

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

31/07/2020

VOLTAIR

Projektnummer: 865003



VOLTAIR

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	4. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/02/2018
Projektende	31/07/2020
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	30 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Siemens AG Österreich
AnsprechpartnerIn	Josef Alois Birchbauer
Postadresse	Siemensstraße 90 1210 Wien
Telefon	+43 66480117 63740
Fax	-
E-mail	josef-alois.birchbauer@siemens.com
Website	www.siemens.at

VOLTAIR

„Das Unsichtbare sichtbar machen“

Spezielsensorik und automatische Analyseverfahren
zum Aufspüren unsichtbarer Stromnetzdefekte aus der Luft

AutorInnen:

Josef Alois Birchbauer (Siemens AG Österreich)

Alfred Einfalt (Siemens AG Österreich)

Gernot Komar (Technische Universität Graz)

Oliver Pischler (Technische Universität Graz)

Prof. Uwe Schichler (Technische Universität Graz)

Sebastian Frank (Omnetric)

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
3	Inhaltliche Darstellung	6
3.1	Anforderungsprofil und abgeleiteter Prüfkriterienkatalog	6
3.2	Auswahl der Sensorik durch orientierende Labormessungen	7
3.3	Entwicklung UAV getragenes Messsystem	8
3.4	Automatische Bildanalyse	10
3.4.1	UV-Diagnostik	10
3.4.2	UV-Kamerakalibrierung	11
3.4.3	IR-Diagnostik.....	12
3.4.4	Bildbasierte Lokalisierung.....	14
3.5	Durchgeführte Messkampagnen.....	15
3.5.1	Trägersystem für Sensorkopf („Flying Fox“)	15
3.5.2	UV-Sensitivitätsanalyse.....	15
3.5.3	Analyse Ortsgenauigkeit der Geo-Lokalisierung (UV).....	18
3.5.4	Thermische Inspektion von stromführenden Klemmverbindungen.....	19
3.5.5	Feldversuch: UAV Befliegung Umspannwerk	20
3.6	Prozess- und Systemintegration.....	20
3.7	Dissemination.....	22
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	24
4.1	UV-Befundung.....	24
4.2	IR-Befundung.....	26
5	Ausblick und Empfehlungen.....	28
6	Literaturverzeichnis	29
7	Kontaktdaten.....	30

2 Einleitung

Um die Ausfallsicherheit von Stromnetzen zu gewährleisten, müssen deren Infrastrukturkomponenten wie zum Beispiel Freileitungen in regelmäßigen Abständen inspiziert werden. Diese periodischen Begehungen und Befliegungen durch geschultes Personal sind mit einem hohen Zeit- und Kostenaufwand verbunden (eine Hubschrauberinspektion kostet z.B. rund 400€/km). Daher etablieren sich zunehmend UAV (Unmanned Aerial Vehicles vulgo „Drohnen“) als Werkzeug in der Inspektion sicherheitsrelevanter Netzinfrastruktur. Durch Befliegungen können zwar mehr Defekte als mit bloßem Auge erkannt werden, aber die Steuerung der Fluggeräte erfolgt auf Sicht und ist damit nur für kleinere Distanzen geeignet. Mit speziellen Ultraviolett- (UV) und Wärmebildkameras (IR) können Defekte wie Koronaentladungen und Heißstellen erkannt werden, jedoch fehlt es bisher an der automatischen Bewertung und damit an der Reduktion der anfallenden Daten, der Georeferenzierung und der Integration in die Betriebsprozesse von Netzbetreibern.

VOLTAIR: „Das Unsichtbare sichtbar machen“

Das Forschungsprojekt VOLTAIR adressiert die Inspektion von Freileitungen, Transformatoren, Schaltanlagen und Umspannwerken sowie zudem die beiden Spannungsebenen Hoch- und Mittelspannung. Die Hebelwirkung von VOLTAIR wird im Zusammenspiel von Fluggerät (UAV), speziell abgestimmter Sensorik und vor allem durch die dahinterliegenden automatischen Auswerte- und Analyseverfahren deutlich. So sollen aus der Vielfalt der aufgenommenen Daten inspektionsrelevante Zustände effektiv automatisch detektiert und bewertet werden, die dem menschlichen Auge bislang verborgen geblieben sind. Durch automatische Bewertung und Datenreduktion wird eine nahtlose Integration in bestehende Asset-Managementsysteme, rasche Entscheidungswege und lückenlose Dokumentation, d.h. eine optimale Prozess- und Systemintegration, ermöglicht.

Einordnung in das Energieforschungsprogramm: VOLTAIR adressiert den Schwerpunkt „Themenfeld 2: Energiesysteme und Netze / 2.1 Energienetze“ der Ausschreibung 2017.

In VOLTAIR gingen eine bedarfsträgerorientierte Anforderungsdefinition und sondierende Laborexperimente Hand in Hand. So konnten auf Basis dieser gewonnenen Erkenntnisse sowohl die Sensorik als auch die nachgeschaltete automatische Bildanalyse optimal auf die Problemstellung abgestimmt werden. Schließlich wurden die Methoden auch im Feld inklusive einer erfolgreich durchgeführten UAV Befliegung erprobt und sowohl qualitativ als auch quantitativ evaluiert.

Die inhaltliche Struktur dieses Berichtes in Kapitel 3 orientiert sich stark an der Gliederung der einzelnen Arbeitspakete. Begonnen wird mit dem Anforderungsprofil (AP2) und daraus abgeleiteten Prüfkriterienkatalog, gefolgt von der Auswahl der Sensorik (AP3) durch erste orientierende Labormessungen und daraus abgeleitet die Realisierung eines Sensormesskopfes, der von einem UAV getragen werden kann. Schließlich werden die gewonnenen Daten mittels automatischer Bildanalyse interpretiert (AP4) und zahlreiche Messkampagnen durchgeführt (AP5). Die erarbeiteten Konzepte zur

Integration in bestehende Assetmanagement Systeme (AP6) sowie die (wissenschaftliche) Dissemination (AP7) bilden den Abschluss. Die wesentlichen Ergebnisse und Schlussfolgerungen werden in Kapitel 4 zusammengefasst, und Kapitel 5 rundet den Bericht mit einem Ausblick ab.

3 Inhaltliche Darstellung

3.1 Anforderungsprofil und abgeleiteter Prüfkriterienkatalog

Die möglichen Fehlerbilder an Freileitungen sind vielfältig. Um die Komplexität und den Umfang der automatischen Analyse auf ein sinnvoll handhabbares Maß zu reduzieren, wurden die an der Infrastruktur auftretenden Phänomene zunächst gesammelt und gruppiert. Diese schrittweise Herangehensweise erlaubte einerseits die optimale Auswahl und Abstimmung der bildgebenden Sensorik, die schließlich in der Entwicklung eines UAV-getragenen Messsystems gipfelte, andererseits erweiterte es den potenziellen Detektionsumfang verglichen mit einer unmittelbaren Adressierung spezifischer Einzelzustände.

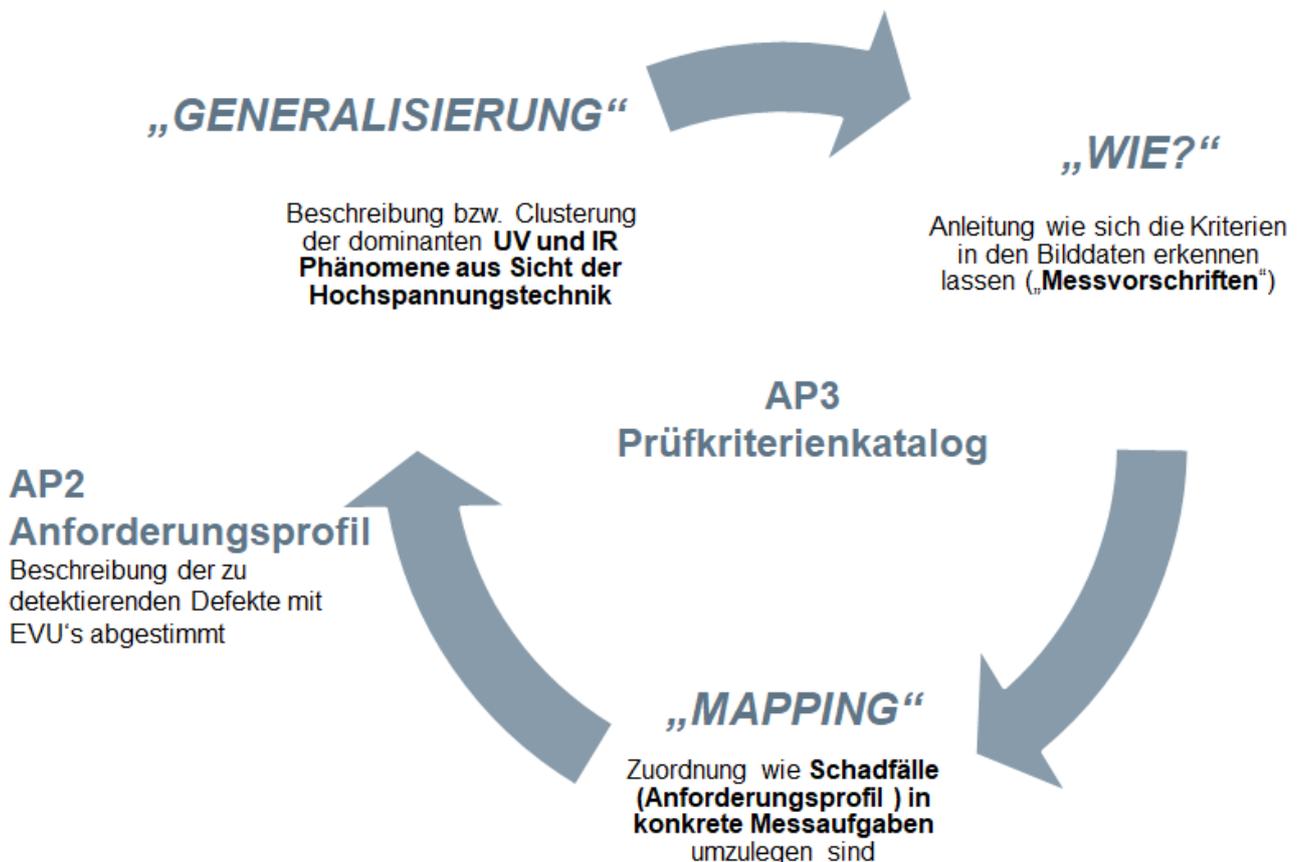


Abbildung 1: Methodische Herangehensweise zur Anforderungsdefinition in VOLTAIR

Um die Anforderungsseite zu erfassen, wurde im Rahmen des Projektes ein Workshop mit den Energie- und Verteilnetzbetreibern (TSO/DSO) Austrian Power Grid (APG) und Kärnten Netz GmbH (KNG) durchgeführt. Beide Betreiber teilten ihre Erfahrungen in den Bereichen UV- und IR-Analyse auch in Verbindung mit unbemannten Flugobjekten. Anhand eines vom Projektteam ausgearbeiteten Defektkataloges wurden von Seiten der TSO Gewichtungen der einzelnen Fehlerarten vorgenommen und in einem **Anforderungsprofil** dokumentiert.

