlich, da die jeweiligen Stärken der Kanäle in unterschiedlichen Situationen (Tageslicht, große Distanz, Dämmerung und Nacht) gezielt genutzt werden. Diese Kombination trägt dazu bei, die Überwachung auch bei Dämmerung und Nacht (innerhalb der Grenzen der Physik) gleichmäßig aufrechtzuerhalten. In der Praxis dreht sich das System innerhalb von 4–6 Minuten um 360°. Der Überwachungsradius beträgt nahezu unter allen Wetterbedingungen bis zu 20 km; in vielen Fällen auch darüber hinaus.

CCTV-basierte Systeme nutzen demgegenüber überwiegend RGB-Sensorik und stammen ursprünglich aus der allgemeinen Sicherheits- und Objektüberwachung (8). Sie werden häufig für die Waldbrandfrüherkennung erweitert, ihre Leistungsfähigkeit im Dauerbetrieb hängt jedoch stark von Optik, Sensorqualität, Bildkompression und eingesetzter Analysesoftware ab. Insbesondere bei großen Beobachtungsdistanzen sowie bei Dämmerung und Nacht können sich daraus Einschränkungen ergeben, die die Zuverlässigkeit der Überwachung beeinflussen.

Bei größeren Beobachtungsdistanzen tritt für RGB-basierte CCTV-Kameras eine zusätzliche physikalische Einschränkung hinzu: die **atmosphärische Rayleigh-Streuung**. Mit zunehmender Entfernung werden kurzwellige Lichtanteile stärker gestreut, wodurch Farbkontraste im RGB-Bild abnehmen. Feine Rauchentwicklungen erscheinen abgeschwächt oder verlieren an Differenzierbarkeit. RGB-basierte Systeme sind damit auch unter optimalen Lichtbedingungen distanzabhängig kontrastlimitiert. Spezialisierte Systeme mit separater monochromer Sensorik adressieren diese physikalische Limitierung konstruktiv. Da sie primär Helligkeitsinformationen statt Farbinformation auswerten, reagieren solche Sensoren weniger empfindlich auf spektrale Verschiebungen und ermöglichen auch bei großen Beobachtungsdistanzen eine stabilere Differenzierung rauchähnlicher Ereignisse. Der nachfolgende Bildvergleich verdeutlicht diesen Unterschied zwischen RGB- und monochromer Optik. Die variierende Sichtbarkeit der Windkraftanlagen illustriert die unterschiedlichen Kontrastverhältnisse.

Vergleich eines RGB- mit einem monochromen Bild, aufgenommen durch IQ FireWatch

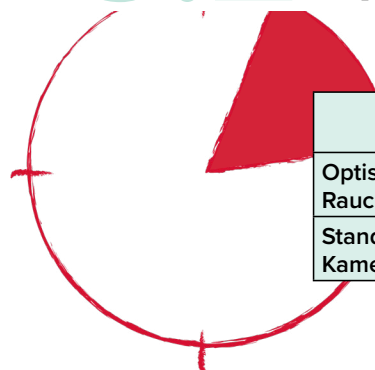


Unabhängig vom eingesetzten System unterliegt optisch-terrestrische Überwachung topografischen Grenzen. Geländeformen, Vegetation oder Bebauung können Sichtbereiche einschränken und müssen bei der Standortwahl und Systemplanung berücksichtigt werden. Durch geeignete Standortanalyse und die Kombination mehrerer Installationen lassen sich solche Effekte jedoch häufig reduzieren.

Zusammenfassend zeigt sich, dass sowohl spezialisierte optische Rauchsensoren als auch CCTV-basierte Systeme grundsätzlich eine kontinuierliche Beobachtung großer Waldflächen ermöglichen können. Spezialisierte optische Rauchsensoren bieten hier die zuverlässigste und durchgängigste Überwachung. CCTV-basierte Systeme erfüllen diese Anforderungen nur eingeschränkt und unter bestimmten Bedingungen kann es zu längeren Beobachtungsintervallen oder qualitativen Einschränkungen kommen.

5.2

Kurzfristige Detektion?

