

DIANE

Abschlusspräsentation - Universität Würzburg

Dr. Julian Rothe

23.09.2026

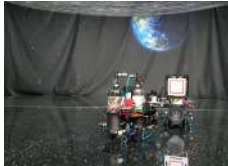
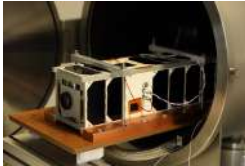
DIANE: Abschlusspräsentation - Universität Würzburg

- 1** Drohnen @ JMU Würzburg
- 2** Ausgangslage
- 3** Projektziele in DIANE
- 4** Entwicklung
- 5** Ergebnisse
- 6** Bilanz und Ausblick

DIANE: Abschlusspräsentation - Universität Würzburg

- 1** Drohnen @ JMU Würzburg
- 2 Ausgangslage
- 3 Projektziele in DIANE
- 4 Entwicklung
- 5 Ergebnisse
- 6 Bilanz und Ausblick

Drohnen @ JMU Würzburg



Für jede Mission die passende Drohne

Drohnen @ JMU Würzburg



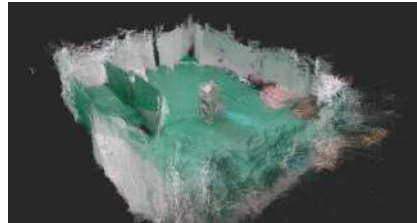
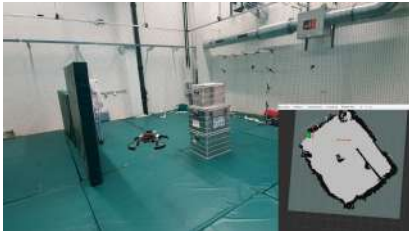
Beispiel: Projekt ROBEX

Drohnen @ JMU Würzburg



Beispiel: Qani

Drohnen @ JMU Würzburg



DIANE: Abschlusspräsentation - Universität Würzburg

- 1 Drohnen @ JMU Würzburg
- 2 Ausgangslage
- 3 Projektziele in DIANE
- 4 Entwicklung
- 5 Ergebnisse
- 6 Bilanz und Ausblick

Kanalinspektion heute

Ausgangslage

Das Kanalnetz ist der größte Vermögenswert der Kommunen

- > 590.000 km öffentliche Kanalisation in Deutschland
- Inspektionsintervall ca. 10 Jahre
→ ca. 60.000 km müssen **jedes Jahr** inspiziert werden

Kanalinspektion heute

Ausgangslage

Das Kanalnetz ist der größte Vermögenswert der Kommunen

- > 590.000 km öffentliche Kanalisation in Deutschland
- Inspektionsintervall ca. 10 Jahre
→ ca. 60.000 km müssen **jedes Jahr** inspiziert werden

Stand der Technik: kabelgebundener Kamerafahrwagen

- ca. 6–9 m/min Inspektionsgeschwindigkeit
- Einsatzradius durch Kabel begrenzt
- Sperrung von Straßen, Radwegen, Parkplätzen
- ca. 10–12 % des Netzes für radgeführte Systeme schwer oder nicht zugänglich

Warum Drohnen im Kanal?

Ausgangslage

Potential

- Erste Drohnen-Dienstleistungen zu Projektbeginn:
ca. 15 m/min, ca. 1/4 des Zeitaufwands
- Kein Einstieg in den Schacht
→ Erhöhte Arbeitssicherheit
→ Aufwand- und Zeitsparend
- Zugang zu Abschnitten, die für Fahrwagen nicht befahrbar sind

Warum Drohnen im Kanal?

Ausgangslage

Potential

- Erste Drohnen-Dienstleistungen zu Projektbeginn:
ca. 15 m/min, ca. 1/4 des Zeitaufwands
- Kein Einstieg in den Schacht
→ Erhöhte Arbeitssicherheit
→ Aufwand- und Zeitsparend
- Zugang zu Abschnitten, die für Fahrwagen nicht befahrbar sind

Hürden zu Projektbeginn (2022)

- Befliegung praktisch nur ab **DN 800**
(Elios 3: ca. 2,3 kg, ca. 48 cm)
- Nur mit **spezialisierten Pilot:innen**,
nicht durch eigenes
Betriebspersonal
- Teleoperation:
Keine Funkverbindung hinter Kurven
und Abzweigungen