Parallel wurden die dominanten UV- und IR-Phänomene aus Sicht der Hochspannungstechnik auf Basis von orientierten Laborexperimenten erfasst und geclustert und daraus Messvorschriften abgeleitet, was in einem sogenannten **Prüfkriterienkatalog** mündete. So konnte durch orientierende Labormessungen gezeigt werden, dass sich zahlreiche betriebsrelevante Zustände auf vergleichsweise wenige hochspannungstechnische Phänomene mit einer charakteristischen UV- und IR-Signatur reduzieren lassen.

Schließlich wurde das Anforderungsprofil mit dem Prüfkriterienkatalog abgeglichen, also die Anforderungen auf konkrete Prüfkriterien umgelegt.

3.2 Auswahl der Sensorik durch orientierende Labormessungen

Um die Datenverfügbarkeit und Qualität für nachgeschalteten Detektionsaufgaben zu optimieren, ist die Sensorik bestmöglich auf den Anwendungsfall abzustimmen. Basis für die Auswahl und die Beschaffung bildeten die betriebsmitteltechnischen Anforderungen (Eigenschaften der zu erfassenden Infrastruktur und der auftretenden inspektionsrelevanten Phänomene), als auch betriebliche Anforderungen an den späteren Inspektions- bzw. Flugbetrieb. Für VOLTAIR standen mögliche Kamerasysteme bereit bzw. wurden zunächst als Leihgabe für Evaluierungszwecke beschafft und anschließend in einer Laborumgebung getestet (Abbildung 2).

Als Versuchsobjekte dienten im Labor erzeugte „künstliche“ Defekte, welche primär dazu dienten die Leistungsfähigkeit der Sensorik miteinander zu vergleichen. Im Bereich der UV-Diagnostik wurde auf etablierte Messanordnungen („Nadel-Platte“ und „Nadel-Luft“) zur Erzeugung von Koronaeffekten zurückgegriffen. Als Testobjekte für IR-Phänomene wurden diverse Lichtemittenten verwendet. Um auf die speziellen dynamischen Umgebungsbedingungen eines Fluges einzugehen, wurden die Sensoren auf einem per μC -Controller gesteuerten Schrittmotor gelagert. So wurde eine von Entfernung und Endgeschwindigkeit abhängige Drehbewegung erzeugt, welche den Vorbeiflug am Objekt simulieren sollte. Beide Versuchsreihen haben gezeigt, dass eine Abhängigkeit der Detektionsqualität von der Entfernung zum Objekt und der Geschwindigkeit der Sensorik (in diesem Fall: Rotationsgeschwindigkeit der Kamera) besteht, wobei der Effekt bei den getesteten Infrarotsystemen deutlich stärker ausgeprägt war als es bei dem UV-Kamerasystem der Fall war.

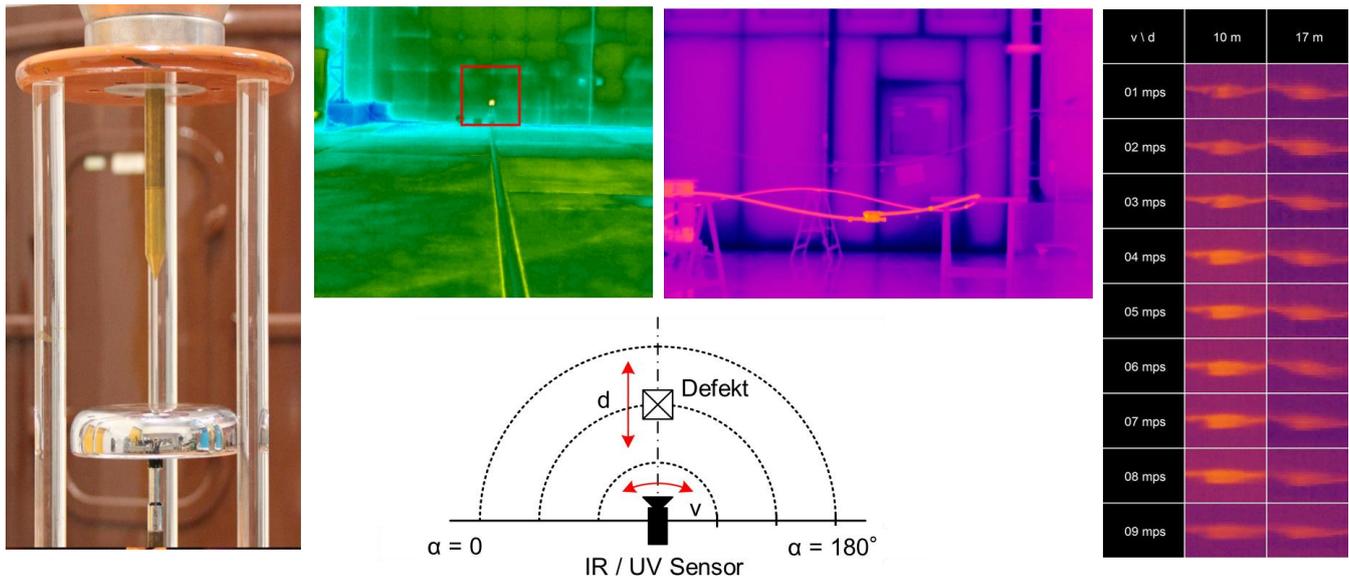


Abbildung 2: Überblick verschiedene Laborexperimente. V.l.n.r.: „Nadel-Platte“ Anordnung, Thermische Inspektion von Heißstellen, Abbildung von stromführende Klemmverbindungen als Parameter von Entfernung und Aufnahmegeschwindigkeit. Mitte unten: Kamera auf Stativ mit µC-gesteuerter Schrittmotor zur rotatorischen Bewegung der Aufnahme

Dies resultierte in folgender Auswahl der Komponenten für die Bestückung des Sensorkopfes: Als Thermalkamera wurde eine OPTRIS PI640 ausgewählt. Für die Erfassung von Korona-Effekten kommt eine Spezialkamera der Firma ProxiVision mit integriertem Bildverstärker zum Einsatz. Diese Kamera ist tageslichttauglich und damit für den Außeneinsatz bei Sonnenlicht gekoppelt mit einem Tageslichtsperrfilter geeignet.

3.3 Entwicklung UAV getragenes Messsystem

Der UAV-getragene Messkopf wurde so konzipiert, dass die Betriebsbewilligung in Österreich erlangt werden kann. Da die Anforderungen an das Fluggerät mit steigender Betriebsmasse höher werden, muss auf ein möglichst geringes Gesamtgewicht geachtet werden. Erfahrungsgemäß stehen ca. 20% der Betriebsmasse als effektive Payload zur Verfügung. Da das Eigengewicht der UV- und Thermalkamera bereits insgesamt über 1,2kg liegt wurde auf eine Lösung für die 25-kg-Klasse mit einem maximalen Sensorkopf-Gewicht von 5kg fokussiert.

Sämtliche für die Datenerfassung erforderlichen Komponenten und Funktionalität wurden im Sensorkopf integriert. Die einzige verbleibende Schnittstelle zum Fluggerät ist die Stromversorgung. Zentrale Komponente ist das Prozessormodul, das die Datenaufnahme der Kameras steuert und die aufgenommenen Bilddaten mit exakten Zeitstempeln aus dem GNSS Modul verspeichert (Abbildung 3).