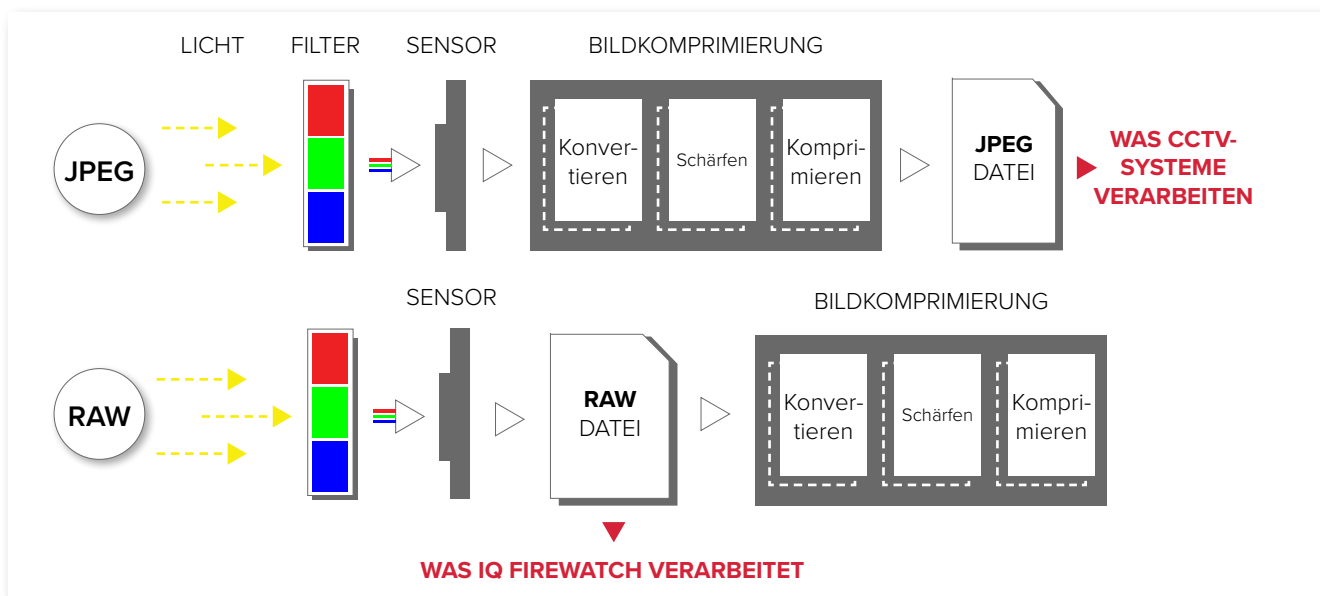


	Unterbrechungs- freie Überwachung	Kurzfristige Detektion	Unmittelbar überprüfbar	Aussagekräftige und fehlerfreie Information
Optische Rauchsensoren	+	+	+	+
Standard- Kameras	+ / -	+ / -	+	+ / -

Verlustbehaftet vs. Detailreich

Rauch ist eines der frühesten sichtbaren Anzeichen eines Brandereignisses (6). Ob eine Detektion im Minutenbereich gelingt, hängt jedoch nicht allein davon ab, dass Rauch sichtbar ist, sondern wie früh und wie zuverlässig schwache Rauchentwicklungen identifiziert werden können. Sowohl spezialisierte optische Rauchsensoren als auch CCTV-basierte Systeme können Rauch erfassen. Die tatsächliche Erkennungszeit ergibt sich jedoch aus dem Zusammenspiel von Beobachtungsintervall, Qualität der Bilddaten und der Analysesoftware. Bei rotierenden oder schwenk- und neigbaren Kamerasystemen bestimmt das Beobachtungsintervall, wie schnell ein neu entstehendes Ereignis erstmals erfasst wird.

Für die zuverlässige Erkennung frühen Rauchs sind Qualität und Detailtiefe der erfassten Bilddaten entscheidend. Gerade bei schwachen Rauchentwicklungen kommt es darauf an, dass feine Helligkeitsunterschiede und kleine Veränderungen im Bild deutlich sichtbar bleiben. Spezialisierte Systeme wie IQ FireWatch verwenden deshalb häufig hochauflösende, unkomprimierte Rohdaten (RAW). Viele Standard-CCTV-Kameras speichern und übertragen ihre Bilder dagegen in komprimierten Formaten wie JPEG. Diese verlustbehaftete Kompression ist für das menschliche Auge oft kaum sichtbar, führt in der computerbasierten Analyse jedoch zu Informationsverlusten: Die Zahl der Farbstufen nimmt ab, Konturen werden weicher und feine Unterschiede im Bild sind schwerer zu erkennen. Dadurch sinkt die Differenzierbarkeit schwacher Rauchentwicklungen – eine zuverlässige Erkennung wird erschwert und kann sich verzögern. Die detailreichen RAW-Daten spezialisierter Systeme bilden dagegen eine deutlich präzisere Grundlage für die weiterführende Analyse und Erkennung.



Nach der Erfassung der Bilddaten ist deren Analyse für die Wirksamkeit der Erkennung ebenso entscheidend. In diesem Punkt unterscheiden sich spezialisierte optische Früherkennungssysteme fundamental von CCTV-basierten Ansätzen: Viele **CCTV-Systeme** setzen auf generische KI-Modelle, Standard-Algorithmen oder einfache Bewegungserkennung, um Rauch oder Feuer zu identifizieren. Die zugrunde liegenden Trainingsdaten sind dabei häufig in Umfang und Qualität begrenzt, und die Modelle sind nicht auf die spezifischen Muster von Vegetationsbränden optimiert. In der Praxis ist „KI“ in diesem Kontext zudem von geringer Qualität und keine belastbar nachgewiesene, einsatzrelevante Lösung.