Das Verbundvorhaben DIANE

Ausgangslage

Drohneneinsatz zur Inspektion von **Abwassernetzen**

Verbundpartner

- UNITECHNICS KG
- UNIINSPECTOR GmbH
- Berliner Wasserbetriebe (BWB)
- Universität Würzburg

Assoziierte Partner

- Hamburg Wasser
- Emschergenossenschaft

Rolle der Universität Würzburg

- AP 3: **Drohnenprototyp**
Konstruktion, Flughardware, Sensorik, Flugregler (federführend)
- AP 4: **Flugsoftware**
Software zur autonomen Kanalbefliegung (federführend)
- AP 2 / AP 7: Anforderungsanalyse, Testbefliegungen, Evaluation (beteiligt)

Laufzeit und Förderung

Ausgangslage

Laufzeit

- Projektstart: 01.10.2022
- Ursprüngliches Ende: 30.09.2025
- 1. Verlängerung (+9 Monate) bis 30.06.2026
externe Einflüsse auf den Arbeitsplan
- 2. Verlängerung (+3 Monate) bis 30.09.2026
Erprobung und Dokumentation des erreichten Stands

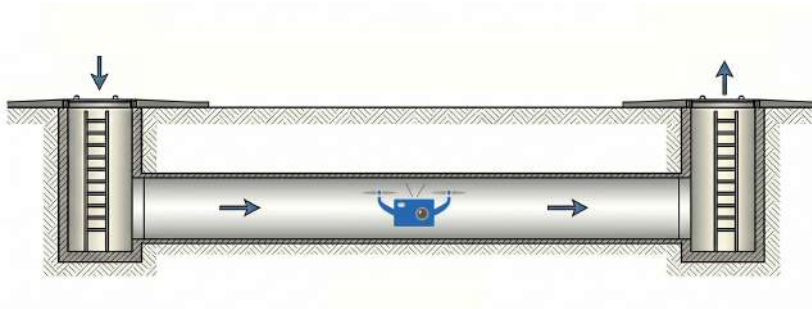
Förderung

- Förderrichtlinie mFUND – „Dateninnovationen für die Mobilität 4.0“
- Bundesministerium für Verkehr, FKZ 01F2228B
- Projektträger: VDI Technologiezentrum, später DLR

DIANE: Abschlusspräsentation - Universität Würzburg

- 1 Drohnen @ JMU Würzburg
- 2 Ausgangslage
- 3 **Projektziele in DIANE**
- 4 Entwicklung
- 5 Ergebnisse
- 6 Bilanz und Ausblick

Projektziele in DIANE



Projektziele in DIANE

Entwicklung eines UAVs für den Einsatz im Kanal mit Fokus auf

- **Miniaturisierung**

Befliegung von Kanälen mit Durchmesser $< \text{DN } 800$

Projektziele in DIANE

Entwicklung eines UAVs für den Einsatz im Kanal mit Fokus auf

- **Miniaturisierung**
Befliegung von Kanälen mit Durchmesser $< DN\ 800$
- **Automatisierung**
Möglichst einfache Steuerung durch (semi-) autonomer Flug

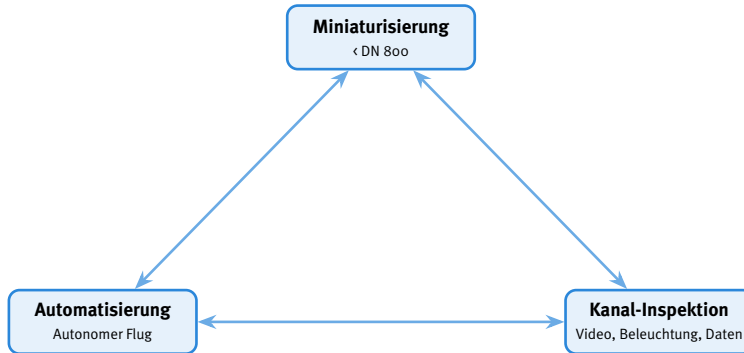
Projektziele in DIANE

Entwicklung eines UAVs für den Einsatz im Kanal mit Fokus auf

- **Miniaturisierung**
Befliegung von Kanälen mit Durchmesser $< \text{DN } 800$
- **Automatisierung**
Möglichst einfache Steuerung durch (semi-) autonomen Flug
- **Kanal-Inspektion**
Kamera-Payload muss Möglichkeit zur Inspektion bieten