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

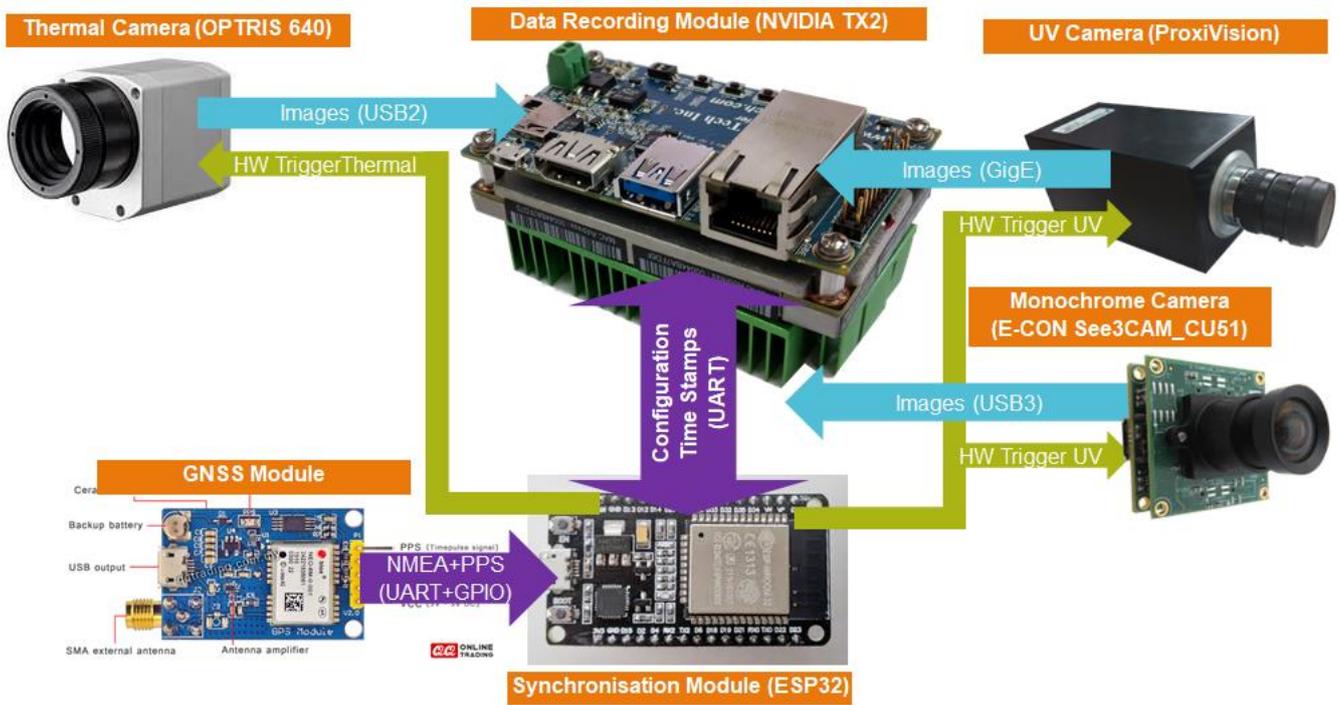


Abbildung 3: Hardwarekonzept zum UAV-getragenen Messsystem

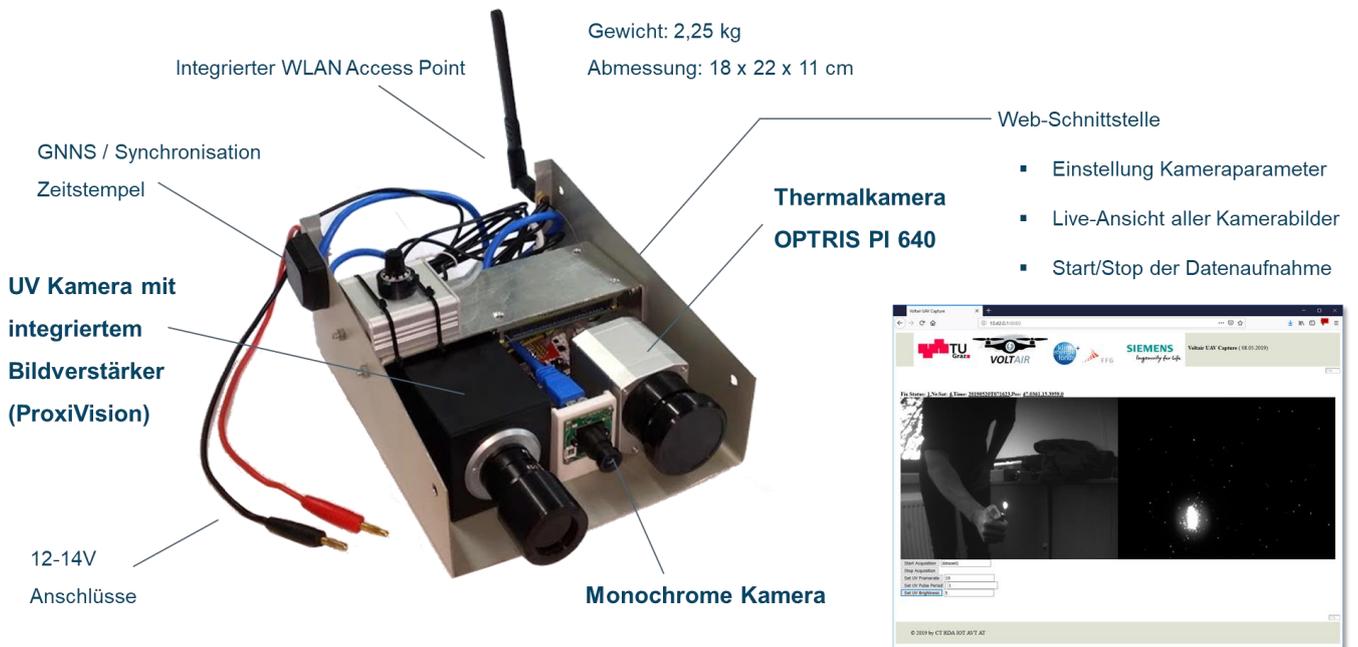


Abbildung 4: Assembled sensor head with web interface

3.4 Automatische Bildanalyse

Ziel der automatischen Bildanalyse ist es, Auffälligkeiten an der Hoch- und Mittelspannungsinfrastruktur automatisch in den aufgenommen Sensordaten zu detektieren und zu lokalisieren. Letzteres umfasst die präzise Verortung der Einzeldetektionen im 3D-Raum. So sollen aus der Fülle der Rohsensordaten zuverlässig Ortsangaben über inspektionsrelevante Zustände abgeleitet werden.

3.4.1 UV-Diagnostik

Bei der UV-Diagnostik wurde eine automatische Verfahrenskette konzipiert und erfolgreich implementiert, um Einzelbilddetektionen von möglichen Koronaentladungen im 3D-Raum zu konsolidieren, also zeitlich und räumlich zu mitteln und somit zu verorten.

Der entwickelte Algorithmus zur 3D Verortung von Detektionen in UV beruht auf dem nachfolgend gezeigten Prinzip, das zudem laufzeittechnisch sehr effizient implementiert wurde. Zunächst werden in Einzelbildern automatisch „Blobs“ detektiert (

Abbildung 5 links) und diese zu möglichen 3D Punkten verschnitten (

Abbildung 5 rechts). Im Gegensatz zu sporadisch emittierten Photonen aggregieren sich persistente Störquellen zu einem Cluster von 3D Detektionen. Das Clusterzentrum wird automatisch bestimmt und gibt die Position der UV-Quelle im Raum an (Abbildung 6 links). Bedingt durch die Streuung der 3D Punkte ergibt sich eine inhärente Messunsicherheit in der Positionsbestimmung. Schließlich kann aus der bekannten Position im Raum ein zugehöriges Bild im visuellen Spektrum ermittelt werden und die Position der UV Störquelle auch in diesem Bild eingegrenzt werden (Abbildung 6 rechts).

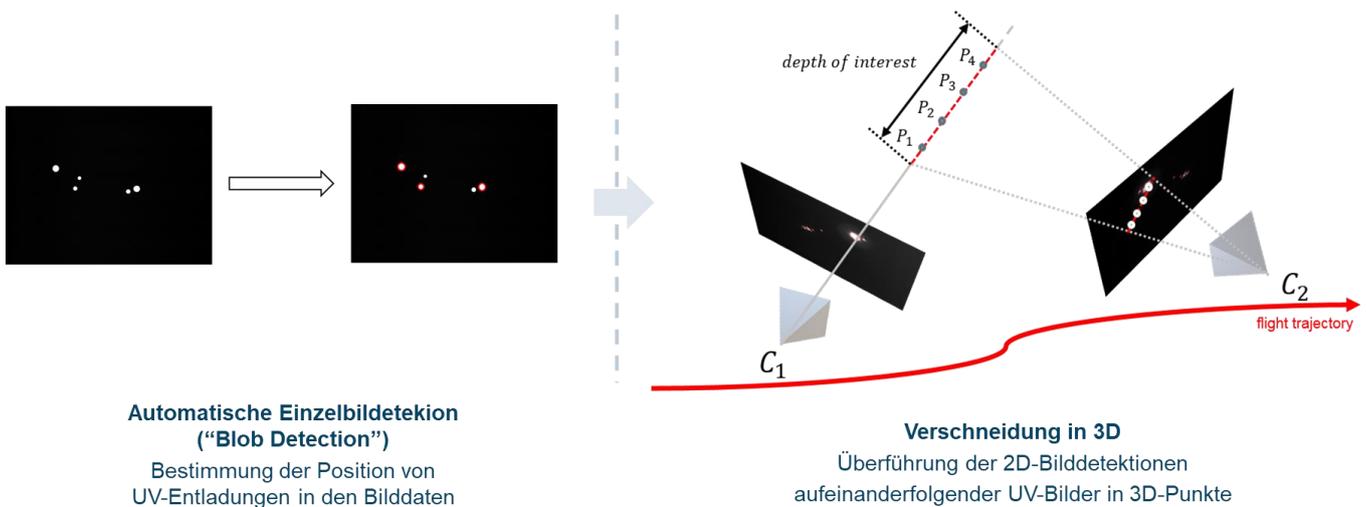


Abbildung 5: Automatische Detektion von UV-Störstellen. Einzelbilddetektion (links) und 3D-Verschneidung (rechts)

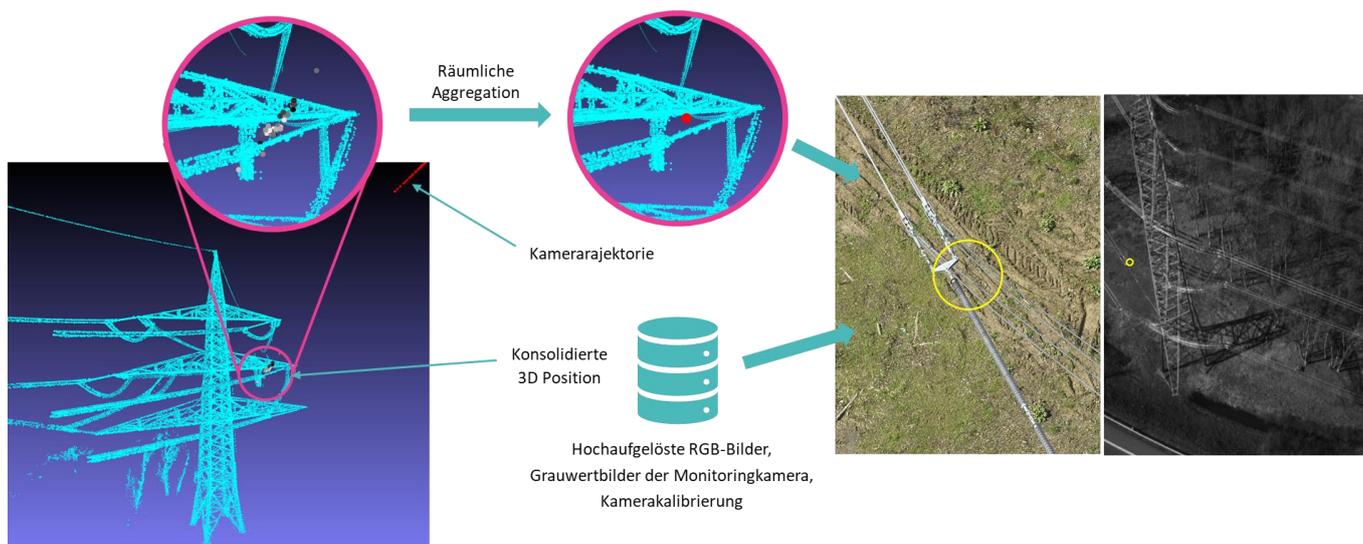


Abbildung 6: Automatische Detektion von UV-Störstellen.

Räumliche Aggregation zur Generierung von Befunden (links), Bildüberlagerung (rechts)

3.4.2 UV-Kamerakalibrierung

Die Kamerakalibrierung der UV-Kamera zu anderen Kamerasystem, wie der Monitorkamera im sichtbaren Licht, spielt eine zentrale Rolle, um eine Verortung zu anderen Aufnahmemodalitäten herstellen zu können. Gängige Kalibrieransätze sind auf die UV-Kamera nicht direkt übertragbar, da ein übliches Kalibriermuster in der UV-Kamera nicht sichtbar ist. Im Rahmen von VOLTAIR wurde daher ein aktive UV-Kalibrierungshilfe mit UV-LEDs entworfen und gebaut und damit eine Kalibrierung des Sensorkopfes durchgeführt.