IQ FireWatch verfolgt dagegen einen spezialisierten Ansatz: Das System kombiniert KI-basierte Bildanalyse mit merkmalsbasierten Algorithmen, die gezielt auf die Früherkennung von Vegetationsbränden ausgelegt sind und auf mehr als 20 Jahren realem Bild- und Einsatzmaterial trainiert wurden. Die Bildverarbeitung erfolgt in Echtzeit direkt am Turmstandort, sodass Übertragungs- und Auswerteverzögerungen minimiert werden. In der operativen Wirkung resultieren daraus hohe Erkennungsraten bei gleichzeitig niedriger Fehlalarmquote. Damit sinkt der Aufwand für Nachbearbeitung und Verifikation, und ein Operator kann eine größere Anzahl an Installationen parallel überwachen. Die Fähigkeit zur frühzeitigen Detektion hängt, sowohl aus systemischer Sicht als auch am praktischen Beispiel von IQ FireWatch, maßgeblich vom Zusammenspiel aus Beobachtungsintervall, Bilddatenqualität und speziell darauf ausgerichteter Analyse ab. Werden in einem System einer oder mehrere dieser Faktoren eingeschränkt, verringert sich das Potenzial zur schnellen Erkennung von Bränden entsprechend.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass spezialisierte optische Rauchererkennungssysteme durch hochwertige Bilddaten und speziell abgestimmte Analyseverfahren eine schnellere und zuverlässigere Detektion von Bränden bieten. Im Vergleich zu Standard-CCTV-Systemen erkennen sie Rauch früher und präziser.

5.3 Unmittelbare Überprüfbarkeit?



	Unterbrechungs- freie Überwachung	Kurzfristige Detektion	Unmittelbar überprüfbar	Aussagekräftige und fehlerfreie Information
Optische Rauchsensoren	+	+	+	+
Standard- Kameras	+ / -	+ / -	+	+ / -

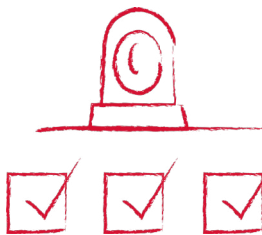
Bildqualität und Analysesoftware entscheidend

Ein zentrales Merkmal optischer Rauchererkennungssysteme ist die unmittelbare visuelle Überprüfbarkeit jeder Detektion (8). Dieses Kriterium kann sowohl durch spezialisierte optische Systeme als auch durch CCTV-basierte Lösungen grundsätzlich erfüllt werden – die praktische Verifikationsqualität hängt jedoch maßgeblich von der verfügbaren Bildqualität und der unterstützenden Analysesoftware ab.

Bei **IQ FireWatch** werden Verdachtsmeldungen in der Benutzersoftware in Echtzeit dargestellt und mit den jeweils relevanten Bildsequenzen verknüpft. Dadurch ist eine unmittelbare, fortlaufende Beurteilung der potenziellen Rauchentwicklung möglich. Weitere Analysemöglichkeiten stehen in der Benutzersoftware zur Verfügung. Diese visuelle Evidenz unterstützt die Priorisierung von Ereignissen, reduziert Unsicherheiten in der Bewertung und senkt damit sowohl Fehlalarme als auch den operativen Prüfaufwand. Gleichzeitig werden Entscheidungen nachvollziehbarer dokumentiert, was die Abstimmung mit Einsatzkräften und die Akzeptanz im operativen Prozess unterstützt.

CCTV-basierte Systeme können zwar ebenfalls Bildmaterial zur visuellen Überprüfung bereitstellen. In der Praxis ist die Verifikation jedoch häufig erschwert, wenn Bilddaten stärker komprimiert sind. Dies kann zu erhöhtem Prüfaufwand und größerer Unsicherheit in der Einordnung einzelner Meldungen führen.

5.4 Aussagekräftige und fehlerfreie Information?



	Unterbrechungs- freie Überwachung	Kurzfristige Detektion	Unmittelbar überprüfbar	Aussagekräftige und fehlerfreie Information
Optische Rauchsensoren	+	+	+	+
Standard- Kameras	+ / -	+ / -	+	+ / -

Regionale Einordnung vs. präzise Lokalisierung

Nach der Detektion eines Rauchereignisses ist die präzise Lokalisierung der Quelle entscheidend, um Einsatzkräfte zielgerichtet zu disponieren und Reaktionszeiten zu minimieren. Die Positionsbestimmung kann entweder über eine Einzelpeilung erfolgen oder – sofern mehrere Sensoren im Erkennungsgebiet verfügbar sind – über eine Kreuzpeilung. Insbesondere die Einzelpeilung stellt dabei hohe Anforderungen an Sensorik, Vermessung und Bildverarbeitung. Nur wenn der Ursprungsort schnell und verlässlich identifiziert wird, kann frühzeitig und wirksam reagiert werden.