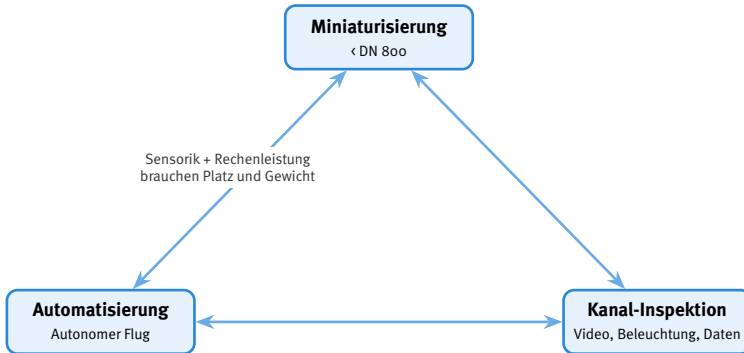
Herausforderungen

Projektziele in DIANE



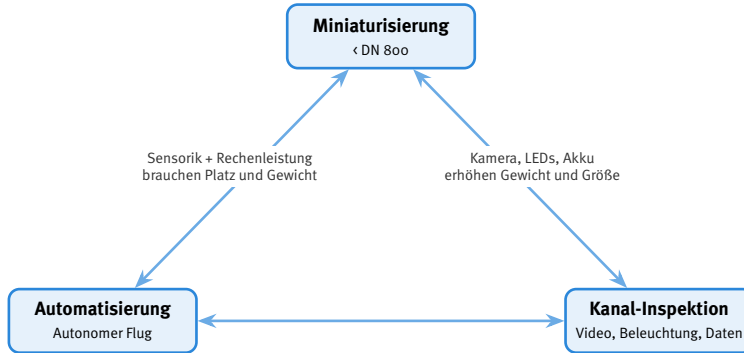
Herausforderungen

Projektziele in DIANE



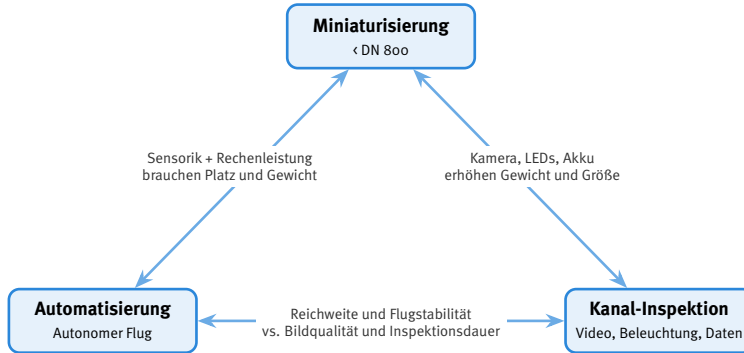
Herausforderungen

Projektziele in DIANE



Herausforderungen

Projektziele in DIANE

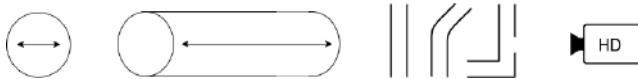


Herausforderungen

Projektziele in DIANE

Herausforderung: Alle genannten Ziele beeinflussen sich gegenseitig.

→ Ziel ist es, den besten Kompromiss zu finden – nicht ein Ziel zu maximieren.



DIANE: Abschlusspräsentation - Universität Würzburg

- 1 Drohnen @ JMU Würzburg
- 2 Ausgangslage
- 3 Projektziele in DIANE
- 4 Entwicklung**
- 5 Ergebnisse
- 6 Bilanz und Ausblick

Miniaturisierung

Entwicklung

Ziel der Miniaturisierung:

- Befliegung von Kanälen mit Durchmesser $< \text{DN } 800$

Herausforderungen:

- Inspektionsreichweite > 100 Meter $\rightarrow$ Flugzeit > 10 Minuten
- Videoqualität für Risse $< 0.5\text{cm}$
- Integration von komplexer Sensorik und Chips für FC