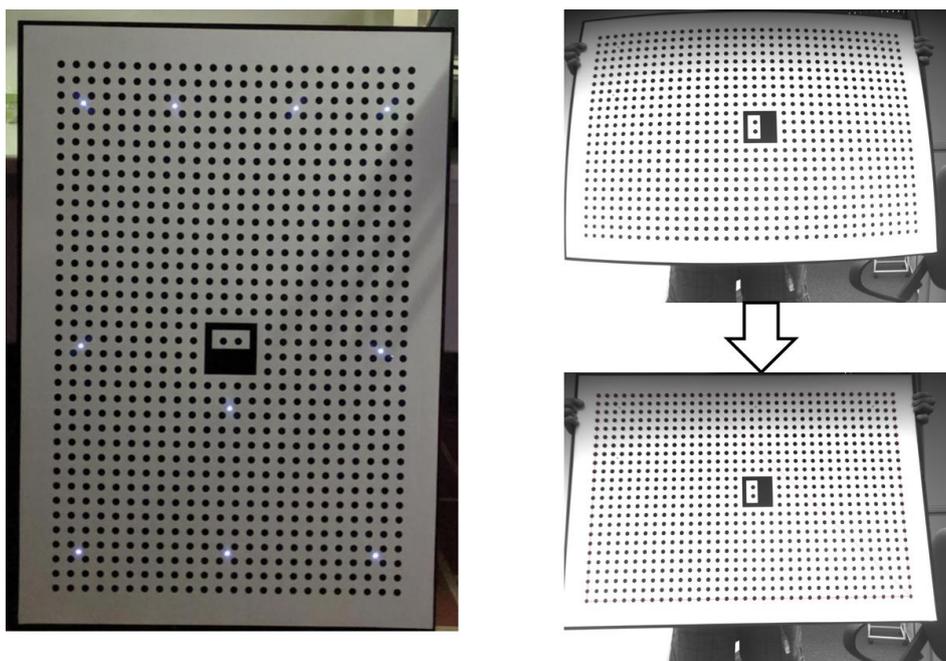


Abbildung 7: UV ↔ VIS Kalibrierung.

Aktive Kalibrierungshilfe mit UV-emittierenden LED (links), Ergebnis der Kalibrierung (rechts)

3.4.3 IR-Diagnostik

Bezüglich IR-Diagnostik erfolgte ein Austausch von möglichen Ansätzen zur Temperaturmessung mit externen Partnern (Hochschule für Technik und Wirtschaft, Dresden und Fraunhofer-Institut für integrierte Schaltungen IIS). Leider weicht die Beschaffenheit von realen Befliegungsdaten signifikant von idealisierten Laborbedingungen ab bzw. sind zahlreiche Einflussgrößen zu benennen wie in Abbildung 8 zu erkennen ist.

Für VOLTAIR wurde daher ein neuartiger Ansatz gewählt, der typische Klemmverbindungen an Freileitungen aus Bilddaten automatisch detektieren kann und deren thermische Textur bereitstellt, sodass gezielt nach Abweichungen gesucht werden kann.

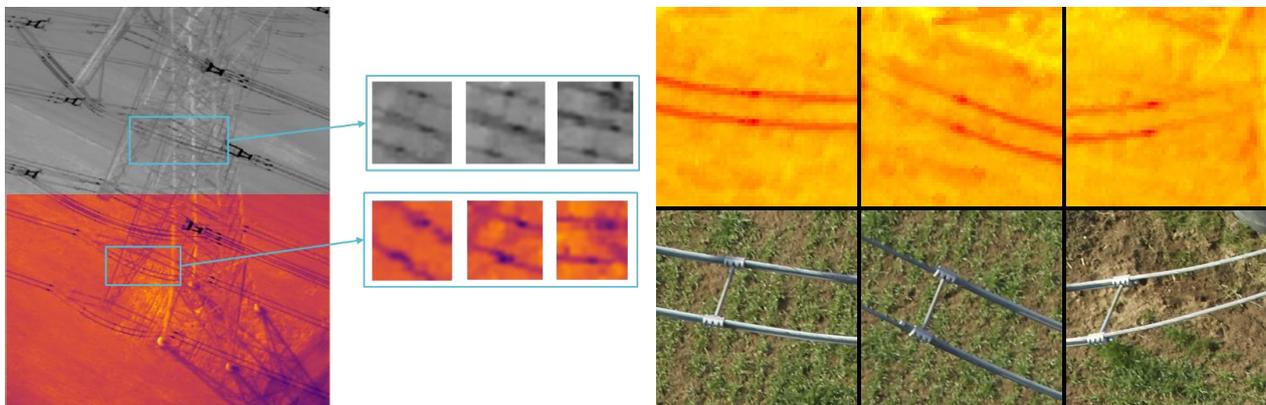


Abbildung 8: Typische Thermalaufnahmen aus einer Befliegung bei Messdistanz von 50-60 m. Manuelle Klemmenbündelbestimmung (links) vs. automatische Bestimmung (rechts)

Die entsprechende Verfahrenskette ist in Abbildung 9 dargestellt. Zunächst werden in den hochaufgelösten Einzelbildern¹ automatisch Klemmen detektiert, indem anhand von annotierten Bilddaten ein Detektor trainiert wurde. Verschiedene Type Arten von Klemmverbindungen wurden erfasst, diese sind in Abbildung 10 dargestellt und umfassen insbesondere Stromklemmen an Stromschleifen, aber ebenso diverse Arten von Abspannklemmen. Die automatischen Einzelbilddetektionen (Abbildung 11) werden unter Kenntnis der Kamerakalibrierung sowie LIDAR¹ Daten der Freileitungsinfrastruktur zu einer 3D Inventarisierung konsolidiert. Abbildung 12 zeigt exemplarisch ein Ergebnis der automatischen Inventarisierung, räumlich nahe und zusammengehörige Klemmen an Stromschlaufenfeldabstandshaltern werden dabei zu einer mittleren Klemmenposition in 3D konsolidiert. Schließlich kann für jede Klemme bzw. jedes Klemmenbündel eine entsprechende visuelle und thermische Ansicht generiert werden was die Basis für eine semi-automatische Inspektion von Klemmverbindungen darstellt, und im Kapitel 4: „Ergebnisse“ näher beschrieben wird.

¹ Hochaufgelöste Bilddaten und LiDAR Daten lagen projektfremd aus mehreren Hubschrauberbefliegungen - u.a. in der Steiermark aus dem Raum Gleisdorf - aus einem bei SIEMENS in Entwicklung stehenden System zur Inspektion von Freileitungen („SIEAERO“) [9] vor.

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

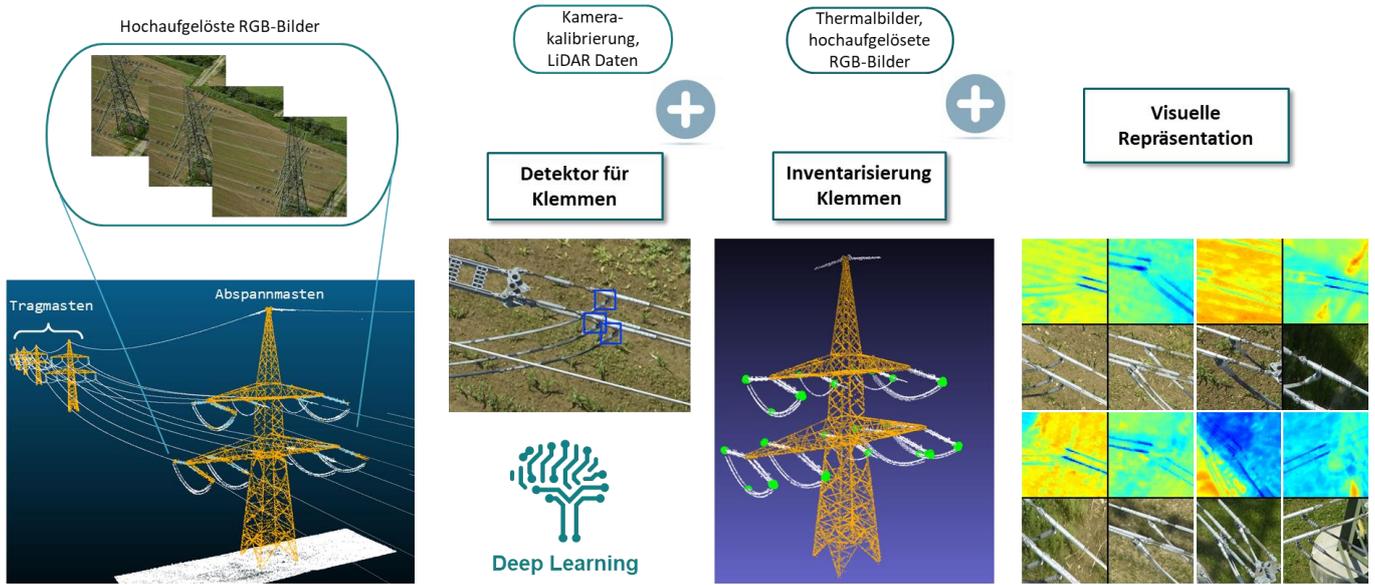


Abbildung 9: Thermische Inspektion von Klemmverbindungen. Überblick Verarbeitungskette (v.l.n.r): Einzelbilddetektion, Inventarisierung in 3D sowie abgeleitete visuelle Repräsentation als Basis für einen semi-automatischen Inspektionsworkflow

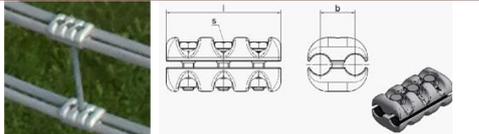
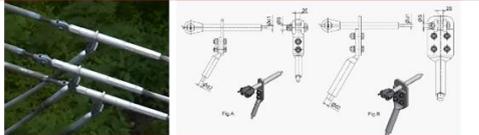
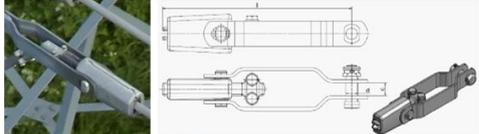
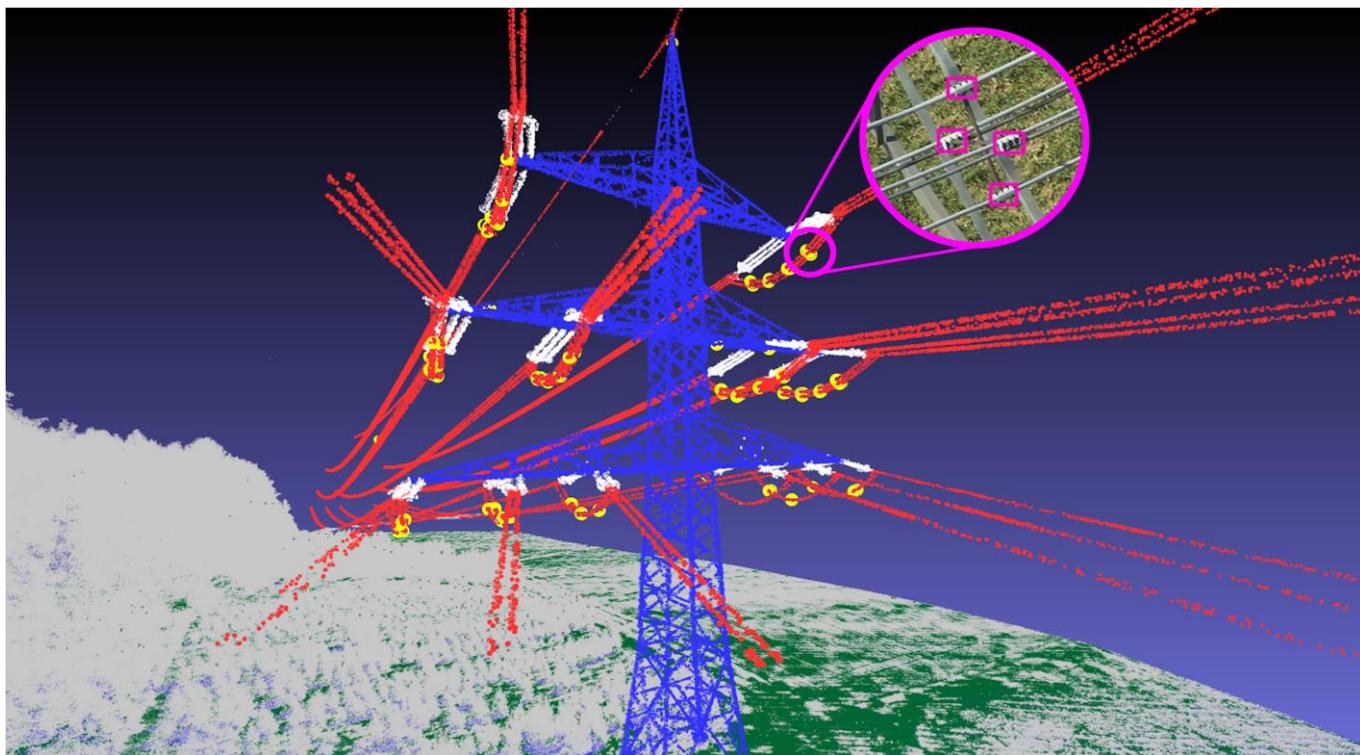
sample image	namings (English)	namings (German)	class ID (detector internal)	no. objects in trainset
	parallel groove clamps	Stromklemmen	10	3423
	compression tension clamps	Abspann-/Tragböcke	11	7716
	wedge-type tension clamps	Keil-Abspannklemmen	12	5493
	aluminum strain clamps	-	13	397