Die **IQ FireWatch-Sensorsysteme** werden hierfür exakt vermessen und präzise kalibriert. In Kombination mit lokalen Höhenprofilen sowie Kartenmaterial der Zielregion ermöglicht dieses etablierte Verfahren auch bei Einzelpeilungen eine hohe Lokalisierungsgenauigkeit – insbesondere bei großen Beobachtungsdistanzen. Ergänzend unterstützt die Software die Georeferenzierung, indem aus der Detektion automatisiert exakte Koordinaten abgeleitet werden. Diese georeferenzierten Daten verbessern die operative Handlungsfähigkeit. Sie ermöglichen eine schnellere Disposition, eine gezieltere Ressourcenplanung und ein konsistenteres Lagebild.

Bei **Standard-CCTV-Kameras** erfolgt eine standortspezifische Vermessung und Kalibrierung in der Regel nicht. Entsprechend ist die Lokalisierung weniger präzise und eine belastbare Einzelpeilung ist häufig nicht oder nur mit erheblichem Zusatzaufwand möglich.

5.5 Kosten-Nutzen-Vergleich

Stationäre, terrestrisch installierte optische Systeme erfordern eine **geeignete Infrastruktur**, insbesondere stabile und ausreichend hohe Trägerstrukturen, eine zuverlässige Energieversorgung sowie belastbare Kommunikationsanbindungen (8). Diese Voraussetzungen können – je nach Region – zu erheblichen Vorabinvestitionen führen. Für einen aussagekräftigen Kostenvergleich ist daher, wie bei allen Systemen, nicht allein die Anschaffung einzelner Komponenten entscheidend, sondern die Gesamtbetrachtung über Abdeckungsfläche, erforderliche Netzdichte, laufende Betriebskosten (Wartung, Lizenzen, Operating) und die erwartete Leistung über den Lebenszyklus hinweg.

Spezialisierte optische Rauchsensoren wie **IQ FireWatch** weisen in der Regel höhere Anschaffungskosten pro Einheit auf als Standard-CCTV-Kameras. Dieser CAPEX-Vergleich greift jedoch zu kurz: Aufgrund der großen Reichweite und der hohen Detektionsqualität kann ein einzelner Standort deutlich größere Flächen abdecken, sodass die erforderliche Anzahl an Installationen – und damit Infrastruktur-, Installations- und Wartungsaufwand – insgesamt sinkt. Die Betriebskosten (OPEX) sind bei Spezialsystemen typischerweise niedrig, da Hardware und Software für den Dauerbetrieb im Freien und die Waldbrandfrüherkennung ausgelegt sind. Die Verdachtsmeldungen werden durch Operatoren verifiziert, was in Kombination mit der spezialisierten Analyse eine sehr niedrige Fehlalarmquote und reduzierten Operating-Aufwand ermöglicht. Derzeit überwachen IQ FireWatch Operatoren bis zu 16 Standorte gleichzeitig, grundsätzlich ist auch mehr denkbar. Die technischen Kernkomponenten erreichen systemabhängig eine Lebensdauer von bis zu zehn Jahren, wodurch Ersatzinvestitionen selten notwendig sind.

Zwar sind die Investitionskosten pro Einheit bei **Standard-CCTV-Systemen** oft geringer als bei Spezialsystemen. Maßgeblich für die Bewertung ist jedoch die tatsächlich erreichbare Abdeckung und Detektionsleistung. Aufgrund der begrenzten Reichweite und Detektionsqualität von CCTV-Kameras im Vergleich zu spezialisierten optischen Rauchsensoren ist zur Abdeckung großer Gebiete eine deutlich höhere Kameradichte erforderlich. Dies erhöht den Bedarf an Standorten sowie den Infrastruktur-, Installations- und Wartungsaufwand und steigert entsprechend die Investitionskosten und die betriebliche Komplexität.

Im Betrieb kommen laufende Aufwände für Wartung, Lizenzen und das tägliche Operating hinzu. Gleichzeitig ist die Datenbasis und -qualität vieler Standard-CCTV-Systeme für eine zuverlässige Früherkennung oft eingeschränkt, was zu höheren Fehlalarmraten und zusätzlichem Prüfaufwand führt. Insgesamt relativieren sich dadurch die geringeren Anschaffungskosten: Die höhere Kameradichte sowie der erhöhte Betriebsaufwand können die Total Cost of Ownership (TCO) im großflächigen Einsatz deutlich erhöhen.

5.6 Einordnung: Geeignet als Grundlage langfristiger Risikominderung

Zusammenfassend ergibt sich folgende Einordnung anhand der Definition Früherkennung:

- 1 Unterbrechungsfreie Überwachung:**
Spezialisierte optische Rauchsensoren ermöglichen in der Regel eine unterbrechungsfreie Überwachung, während CCTV-Systeme diese Anforderungen meist eingeschränkter und mit potenziellen qualitativen Einbußen erfüllen können.
- 2 Kurzfristige Detektion:**
Spezielle optische Rauchererkennungssysteme erfassen Brände dank hochwertiger Bilddaten und gezielter Analysen meist schneller und zuverlässiger als herkömmliche CCTV-Anlagen.
- 3 Unmittelbare Überprüfbarkeit:**
Optische Systeme ermöglichen eine direkte Bildprüfung jedes Verdachtsfalls; bei qualitativ höherwertiger Sensorik und Analyse erhöht sich die Beurteilungssicherheit und reduziert sich der operative Folgeaufwand.
- 4 Aussagekräftige und fehlerfreie Information:**
Standortspezifisch kalibrierte Spezialsysteme unterstützen eine koordinatengenaue Lokalisierung und liefern georeferenzierte Daten für die Einsatzplanung; bei nicht kalibrierten CCTV-Systemen ist die räumliche Präzision eingeschränkt.
- 5 Skalierbare Wirtschaftlichkeit bei großer Flächenabdeckung:**
Trotz höherer Anfangsinvestitionen können spezialisierte Systeme durch große Überwachungsradien, geringe Fehlalarmquoten und lange Lebensdauer eine günstige Kostenstruktur pro Hektar erreichen; scheinbar günstigere Alternativen relativieren sich bei Berücksichtigung von Netzdichte, Betriebsaufwand und Lebenszykluskosten.

Optische Rauchererkennung ist die einzige der betrachteten Technologien, deren Wirksamkeit in der Waldbrandfrüherkennung über Jahrzehnte hinweg unter realen Einsatzbedingungen kontinuierlich nachgewiesen und weiterentwickelt wurde. Für eine nachhaltige Risikominderung ist die technologische Reife besonders wichtig. Systeme, die über Jahre hinweg stabil laufen, von erfahrenem Personal zuverlässig bedient werden und sich problemlos in bestehende Abläufe einfügen, sorgen für Vertrauen und ermöglichen eine stetige Weiterentwicklung und Anpassung der Einsatzprotokolle.

Für die technologische Reife von IQ FireWatch ist belastbare Evidenz vorhanden, die seine dauerhafte Effektivität unter variierenden Umwelt- und Risikobedingungen nachweist.

In den vorangegangenen Kapiteln wurden verschiedene Technologien zur Waldbrandfrüherkennung betrachtet – von Satelliten über Mikrosensoren bis hin zu optischen Rauchdetektionssystemen. Für die Auswahl einer geeigneten Lösung ist entscheidend, wie gut ein System die vier Kriterien wirksamer Früherkennung erfüllt und welche operativen sowie wirtschaftlichen Auswirkungen daraus entstehen.

Dieses Kapitel fasst die zentralen technologieübergreifenden Erkenntnisse zusammen und unterstützt die Einordnung der Systeme im jeweiligen Einsatzkontext. Aus den vorangegangenen Analysen ergibt sich folgende Einordnung:

Optische Rauchsensoren bieten das ausgewogenste Verhältnis aus Leistung, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit für die flächendeckende, zeitkritische Waldbrandfrüherkennung. Sie ermöglichen eine kontinuierliche Überwachung großer Gebiete, liefern visuell überprüfbare und handlungsrelevante Informationen und weisen bei etablierten Systemen eine niedrige Fehlalarmquote sowie eine hohe operative Effizienz auf. Über den Lebenszyklus betrachtet ergeben sich dadurch vergleichsweise geringe Kosten pro definierter Fläche.

Standard-CCTV-Kameras erscheinen pro Installation häufig kostengünstiger. Ihre begrenzte Reichweite, eingeschränkte Detektionsleistung und höhere Fehlalarmanfälligkeit erfordern jedoch in der Regel eine deutlich höhere Installationsdichte, um eine vergleichbare Abdeckung zu erreichen. Bei großflächigem Einsatz relativiert sich der anfängliche Kostenvorteil dadurch, insbesondere durch steigenden Infrastruktur- und Operating-Aufwand.

Mikrosensoren sind für großflächige Waldgebiete ohne dichte Infrastruktur wirtschaftlich nur eingeschränkt darstellbar. Sie können jedoch als ergänzende oder redundante Lösung in klar abgegrenzten Bereichen sinnvoll eingesetzt werden, etwa zur punktuellen Absicherung sensibler Zonen oder als Bestandteil mehrstufiger Systeme.

Satellitenbasierte Technologien eignen sich primär für ein gutes Lage- und Monitoring Bild sowie für nachgelagerte Analysen. Als tragfähiges Frühwarnsystem im Sinne der Definition der Waldbrandfrüherkennung sind sie aufgrund struktureller Einschränkungen derzeit nicht geeignet.

	Optische Rauchsensoren	Satelliten	Mikrosensoren	Standard-CCTV-Kameras
1 Unterbrechungsfreie Überwachung	+	-	+ / -	+ / -
2 Kurzfristige Detektion	+	-	+ / -	+ / -
3 Unmittelbar überprüfbar	+	+ / -	-	+
4 Aussagekräftige und fehlerfreie Information	+	+ / -	-	+ / -

Während neue Technologien ihre Leistungsfähigkeit erst über längere Zeiträume unter Beweis stellen müssen, verfügen etablierte Systeme bereits über langjährig gesammelte Praxiserfahrung. Ein entscheidender Faktor für die Verlässlichkeit in der Waldbrandfrüherkennung.