Marktverfügbare Mini-Drohnen

Miniaturisierung

Typ	Crazyflie	Mobula 7	3" Toothpick	Elios 3
Dimension [mm]	100	100	140	480
Leergewicht [g]	27	35	110	1900
Flugzeit inc. Payload [min]	5	5	10	9
Miniaturisierung	gut	gut	ok	nein
Automatisierung	möglich	nein	nein	semi
Kanalinspektion	fraglich	fraglich	fraglich	große Kanäle

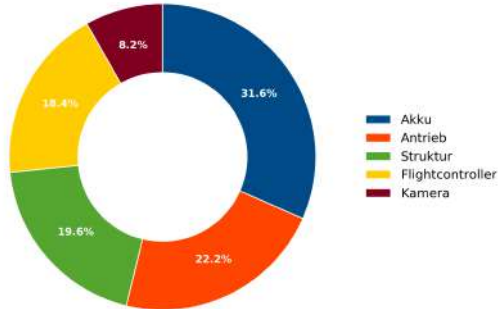
Herstellerangaben, Stand Projektbeginn 2022.

Untersuchungen Drohnenkomponenten

Miniaturisierung

Quadrocopter - Gewichtsverteilung [%]

Gesamt: 149 g

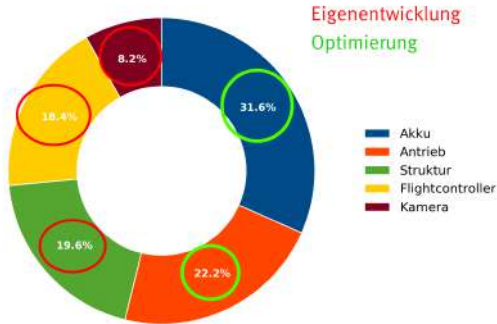


Untersuchungen Drohnenkomponenten

Miniaturisierung

Quadrocopter - Gewichtsverteilung [%]

Gesamt: 149 g



Optimierung Struktur und Platine

Miniaturisierung



Platine als Tragende Struktur:

- Hochminiaturisierte Eigenentwicklung in mehreren Iterationen
- Flightcontroller mit allen Bauteilen als Frame
- Bauteilgröße auf "Smartphone"-Niveau
- Fertigung im Platinenlabor des Lehrstuhls

Optimierung Struktur und Platine

Miniaturisierung

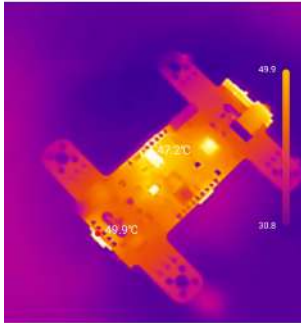


Platine als Tragende Struktur:

- Hochminiaturisierte Eigenentwicklung in mehreren Iterationen
- Flightcontroller mit allen Bauteilen als Frame
- Bauteilgröße auf "Smartphone"-Niveau
- Fertigung im Platinenlabor des Lehrstuhls

Optimierung Struktur und Platine

Miniaturisierung



Platine als Tragende Struktur:

- Hochminiaturisierte Eigenentwicklung in mehreren Iterationen
- Flightcontroller mit allen Bauteilen als Frame
- Bauteilgröße auf "Smartphone"-Niveau
- Fertigung im Platinenlabor des Lehrstuhls

Optimierung Akku

Miniaturisierung

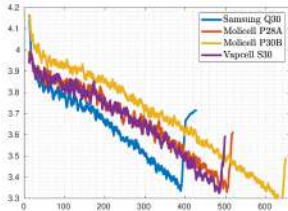


Intensive R&D + Testreihen:

- Vergleich verschiedener Batterietypen (LiPo vs Li-Ion)
- Optimierung der Batteriegröße vs Gewicht
- Flugtests unterschiedlicher Hersteller

Optimierung Akku

Miniaturisierung

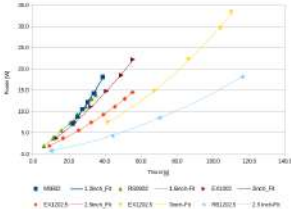


Intensive R&D + Testreihen:

- Vergleich verschiedener Batterietypen (LiPo vs Li-Ion)
- Optimierung der Batteriegröße vs Gewicht
- Flugtests unterschiedlicher Hersteller

Optimierung Antrieb

Miniaturisierung



Intensive R&D + Testreihen:

- Vergleich verschiedener Motoren und Propeller
- Optimierung der Propellergröße
- Flugtests unterschiedlicher Hersteller