Abbildung 10: Arten von Klemmverbindungen, die automatisch detektiert und inventarisiert werden, mit Angabe der annotierten Datenumfänge für das Training.



Abbildung 11: Bildbasierte Klemmendetektion – qualitative Ergebnisse



**Abbildung 12: Automatische Inventarisierung von Klemmverbindungen in 3D.
Abspannmast mit Detailvergrößerung der Bilddetektionen**

3.4.4 Bildbasierte Lokalisierung

Da der Sensorkopf VOLTAIR als eigenständiges Messsystem konzipiert ist, erfolgt die Lokalisierung durch „Structure from Motion“ [2], also photogrammetrische Verfahren. Entsprechende Methoden wurden angewandt und für unser Problem adaptiert. Für ein späteres produktives Messsystem können diese durch effizientere, jedoch hardwaretechnisch kostspieligere Verfahren, substituiert werden, wie etwa ein hochgenaues INS (Inertial Navigation System).

3.5 Durchgeführte Messkampagnen

Mit dem finalen Messsystem wurden zahlreiche Versuche durchgeführt, sowohl in kontrollierten Umgebungen als auch unter realen Einsatzbedingungen. Die folgende Darstellung ist nur ein gekürzter Auszug aus den umfangreichen Messprotokollen, die in einem entsprechenden Deliverable („D5.2: Finaler Bereich der Gesamtevaluierung inklusive Luftbildauswertung“) dokumentiert worden sind.

3.5.1 Trägersystem für Sensorkopf („Flying Fox“)

Neben realen Defekten war auch eine realistischere Bewegung der Sensoreinheit im Vergleich zu den ersten orientierenden Messungen Ziel der validierenden Experimente. Für einen späteren Einsatz werden höhere Messgeschwindigkeiten bis 30 km/h angestrebt, um beim Inspektionsbetrieb eine wirtschaftliche Tageskilometerleistung zu erzielen.

Zu diesem Zweck wurde ein 25 m langes Standard-Seilzugsystem angeschafft, modifiziert und in einem Bereich zwischen zwei Laboren in ca. 3m Höhe montiert. Auf dem Seilzugsystem kann der Sensorkopf an bereitgestellten Defekten vorbeigeführt werden (Abbildung 13). Je nach Montagerichtung können somit Defekte in bis zu 40 m Entfernung betrachtet werden. Die ursprüngliche Einschränkung dieses Systems war die nominelle Maximalgeschwindigkeit, welche seitens des Herstellers mit 3 m/s angegeben wurde und somit deutlich unter den anvisierten 30 km/h (8,3 m/s) liegt und begrenzt wird. Durch direktes Ansteuern des Frequenzumrichters der Antriebseinheit konnte diese Beschränkung umgangen werden und mithilfe eigener Sensorik ausgestattet werden. Dadurch sind auf der 25 m langen Strecke nun Sensorgeschwindigkeiten von bis zu 10 m/s möglich.

Das Schema der Messverfahren für IR und UV ist in Abbildung 14 dargestellt. Je nach zu untersuchendem Defekt konnte in der DC-Halle oder im Nikola-Tesla-Labor gemessen werden. Aufgrund der Auslastung des Tesla-Labors, wurden die zeitintensiveren IR-Versuche in der DC-Halle durchgeführt und die UV-Versuche im Tesla-Labor

3.5.2 UV-Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen eine Sensitivitätsanalyse wurde das Kamerasystem mit einem in diesem Bereich gebräuchlichen Handgerät von OFIL verglichen. Testobjekt war eine Nadel-in-Luft Anordnung (Abbildung 16 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) deren Entladungspegel bei ca. 2 pC gehalten wurde. Anschließend wurde in fest definierten Abständen von 3, 5, 10 und 15 Metern jeweils die Detektionsschwelle ermittelt, also jene Spannung, bei die ersten Teilentladungen auftreten und auch vom jeweiligen System detektiert wurden. Nach Ermitteln dieses Schwellenwertes wurde die Spannung schrittweise erhöht und es wurden zu jeder Spannungsstufe Detektionssequenzen aufgenommen. Unter Zuhilfenahme des Omicron-Messsystems wurden Kontrollmessungen durchgeführt, um zu kontrollieren, dass die TE-Pegel und Spannungen für alle Messungen vergleichbar hoch sind.

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 13: Sensormesskopf installiert am Hochgeschwindigkeits-Seilzugsystem

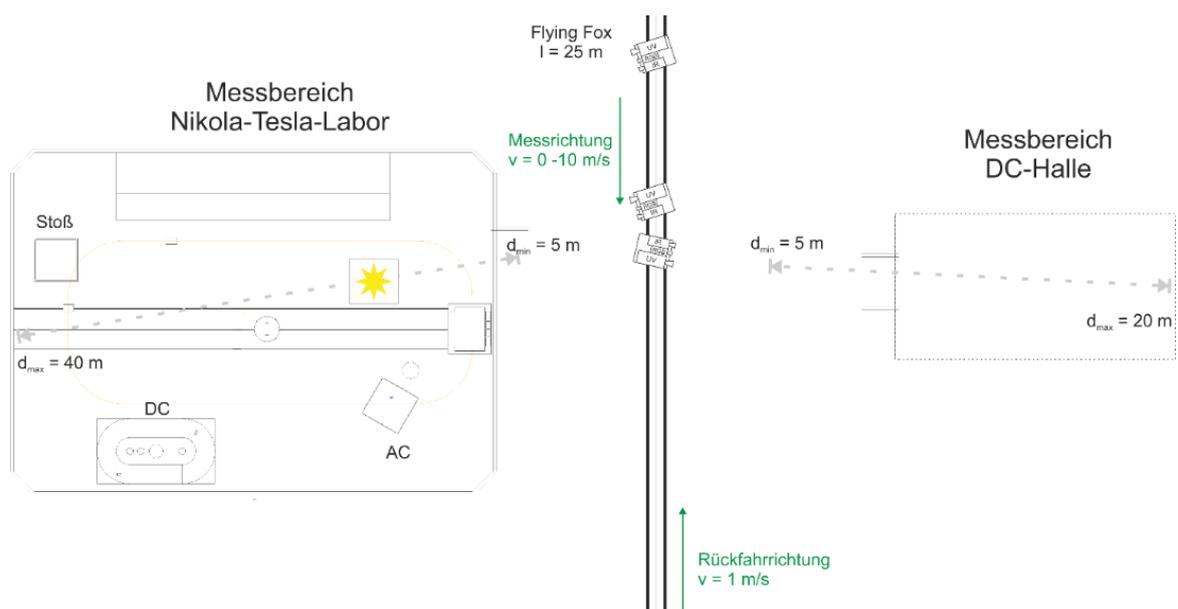


Abbildung 14: Messschema zur Versuchsreihe im Nikola-Tesla-Labor der TU Graz

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Diese Sequenzen wurden ausgewertet und mit Hilfe der definierten Größen Detektionsrate und Detektionsqualität verglichen. Die Vergleiche der Detektionsqualität zeigen, dass die DayCor Kamera sensibler detektiert als unser System. Dennoch konnte der Nachweis erbracht werden, dass auch unser System Entladungen von niedriger Intensität erfolgreich detektieren kann. Da Teilentladungen im Einsatzbereich von VOLTAIR erfahrungsgemäß deutlich höhere Werte aufweisen (200 pC bis mehrere nC) kann gesagt werden, dass die Kamera eine ausreichende Sensitivität besitzt, um UV-Phänomene im Bereich der Energieversorgungsinfrastruktur zu detektieren.



Abbildung 15: Luminar-DayCor-HD-Kamerasystem links, Aufnahme einer Detektion der Ofil Luminar DayCor HD bei einem Abstand von 5 Metern und einer eingestellten Spannung von 50 kV rechts

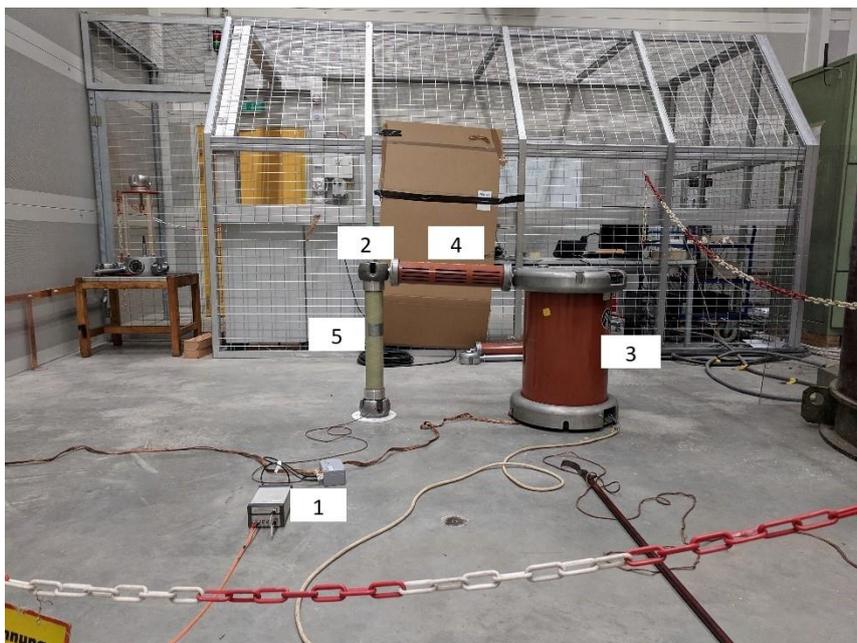


Abbildung 16: Messaufbau mit Nadel-Platte-Anordnung bei Verwendung des ProxiVision-Kamerasystems: Omicron-Messsystem 1, Nadel 2, Prüftransformator 3, Begrenzungswiderstand 4, Koppelkondensator 5

3.5.3 Analyse Ortsgenauigkeit der Geo-Lokalisierung (UV)

Eine möglichst genaue Geo-Lokalisierung von erkannten Problemstellen ist für die Ableitung von Maßnahmen unabdinglich. Es wurden daher eine bekannte UV-Störquelle genau eingemessen und die Lokalisierungsgenauigkeit der automatischen Detektion verglichen (Abbildung 17). Wie Tabelle 1 zeigt, konnte die technisch aufwändigere Kalibrierung des UV-Kamerasystems mit der für VOLTAIR eigens konstruierten aktiven UV-Kalibrierungshilfe signifikant bessere Ergebnisse lieferte als eine einfache Bildtransformation.