Insgesamt zeigt der Vergleich, dass Wirtschaftlichkeit in der Waldbrandfrüherkennung nicht durch niedrige Anschaffungskosten entsteht, sondern durch frühzeitige, verlässliche Detektion, geringe Folgekosten im Betrieb und die Vermeidung großflächiger Schadensereignisse. Technologien mit geringer Detektionshäufigkeit oder hoher Fehleranfälligkeit führen zu verzögerten Brandentdeckungen und damit zu Schäden, die die initialen Einsparungen weit übersteigen.

6.1

Leitfragen zur Entscheidungshilfe

Um in der Entscheidungsfindung einen Schritt voranzukommen, können folgende **Orientierungsfragen** hilfreich sein:

Schutzbedarf und Zielsetzung

- Ist eine unterbrechungsfreie Überwachung erforderlich, oder genügt eine Kontrolle in größeren Zeitabständen?
- Ist das Gebiet dicht besiedelt und / oder besonders wertvoll (ökologisch, wirtschaftlich, infrastrukturell)?
- Wie groß ist das zu überwachende, gefährdete Gebiet?

Detektion & Reaktionsanforderungen

- Wie schnell soll ein Brand nach seiner Entstehung erkannt werden können?
- Soll die Technologie primär zur Früherkennung oder zum Monitoring eingesetzt werden?
- Wie hoch ist die Toleranz für Fehlalarme?

Verifikation & Informationen

- Wie schnell sollen Detektionen mittels Bild überprüfbar sein, bevor Einsatzkräfte ausrücken?
- Welche Informationen soll das System bereitstellen (z. B. Bilder, Zeitstempel, Koordinaten)?
- Wie genau soll der Brand lokalisiert werden können?

Betrieb & Langfristigkeit

- Ist eine langjährige Einsatzerfahrung in realen Waldbrand-Szenarien ein entscheidendes Kriterium?
- Wie lange soll die Technologie eingesetzt werden?

Wirtschaftlichkeit & Abhängigkeit

- Wie hoch sind die Gesamtkosten über die vollständige Lebensdauer (Total Cost of Ownership)?
- Entstehen durch die Wahl der Technologie langfristige Abhängigkeiten von Dritten oder staatlichen Programmen, beispielsweise in der Verfügbarkeit oder dem Datenzugang?

6.2

Praktische Erfahrung - Pilotprojekte

Pilotprojekte können einen wichtigen Beitrag zur Entscheidungsfindung leisten, da sie helfen, Unsicherheiten zu reduzieren und erste Erfahrungen mit einer Technologie im eigenen Einsatzkontext zu sammeln. Gleichzeitig sind sie mit erheblichem zeitlichem, organisatorischem und finanziellem Aufwand verbunden und entfalten ihre Aussagekraft erst über eine vollständige Waldbrandsaison. Kurzzeitige Tests oder Einzelversuche liefern daher häufig nur eingeschränkt belastbare Ergebnisse. Einzelne Testfeuer oder kurzzeitige Versuche bilden reale Waldbrandbedingungen, typische Ausbreitungsdynamiken (25) sowie die Vielfalt meteorologischer und topografischer Einflüsse nur unzureichend ab. Insbesondere künstlich erzeugte Testszenarien – etwa mit Nebelmaschinen oder kontrollierten Rauchquellen – können zu irreführenden Ergebnissen führen, da sie weder das visuelle Erscheinungsbild noch das zeitliche Verhalten realer Waldbrände realistisch widerspiegeln. Für die Bewertung einer Technologie ist daher entscheidend, ob sie ihre Leistungsfähigkeit unter realen Einsatzbedingungen bereits über einen längeren Zeitraum unter Beweis gestellt hat (4). Umfangreiche Praxiserfahrungen in vergleichbaren Waldbrandregionen stellen eine verlässlichere Entscheidungsgrundlage dar als ein isoliertes Pilotprojekt. Detektionsgeschwindigkeit, Fehlalarmverhalten, Verifikationsprozesse und operativer Aufwand sind dort bereits über mehrere Jahre dokumentiert und ausgewertet.

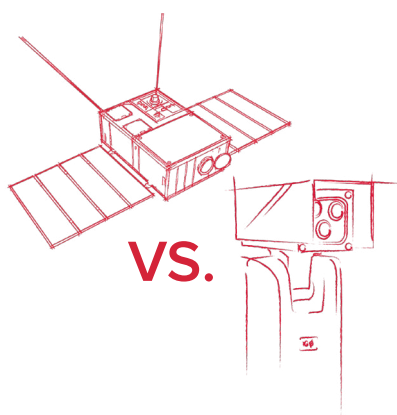
Weiterführende Entscheidungsmetriken und methodische Hinweise zur Bewertung von Früherkennungssystemen im Praxiseinsatz liegen unter anderem vom kanadischen Forschungsinstitut FP Innovations vor (29).