Automatisierung

Entwicklung

Ziel der Automatisierung:

- (Semi-) Autonome Befliegung von Kanälen
- Eigenständiger Ein- und Ausflug aus Schächten

Herausforderungen:

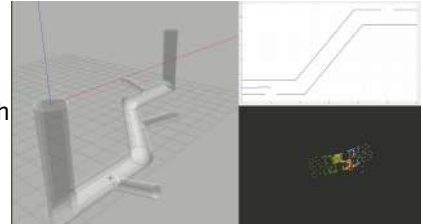
- Stabiler Flug in turbulenter Luft und starker Thermik
- Hinderniserkennung und -Ausweichen für komplexe Szenarien
- Eigenständige / Autonome Navigationsentscheidungen

Automatisierung

Entwicklung

Entwicklung der Algorithmen in Simulation

- Implementierung und Evaluierung verschiedener Algorithmen
- Simulation unterschiedlicher Szenarien möglich
- Algorithmen für Ein- und Ausflug
- Hinderniserkennung und Ausweichen (in der Simulation)



Automatisierung

Entwicklung

Evaluierung und Weiterentwicklung in Flughalle

- Sichere Entwicklungsumgebung
- Aufbau von Testkanälen angelehnt für "realitätsnahe" Testumgebung
- Erprobung und Weiterentwicklung der Regleralgorithmen in turbulenter Luft



Automatisierung

Entwicklung

Evaluierung und Weiterentwicklung in Flughalle

- Sichere Entwicklungsumgebung
- Aufbau von Testkanälen angelehnt für "realitätsnahe" Testumgebung
- Erprobung und Weiterentwicklung der Regleralgorithmen in turbulenter Luft



Automatisierung

Entwicklung

Finale Entwicklung im Testkanal der BWB

- Verbindung von Entwicklungsumgebung und realitätsnahen Bedingungen
- Realer Ein- und Ausflug über den Schacht (600 mm abzgl. Steigeisen)
- Härtung der Algorithmen unter realen Bedingungen (Thermik am Schacht, Rückströmung im Rohr)



Kanal-Inspektion

Entwicklung

Ziel der Inspektion:

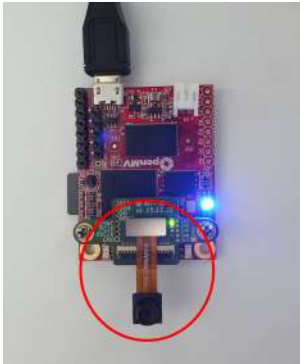
- Bildmaterial zur Erfassung von Schäden
- Positionierung im Kanal und Verbindung zu Bilddaten
- Inspektion ohne Schachteinstieg und ohne Fremdlicht

Herausforderungen:

- Gesamte Ausleuchtung muss mitgeführt werden ($< 100\text{g}$ Gewicht)
- Ausleuchtung und Bildqualität bei großer Querschnitte bis DN 1200 bei geforderter Rissbreite $\geq 2\text{ mm}$
- Bordseitige, synchrone Aufzeichnung von Bild-, Thermal- und Tiefendaten

Kanal-Inspektion

Entwicklung



Eigene Maßanfertigung des Kameramoduls

- Konfektionierung von "Smartphone" Kamera
- Integration in die Platine
- Auslesen und Speicherung auf dem Flightcontroller

Beleuchtung

Entwicklung

Problem:

- Kein Fremdlicht im Kanal – das gesamte Licht muss mitfliegen
- Licht kostet Gewicht und Energie
- Erste Auslegung im Berliner Übungskanal zu dunkel für Rissbreiten ab 2 mm

Lösung:

- Acht zusätzliche LEDs auf dem Erweiterungsboard
- Etwa dreifache Helligkeit
- Bildqualität im Eiprofil 1500 mm bestätigt

Verortung der Aufnahmen

Entwicklung

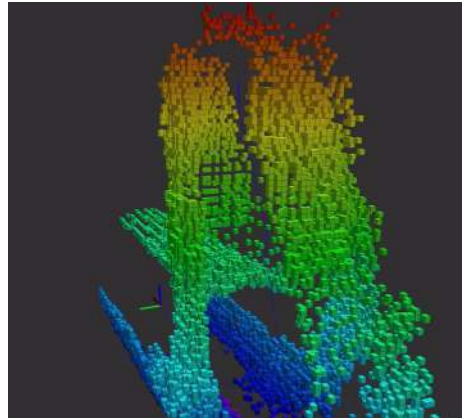
Ziel: Jedes Bild muss einer Stelle in der Haltung zuzuordnen sein.