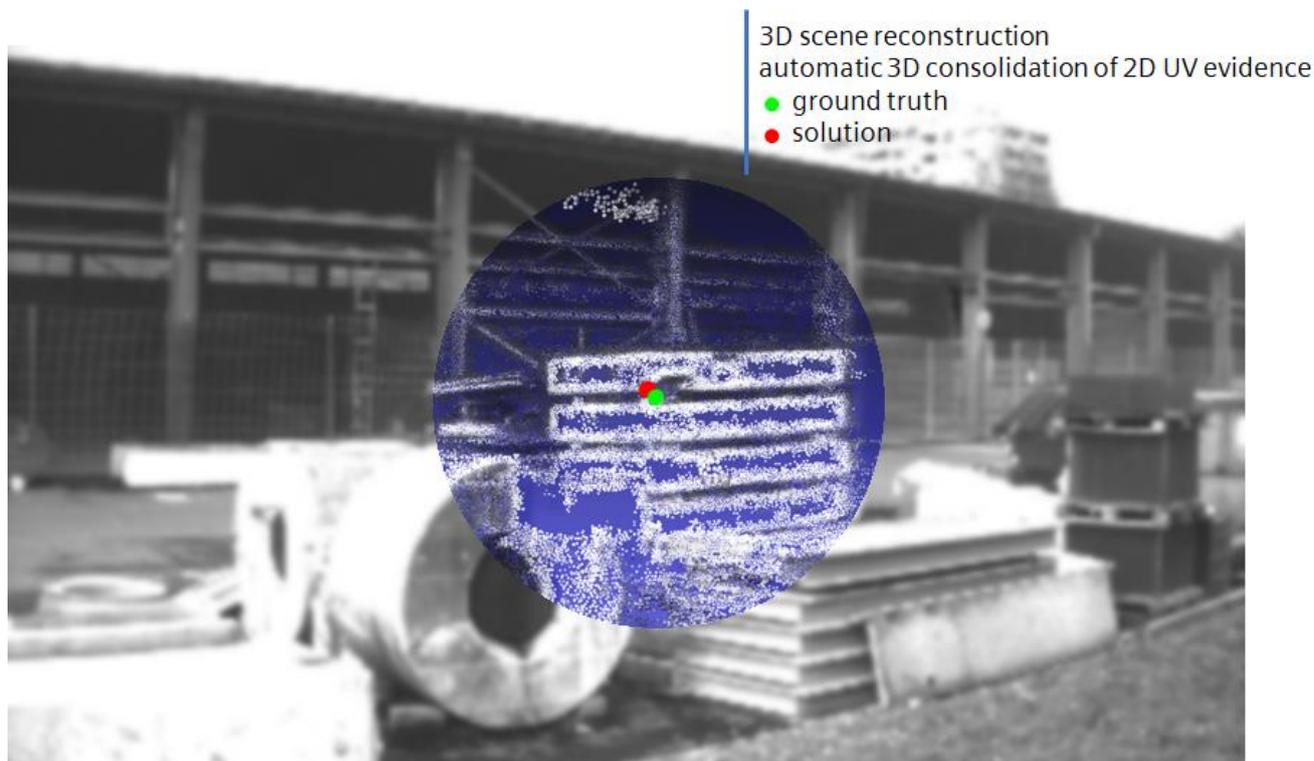


Abbildung 17: Evaluierung der Lokalisierungsgenauigkeit Outdoor mittels einer platzierten UV-Störquelle

Messdistanz (m)	Homographie		Kalibrierung	
	Lageabweichung (m)	Messunsicherheit (m)	Lageabweichung (m)	Messunsicherheit (m)
6.55	0.20	0.19	0.09	0.07
9.75	0.38	0.27	0.24	0.14
15.32	0.53	0.68	0.28	0.41

Tabelle 1: Vergleich der Lokalisierungsgenauigkeit zwischen einer einfachen Homographieberechnung und der in VOLTAIR entwickelten aktiven Kalibrierungsmethode (Quelle [3])

3.5.4 Thermische Inspektion von stromführenden Klemmverbindungen

Aufgrund der Ergebnisse der Recherchen und dem Austausch mit Experten auf dem Gebiet der IR-Thermographie im Bereich der Hochspannungstechnik wurde entschieden, sich im Bereich der thermischen Inspektion auf Klemmverbindungen zu konzentrieren. Dazu wurden Klemmverbindungen kontrolliert erhitzt und unter Aufnahmebedingungen (Entfernung, Geschwindigkeit) erfasst, die das spätere Anwendungsszenario gut widerspiegeln. Herzstück der Experimente war die Nachbildung einer Multiklemmenanordnung im Labor wie sie typischerweise auf Stromschlaufen an Abspannmasten vorkommt.

Da die Messung genauer Temperaturen mit unserer Kombination aus Entfernung und Geschwindigkeit nur sehr schwer möglich ist, wurde entschieden auf Vergleichsmessungen gleich belasteter Klemmen zu setzen. Diese Anordnungen sollten es ermöglichen, visuell Unterschiede von Klemmen zu erkennen und damit potenziell fehlerhafte Klemmen zu identifizieren. Im Falle von Doppel- oder Dreifachklemmverbindungen haben die vorangegangenen Versuche gezeigt, dass die nicht defekte Klemme größeren Belastungen ausgesetzt ist. Daher reicht es aus, wenn eine Klemmtemperatur abweicht, um auf einen potenziellen Fehler zu schließen bzw. den Bereich einzugrenzen.

In Abbildung 18 Abbildung 16 ist das grundsätzliche Schema dieser Messungen zu sehen. Drei separate Leiterschleifen, in denen jeweils ein Paar Verbindungsklemmen montiert war, wurden von einem Stromwandler selektiv induziert. Das Ziel dieses Experiments ist es, Klammerpaare gezielt so zu erwärmen, dass zwischen den Schleifen bestimmte Temperaturunterschiede erreicht werden.

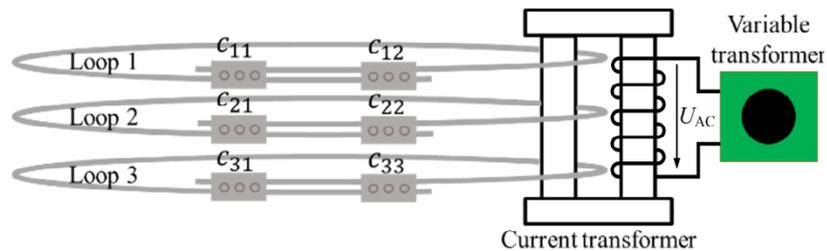


Abbildung 18: Schema der Versuche mit Multiklemmenanordnung

Während des Multiklemmen-Experiments wurden relevante Temperaturunterschiede gemäß Tabelle 2 festgestellt. Aufgrund technischer Einschränkungen wurde jedoch eine maximale Temperaturdifferenz von 20 K erreicht. Die erhitzten Klemmverbindungen wurden mit dem am „Flying-Fox“ montierten Sensorkopf erfasst, der 15 m vom Aufbau entfernt mit Geschwindigkeiten zwischen 1 m/s und 9 m/s am Messaufbau vorbeibewegt wurde. Die Bestimmung der Klemmtemperaturen ist mit Thermoelementen erfolgt. Abbildung 19 zeigt das exemplarische Erscheinungsbild einer Klemme für verschiedene gemessene Temperaturen und Geschwindigkeitswerte.

	Kategorie	$\Delta\theta$
	Allgemeine thermische Defekte	10 - 20 K
	Schwere thermische Defekte	20 - 40 K
	Gefährliche thermische Defekte	> 40 K

Tabelle 2: Relevante Übertemperaturbereiche (Quelle [1])

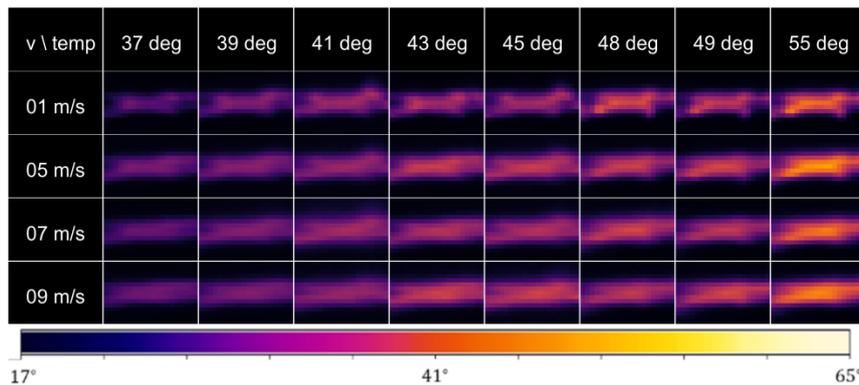


Abbildung 19: Typisches Erscheinungsbild einer Klemmverbindung wenn Temperatur und Aufzeichnungsgeschwindigkeit variiert werden

3.5.5 Feldversuch: UAV Befliegung Umspannwerk

Abschließend wurden im Rahmen einer UAV-Befliegung reale UV-Störstellen an einem Umspannwerk nahe Gleisdorf detektiert und ebenfalls mit einer Messung vom Boden aus verglichen. Details zu diesem beiden Experiment werden in Kapitel 4 präsentiert.