- (1) S. T. McKinney, I. Abrahamson, T. Jain und N. Anderson, „A systematic review of empirical evidence for landscape-level fuel treatment effectiveness,” *Fire Ecology*, Bd. 18, S. 21, 2022.
- (2) R. Honary, J. Shelton und P. Kavehpour, „A review of technologies for the early detection of wildfires,” *ASME Open Journal of Engineering*, Bd. 4, S. 040803, 2025.
- (3) S. Yang, Q. Huang und M. Yu, „Advancements in remote sensing for active fire detection: A review of datasets and methods,” *Science of the Total Environment*, S. 173273, 2024.
- (4) N. Caron, H. N. Noura, L. Nakache, C. Guyeux und B. Aynes, „AI for wildfire management: From prediction to detection, simulation, and impact analysis—bridging lab metrics and real-world validation,” *AI*, Bd. 6, S. 253, 2025.
- (5) R. S. Allison, J. M. Johnston, C. A. Craig und S. Jennings, „Airborne optical and thermal remote sensing for wildfire detection and monitoring,” *Sensors*, Bd. 16, Nr. 8, S. 1310, 2016.
- (6) M. Bugarić, D. Krstinić, L. Šerić und D. Stipaničev, „Current trends in wildfire detection, monitoring and surveillance,” *Fire*, Bd. 8, Nr. 9, S. 356, 2025.
- (7) N. Petrovic, D. L. Alderson und J. M. Carlson, „Dynamic resource allocation in disaster response: Tradeoffs in wildfire suppression,” *PLoS ONE*, Bd. 7, Nr. 4, S. e33285, 2012.
- (8) A. Mohapatra und T. Trinh, „Early wildfire detection technologies in practice—a review,” *Sustainability*, Bd. 14, Nr. 19, S. 12270, 2022.
- (9) J. Björck und M. McNamee, „Evaluation of wildland fire detection methods using expert input,” *Fire Technology*, Bd. 61, S. 2547–2569, 2025.
- (10) J. Björck, Förstudie – Framtida detektion av vegetations- och skogsbränder, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, Publikationsnummer MSB1725, 2021.
- (11) G. Zhai, L. Dou, Y. Gu, H. Zhou, L. Feng, L. Jiang, J. Dong, J. Sun und H. Li, „From spark to suppression: An overview of wildfire monitoring, progression prediction, and extinguishing techniques,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Bd. 140, S. 104600, 2025.
- (12) J. E. Ott, F. F. Kilkeny und T. B. Jain, „Fuel treatment effectiveness at the landscape scale: A systematic review of simulation studies comparing treatment scenarios in North America,” *Fire Ecology*, Bd. 19, S. 10, 2023.
- (13) M. S. Huang und B. Wichmann, „Machine learning estimates on the impacts of detection times on wildfire suppression costs,” *PLoS ONE*, Bd. 19, Nr. 11, S. e0313200, 2024.
- (14) Y. Chen, D. C. Morton und J. T. Randerson, „Remote sensing for wildfire monitoring: Insights into burned area, emissions, and fire dynamics,” *One Earth*, Bd. 7, Nr. 6, S. 1022–1028, 2024.
- (15) B. Özel, M. S. Alam und M. U. Khan, „Review of modern forest fire detection techniques: Innovations in image processing and deep learning,” *Information*, Bd. 15, Nr. 9, S. 538, 2024.
- (16) United Nations Environment Programme, *Spreading like Wildfire – The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires. A UNEP Rapid Response Assessment*. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2022.
- (17) M. W. Jones et al., „State of wildfires 2023–2024,” *Earth System Science Data*, Bd. 16, Nr. 8, S. 3601–3685, 2024.
- (18) X. Zong, X. Tian und X. Wang, „The role of fuel treatments in mitigating wildfire risk,” *Landscape and Urban Planning*, Bd. 242, S. 104957, 2024.
- (19) A. D. Rango, G. Lax, A. Martino und A. Ruggeri, „Wildfire early warning system based on a smart CO2 sensor network,” *Sensors*, Bd. 25, Nr. 8, S. 2430, 2025.
- (20) R. Bailon-Ruiz und S. Lacroix, „Wildfire remote sensing with UAVs: A review from the autonomy point of view,” in *Proceedings of the 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Athens, Greece, 2020, S. 412–420.
- (21) C. W. Ross, E. L. Loudermilk, S. A. Flanagan, G. Snitker, J. K. Hiers und J. J. O'Brien, „Wildfire severity reduction through prescribed burning in the Southeastern United States,” *Sustainability*, Bd. 17, S. 6230, 2025.
- (22) C. C. Chan, S. A. Alvi, X. Zhou, S. Durrani, N. Wilson und M. Yebra, „A survey on iot ground sensing systems for early wildfire detection: Technologies, challenges, and opportunities,” *IEEE Access*, Bd. 12, S. 172785–172819, 2024.
- (23) K. Ohneiser, A. Ansmann, J. Witthuhn, H. Deneke, A. Chudnovsky, G. Walter und F. Senf, „Self-lofting of wildfire smoke in the troposphere and stratosphere: Simulations and space lidar observations,” *Atmospheric Chemistry and Physics*, Bd. 23, S. 2901–2925, 2023.
- (24) T. Welle, M. Förster, J. Franke, D. Doktor und M. Lange, „Zeitlich-räumliche Analyse des Zustandes der Waldökosysteme in Deutschland und multivariate Untersuchung der Relevanz von forstlichen sowie nicht-forstlichen Einflussfaktoren – Machbarkeitsstudie,” *Gutachten 26/01 im Auftrag des Wissenschaftlichen Beirats für Natürlichen Klimaschutz*, 2025.
- (25) Y. Huo, Q. Zhang, C. Wang, H. Wang und Y. Zhang, „Enhancing wildfire detection: A novel algorithm for controllable generation of wildfire smoke images,” *International Journal of Wildland Fire*, Bd. 33, S. WF24068, 2024.
- (26) M. Mukhiddinov, A. B. Abdusalomov und J. Cho, „A wildfire smoke detection system using unmanned aerial vehicle images based on the optimized YOLOv5,” *Sensors*, Bd. 22, Nr. 23, S. 9384, 2022.
- (27) eoPortal, „Himawari-8 and 9,” *Satellite Missions Catalogue*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/himawari-8-9>. [Zugriff am: 13. Mai 2026].
- (28) eoPortal, „GOES-R (Geostationary Operational Environmental Satellite-R),” *Satellite Missions Catalogue*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/goes-r>. [Zugriff am: 13. Mai 2026].
- (29) R. Hsieh, „Performance metrics for evaluating wildfire detection systems,” *FPIInnovations Wildfire Operations*, WF InfoNote 2025N1, 2025.
- (30) Spire Space Services, „OroraTech’s in-orbit solutions to fight wildfires from space: How space-enabled technologies are facilitating enhanced wildfire detection and monitoring capabilities,” *Spire Global*.
- (31) OrbTrack, „OrbTrack: real time satellite orbit tracking and prediction.” [Online]. Verfügbar unter: <https://www.orbtrack.org/>. [Zugriff am: 13. Mai 2026].