- Verknüpfung des Videomaterials mit der bordseitig geschätzten Eigenposition
- Optische Flusssensoren als Stütze entlang der Rohrachse
- Video-, Thermal- und Tiefendaten zeitlich synchron aufgezeichnet

3D-Rekonstruktion

Entwicklung

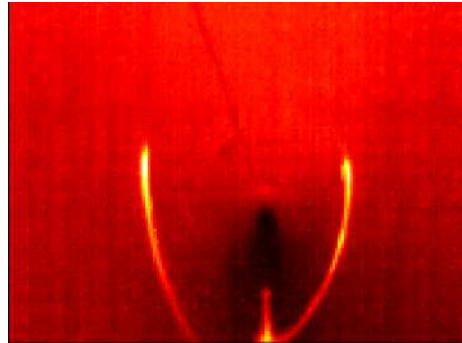
- Rekonstruktion einer Punktwolke des Kanalinneren aus den Tiefendaten
- Ermöglicht die Ersterfassung von Kanal- und Bauwerksabmessungen
- Im Lastenheft als optionale Anforderung benannt – umgesetzt



Thermalbild

Entwicklung

- Thermalkamera zusätzlich zur Full-HD-Kamera integriert
- Aufzeichnung zeitsynchron zu Video- und Tiefendaten
- Zusätzlicher Bildkanal, der mit herkömmlichen Kamerafahrwagen nicht erhoben wird



DIANE: Abschlusspräsentation - Universität Würzburg

- 1 Drohnen @ JMU Würzburg
- 2 Ausgangslage
- 3 Projektziele in DIANE
- 4 Entwicklung
- 5 Ergebnisse**
- 6 Bilanz und Ausblick

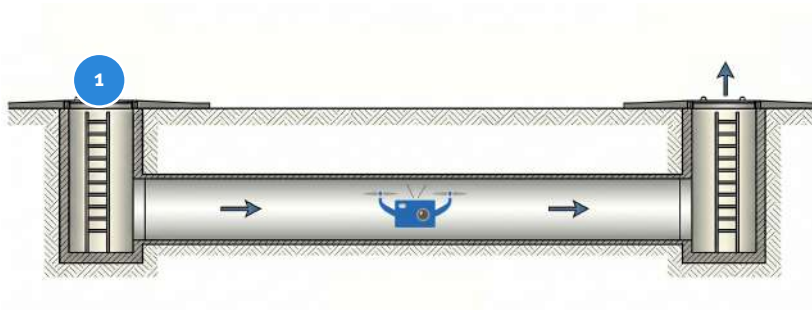
Das Gesamtsystem

Ergebnisse

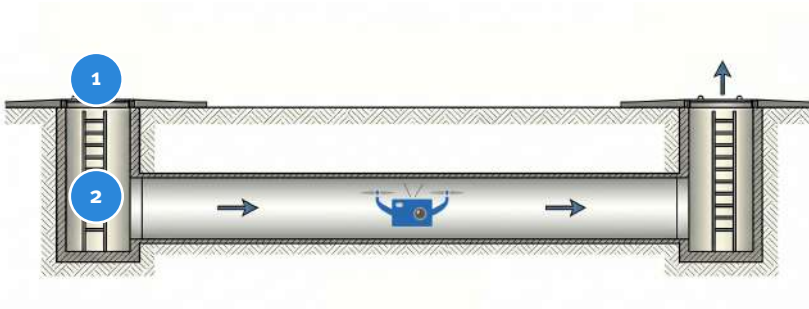


Parameter	Finaler Prototyp
Abfluggewicht	< 100 g (< 40 g ohne Akku)
Außen- durchmesser	ca. 15 cm (3 " Propeller, 100 mm Motorabstand)
Prozessor	STM32H7 Dual-Core
Betriebssystem	RODOS (Eigenentwicklung JMU)
Struktur	Leiterplatte als tragender Rahmen
Kamera	Full HD, 30 FPS, 8 zusätzliche LEDs
Sensorik	Tiefen-/Abstandssensoren, Radar, Ultraschall, IMU, Barometer, Lichtsensor, Thermalkamera
Flugzeit	ca. 15 min Schwebeflug, ca. 10 min im Kanal
Datenspeicher	boardseitig, Entnahme nach der Mission