3.6 Prozess- und Systemintegration

Als optimalen Kandidaten für eine Systemintegration der VOLTAIR-Ergebnisse hat sich die Smart Asset Management und Predictive Maintenance Lösung namens „Planning and Outage Intelligence“ (PnOI) herauskristallisiert, da PnOI speziell für die optimierte Wartungs- und Investitionsstrategie diverser Betriebsmittel von Verteilnetzbetreibern entwickelt wurde. Mittels PnOI lässt sich die Zuverlässigkeit des Netzes erhöhen, indem man sich mittels eines robusten Machine-Learning-Vorhersagemodells (ML-Modell) vorrangig auf die Betriebsmittel konzentriert, welche eine hohe, prognostizierte Ausfallswahrscheinlichkeit besitzen.

Als Trainingsdaten für das ML-Modell werden alle relevanten internen und externen Daten verwendet, welche vom Kunden beziehungsweise von frei verfügbaren („open data“), externen Datenquellen bezogen werden. Durch die zusätzliche Integration der Inspektionsdaten aus dem VOLTAIR-Projekt als weitere, externe Datenquelle erwarten wir eine nochmalige, deutliche Verbesserung der Vorhersagegüte des Ausfallprognosemodells für die Risikobewertung.

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

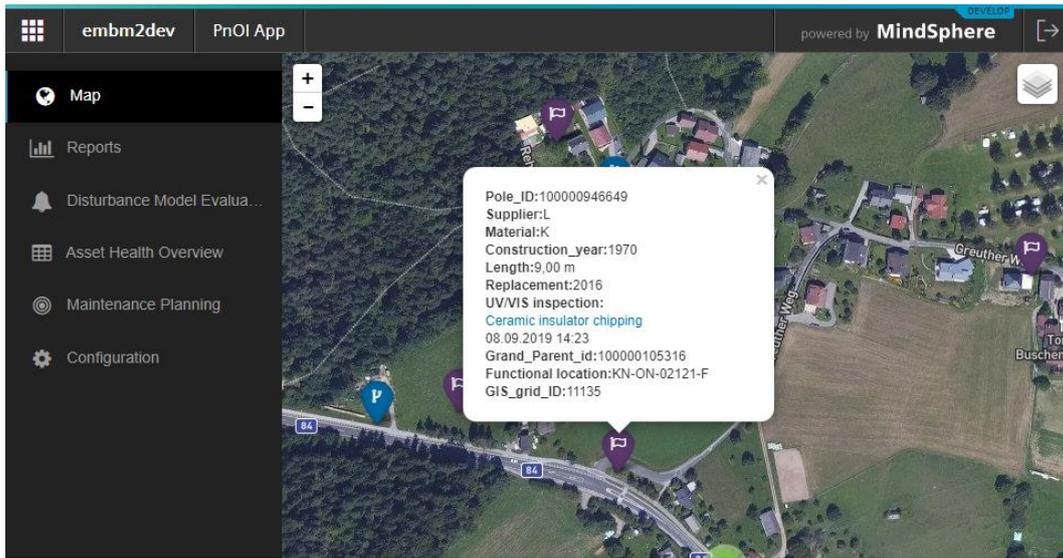


Abbildung 21: Erweiterung der Detailansicht eines Mastens um Daten zur "UV/VIS inspection" (Mockup)

3.7 Dissemination

Das Projekt VOLTAIR wurde im Rahmen der wissenschaftlichen Dissemination über mehrere Kanäle an die Fachwelt und auch an die Öffentlichkeit herangetragen. Erkenntnisse aus dem Projekt wurden in eine Laborübung für Studierende integriert und eine Bachelorarbeit konnte im Rahmen des Projektes abgeschlossen werden.

Der gesamte wissenschaftliche Output lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- 3 Fachpublikationen inkl. Präsentation [4][5][6]
- 2 Poster im Rahmen eines internationalen Forschungskolloquiums
- 1 Bachelorarbeit („UV-Detektion von simulierten Defekten elektrischer Betriebsmittel“)
- 3 Beiträge für Science-to-Public Veranstaltungen
 - Vortrag / Booklet Science Brunch „Energienetze“ von (Über)morgen“ [7][8]
 - 2 Poster D-A-CH Workshop (siehe Abbildung 23)



Abbildung 22: Impressionen Vorträge.
,Nord-IS 2019‘ (oben links), ,EnInnov 2020‘ (oben rechts) und ,Science Brunch‘ (unten)

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Mit dem finalen Sensorkopf wurden abschließende Versuchsreihen erfolgreich durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass entsprechend den Projektzielen sowohl im thermischen IR als auch im UV-Bereich potenzielle Störungen mit hoher Sensitivität automatisch detektiert werden können.

4.1 UV-Befundung

Im Jänner 2020 wurde an einem Umspannwerk in der Nähe von Gleisdorf in Absprache mit APG eine Befliegung mit einem UAV der Firma Twins GmbH (<http://twins.co.at>) durchgeführt. Die Firma Twins hat im Auftrag von Siemens einen Piloten für das UAV gestellt. Für den Sensorkopf wurde im Vorfeld eine spezielle Halterung konstruiert und einige Monate davor in einem Vortest in Tirol erprobt. Die Befliegung in Gleisdorf verlief abseits eines anfänglichen Boot-Problems mit dem Rechnerboard problemlos.



Abbildung 24: Impressionen zur Befliegung in Gleisdorf

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die Befliegung ist mit rund 5 m/s erfolgt und neben den UV-Daten wurden auch knapp 1000 Bilder im sichtbaren Bereich aufgenommen.

Aus den aufgenommenen Daten konnten zwei Verdachtsfälle für UV-Störungen im Bereich des Umspannwerkes identifiziert werden. Sowohl die Schutzarmatur an einem Isolator als auch ein Ausgleichgewicht zeigten Auffälligkeiten. In der nachfolgenden Abbildung ist die automatische Lokalisierung der UV-Störungen dargestellt in Bezug zu einem 3D-Modell² des Umspannwerkes bzw. zugehörige Detailaufnahmen der betroffenen Komponenten. Im Anschluss an die Befliegung hat eine terrestrische Nachmessung mit Handmessgeräten (Richtmikrofon, CoronaFinder [3]) der betroffenen Stellen stattgefunden, und die daraus ermittelten Positionen sind ebenfalls in Abbildung 25 eingetragen. Tabelle 3 quantifiziert die erzielte Lokalisierungs Genauigkeit im Feld für verschiedene Messabstände am Beispiel des Ausgleichgewichtes.

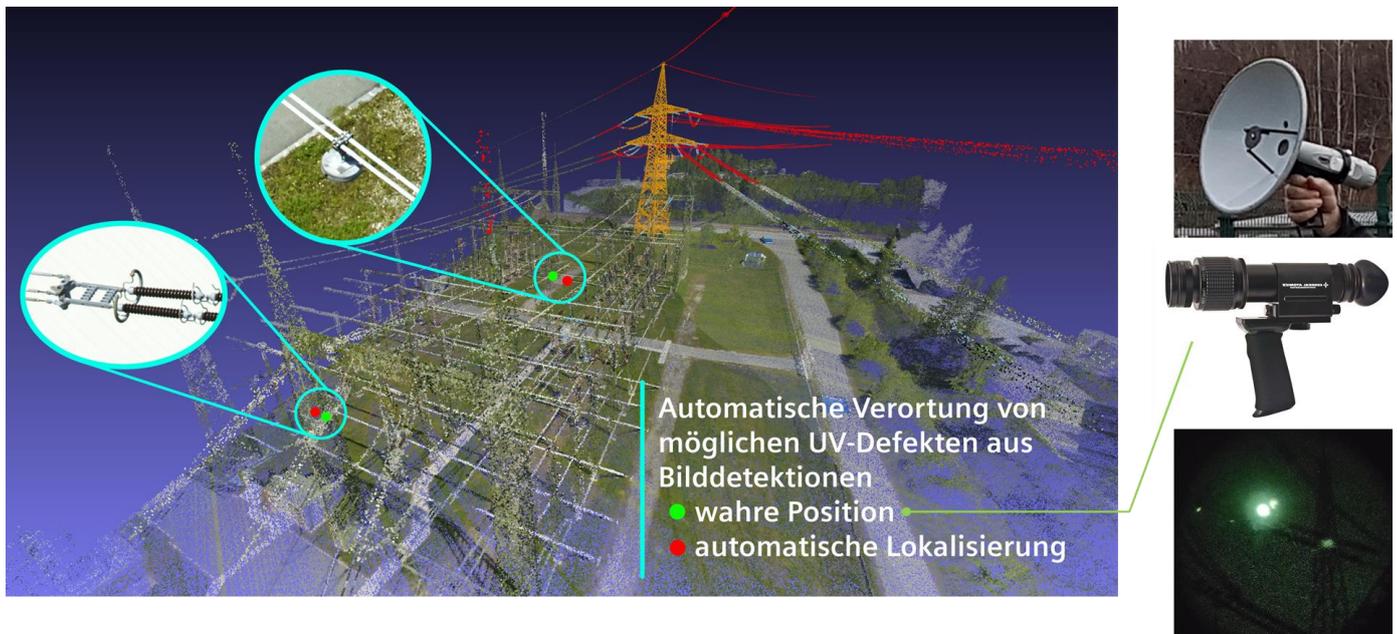


Abbildung 25: Ergebnis automatische Befundung aus den Befliegungsdaten

Messdistanz (m)	Lageabweichung (m)	Messunsicherheit (m)
32.7	1.69	4.20
39.5	0.94	1.50
45.8	1.86	3.17

Tabelle 3: Erzielte Lokalisierungs Genauigkeit im Rahmen der Befliegung (@ 5m/s)

² Sowohl die LiDAR Punktwolke als auch die Detailaufnahmen sind im Rahmen einer projektfremden Befliegung erzeugt worden. Diese Daten sind für die Funktion von VOLT AIR nicht notwendig, jedoch hilfreich um die gewonnen Ergebnisse besser interpretieren zu können.

In Abbildung 26 wurde zudem durch Langzeitbelichtung die Entladungen am Ausgleichgewicht und der Schutzarmatur sichtbar gemacht. Beide gefundenen Verdachtsfälle haben sich nicht als unmittelbar betriebsrelevant herausgestellt, können aber Hinweise auf allfällige Qualitätsmängel in der Zulieferung von Komponenten geben.