IMPRESSUM**Herausgeber:** IQ Technologies for Earth and Space GmbH, Ernst-Lau-Straße 5, 12489 Berlin, Deutschland**Geschäftsführer:** Dr. Kurt Winter**Sitz der Gesellschaft:** Berlin, Amtsgericht Charlottenburg, HRB 73 476**Ust-IdNr.:** DE 205154407, **Steuer-Nr.:** 37/359/38185**Verantwortlich für den Inhalt:** Victoria Winter, **Stand:** Mai 2026**Kontakt:** +49 30 863230-500, info@iq-technologies.berlin, www.iq-technologies.berlin**Druckerei:** WIRmachenDRUCK GmbH, Illerstraße 15, 71522 Backnang, Deutschland

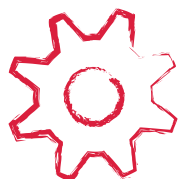
TECHNOLOGIEÜBERGREIFENDE ERKENNTNISSE

Die Bewertung von Technologien zur Waldbrandfrüherkennung erfordert mehr als eine Einzelbetrachtung von Plattformen oder Merkmalen. Der technologieübergreifende Vergleich zeigt drei zentrale Erkenntnisse, die für die Einordnung und Auswahl von Lösungen in der Praxis besonders relevant sind:



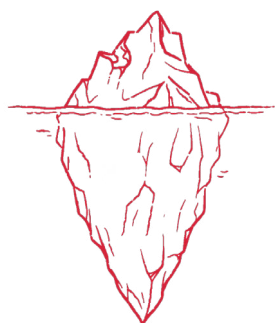
Trägermedium $\neq$ Erkennungs-Technologie

Drohne, Satellit oder statischer Turm sind das Trägermedium. Entscheidend für die Früherkennung ist die Kombination dieses Trägermediums mit der darauf eingesetzten Analyse- und Detektionstechnologie.



Optische terrestrische Rauchererkennung = Rückgrat der Waldbrandfrüherkennung

Jede Technologie hat Stärken und Schwächen. Die geeignete Wahl hängt vom Einsatzort, dem zu überwachenden Gebiet und der Reaktionsstruktur ab. Optische terrestrische Rauchererkennung hat sich im Laufe der Jahre als Rückgrat der Waldbrandfrüherkennung erwiesen. Komplementärtechnologien haben ihren Nutzen in angrenzenden Bereichen (Monitoring, Nachsorge etc.) oder als Ergänzung zu optischen Systemen in der Früherkennung.



Total Cost of Ownership

Investitionsentscheidungen sollten nicht nur auf Anschaffungs- und Betriebskosten basieren, sondern Reaktionszeit, potenzielles Schadensausmaß und Fehlalarmrisiken über den gesamten Lebenszyklus berücksichtigen.

+49 30 863230-500
info@iq-firewatch.com

**IQ Technologies for Earth
and Space GmbH**

Ernst-Lau-Str. 5
12489 Berlin
Deutschland



www.iq-firewatch.com

Made in Germany