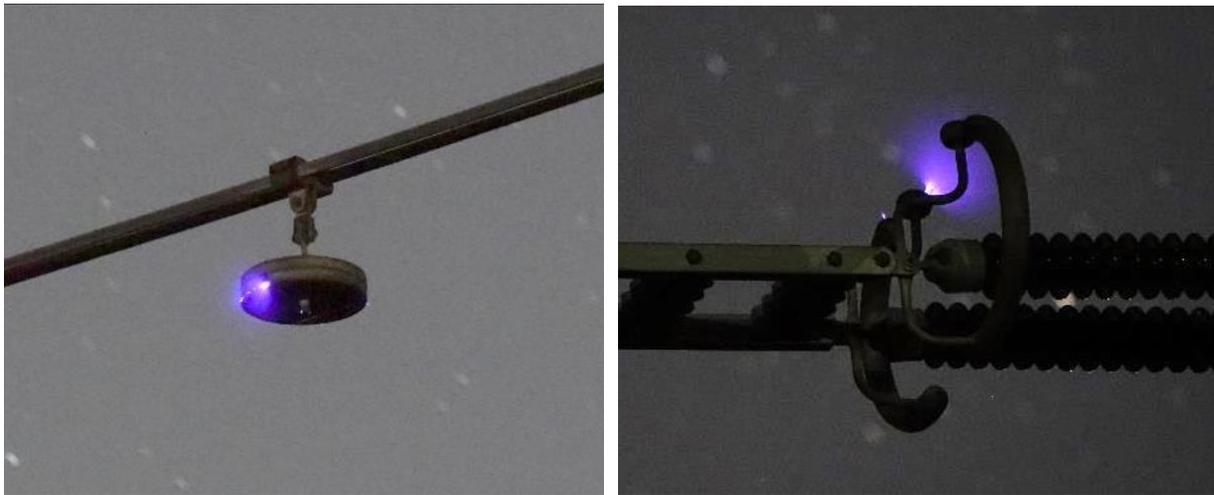


Abbildung 26: Koronaentladung zu Kontrollzwecken sichtbar gemacht durch Langzeitbelichtung: Ausgleichgewicht (links) und Lichtbogenhorn (rechts)

Insgesamt kann der UV-Befundung in VOLTAIR somit eine hohe Lokalisierungsgenauigkeit attestiert werden, die in jedem Fall ausreichend erscheint um Störstellen im Feld lokalisieren und eindeutig zuordnen zu können. Aus der Befliegung wurde ein kurzer Bericht für die APG abgeleitet und übermittelt.

4.2 IR-Befundung

Die größte Herausforderung bei der (luftgestützten) IR-Thermographie ist die Schätzung & Modellierung der vielen Umgebungseinflüsse und Messparameter. Eine Kernerkenntnis der IR-Versuche ist, dass es sehr schwierig ist, akkurate absolute Temperaturwerte mit den von uns gewählten Rahmenbedingungen zu ermitteln.

Deshalb wurde der Ansatz verfolgt, nicht die (absoluten) Temperaturen zu messen, sondern gleichartige Bauteile mit gleicher Last hinsichtlich ihrer thermischen Signatur zu vergleichen. Die Messungen haben gezeigt, dass eine solche Erkennung durchaus möglich ist. Im Rahmen des Projekts wurde eine innovative CAPTCHA[10]-artige Darstellung zur Identifizierung erhitzter Klemmen in Wärmebildern vorgeschlagen.

Eine Anwenderstudie hat gezeigt, dass diese thermischen CAPTCHAs erfolgreich verwendet werden können, um Temperaturunterschiede von nur 10 K zu erkennen. Eine Testgruppe von fünf Personen wurde gebeten, Anomalien in einem zufällig generierten Raster von Klemmverbindungen zu identifizieren. Als Anomalien gelten Klemmen mit abweichender thermischer Signatur, die bis zu 20%

der Elemente im Raster ausmachen können. Abbildung 27 zeigt ein Beispiel eines 3 × 5-Rasters von Klemmverbindungen, bei dem der Temperaturunterschied zwischen den abnormalen und den normalen Klemmen 10 K beträgt. Um die Performance der optisch-visuellen manuellen Klassifikation zu bewerten wurden die Precision- (P), Recall- (R) und F1-Scores für jeden Benutzer separat ermittelt, wobei die abnormalen Klemmen die positive Klasse bilden. Tabelle 4 zeigt die über die Anzahl der Benutzer gemittelten Ergebnisse aufgeteilt nach Temperaturdifferenz. Die Ergebnisse bestätigen, dass Unterschiede von lediglich 5 K relativ schwer zu erkennen sind, was durch einen Rückrufwert von 0,59 angezeigt wird. Eine hohe Precision deutet jedoch darauf hin, dass die Benutzer eher konservativ agieren. Andererseits können Temperaturunterschiede von 18 K von den Benutzern sehr zuverlässig erkannt werden.

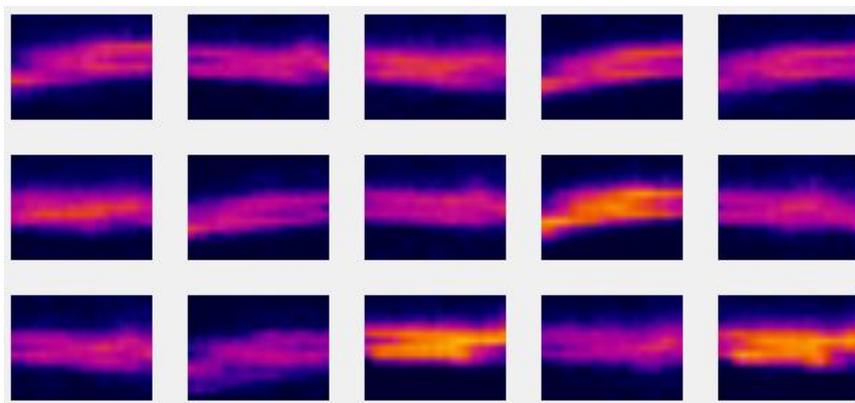


Abbildung 27: CAPTCHA (3 x 5), beispielhaft für das Multiklemmen-Experiment. Die Benutzer wurden gebeten, die Klemmverbindungen auszuwählen, die im Vergleich zu den anderen abnormal erscheinen (3 Bilder in diesem Beispiel).

Temperaturunterschied (K)	Mean Precision	Mean Recall	Mean F1-Score
5	0.81	0.59	0.66
10	0.82	0.90	0.84
18	0.98	1.00	0.99

Tabelle 4: Ergebnisse der Benutzerstudie zur Anomaliedetektion von Klemmverbindungen aus Thermalbildern

Darüber hinaus kann maschinelles Lernen verwendet werden, um Anomalien in Bildern, wie sie beispielsweise in CAPCHAs verwendet werden, automatisch zu erkennen, wodurch die Aufgabe des Benutzers noch weiter vereinfacht wird. Bei ausreichenden Trainingsdaten könnte ein Klassifizierungsalgorithmus Vorschläge für Anomalien liefern, die anschließend vom Benutzer validiert werden können. Insgesamt wird erwartet, dass die Verwendung von CAPCHAs die Effizienz erhöht und die visuelle Inspektion intuitiver macht.

5 Ausblick und Empfehlungen

Da die Ergebnisse von VOLTAIR als sehr positiv zu beurteilen sind, sollen sie im Rahmen von SIEAERO [9] nutzbringend eingesetzt werden, um das Portfolio von **Siemens** in der automatisierten Inspektion von Freileitungen zu bereichern. Sowohl mit der UV- als auch der IR Inspektion konnten neuartige Ansätze in VOLTAIR identifiziert werden, die ein Alleinstellungsmerkmal von Siemens darstellen können.

Für das **Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement** soll die erlangte Expertise in künftigen Projekten mit EVU's nutzbringend eingesetzt werden sowie durch weiterführende Forschung zusätzlich gestärkt werden. Dies betrifft etwa die Erforschung der Schädigungsmechanismen von Stabisolatoren sowie die Weiterforschung im Bereich Verbundisolatoren unter AC/DC Mischfeld. Zudem lässt die weiterführende Nutzung des Versuchsaufbaus „Flying Fox“ für zukünftige Forschungstätigkeiten im Bereich der Diagnostik unter dynamischen Bedingungen positive Einsatzmöglichkeiten erwarten.

Bei der IR-Diagnostik hat die in VOLTAIR erarbeitete Methodik das Potential, die Menge der in Frage kommenden Klemmen drastisch zu reduzieren, und zwar durch eine deutliche Effizienzsteigerung in der Diagnostik sei es semi-automatisch durch Generierung einer intuitiven Repräsentation für die manuelle Befundung, aber in Zukunft auch auf Basis vollautomatischer Klassifikationsverfahren. Temperaturunterschiede an stromführenden Klemmverbindungen von 20 K können praktisch gesichert, Temperaturunterschiede von 10 K noch relativ sicher erkannt werden.

Sowohl für IR- als auch UV-Diagnostik ist die Lagegenauigkeit der automatischen Befundung als ausgesprochen gut zu bewerten und in jedem Fall ausreichend, um Probleme bei einer Nachinspektion im Feld eindeutig eingrenzen zu können. Als langfristiges Ziel ist die vollständig automatisierte Diagnostik in UV und IR ohne manuelle Kontrolle oder Nachbefundung zu sehen, und VOLTAIR hat wesentliche Grundlagen dazu geliefert.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Y. Hu, and L. Kai, "Inspection and Monitoring Technologies of Transmission Lines with Remote Sensing", Academic Press, 2017.
- [2] S. Ullman, "The interpretation of structure from motion.," *Proc. R. Soc. London, Ser. B*, vol. 203, no. 1153, pp. 405–426, 1979.
- [3] <https://www.thermocam.ch/Syntronics-Corona-Finder>
- [4] G. Komar, O. Pischler, U. Schichler, and R.-L. Vieriu, "Performance of UV and IR Sensors for Inspections of Power Equipment", 26th Nordic Insulation Symposium on Materials, Components and Diagnostics (NordIS-19), Tampere, Finland, 2019
- [5] Komar, G., Pischler, O., & Schichler, U. "Herausforderungen bei automatisierter, drohnengestützter Inspektion elektrischer Betriebsmittel", Beitrag in 16. Symposium Energieinnovation , Graz, Österreich. 2020
- [6] G. Komar, O. Pischler, U. Schichler, R.-L. Vieriu and J.A. Birchbauer „Automatic UAV-Based Inspection of Overhead Lines and Substations: beyond visible spectrum”, 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD 2020), Phuket, Thailand, 2020
- [7] J.A. Birchbauer, G. Komar. Science Brunch des Klima- und Energiefonds zum Thema "Energienetze von (Über)morgen". <https://www.klimafonds.gv.at/event/science-brunch-energienetze-von-uebermorgen/>.
- [8] Booklet zum Science Brunch "Energienetze von (Über)morgen" https://www.klimafonds.gv.at/wp-content/uploads/sites/6/ScienceBrunch_05-Energienetze-von-%C3%9CberMorgen.pdf
- [9] SIEAERO - die nächste Generation der Freileitungsinspektion <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/siemens-praesentiert-sieaero-die-naechste-generation-der-freileitungsinspektion>
- [10] CAPTCHA - Wikipedia <https://de.wikipedia.org/wiki/Captcha>

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

7 Kontaktdaten

Projektleitung:

Siemens AG Österreich

Siemensstraße 90

1210 Wien

www.siemens.at

Verantwortlicher Projektleiter:



Weitere Projekt- bzw. KooperationspartnerInnen Name / Institut oder Unternehmen:

Technische Universität Graz

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Inffeldgasse 18/I

8010 Graz

<https://www.tugraz.at/institute/hspt/home/>

Ansprechpartner:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Schichler

https://online.tugraz.at/tug_online/visitenkarte.show_vcard?pPersonenId=A71D6B823ACDF07D&pPersonenGruppe=3