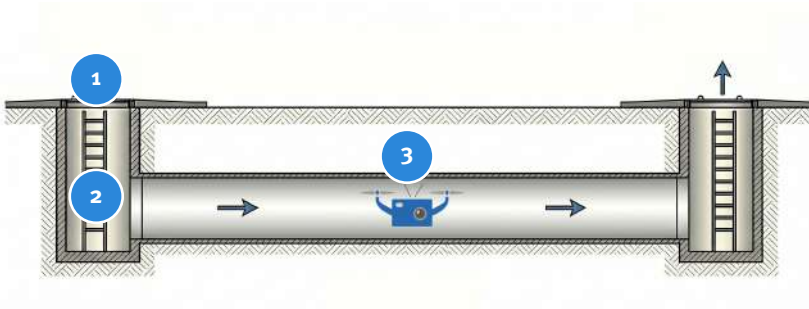
Ergebnisse



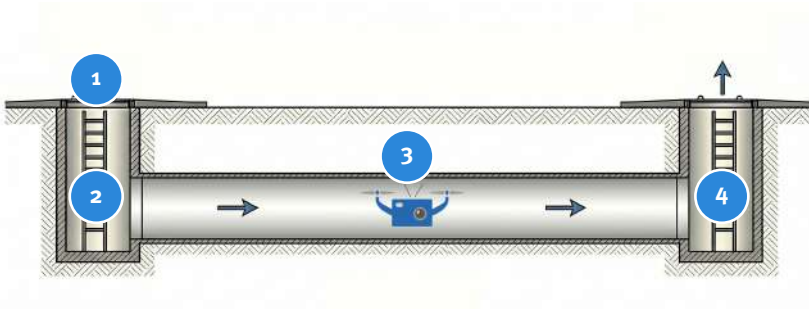
Ergebnisse



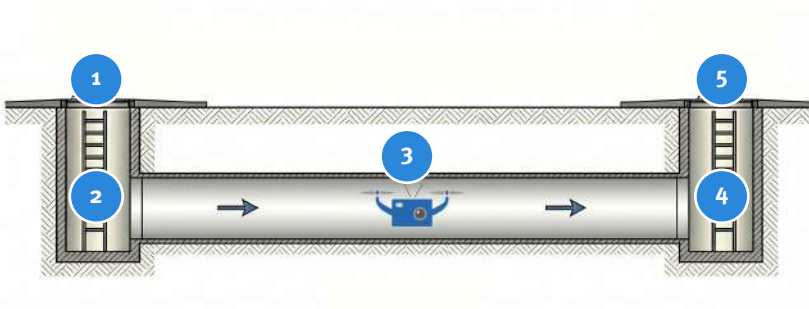
Ergebnisse



Ergebnisse



Ergebnisse

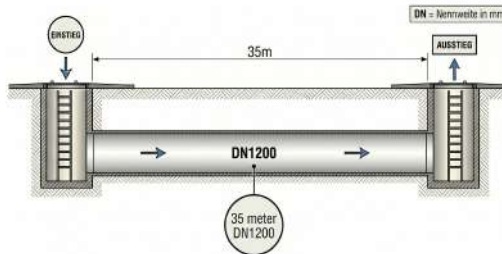


Testkanal BWB

Ergebnisse

Vollautonomer Flug

Einstieg – DN1200 – Ausflug

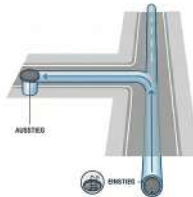


Flughalle Test Abbiegung

Ergebnisse

Vollautonomer Flug

Einstieg – DN800 – Abzweigung – DN450 - Ausflug

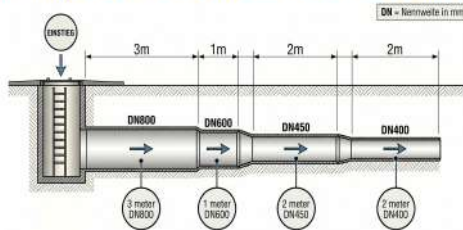


Flughalle Test Rohrdurchmesser

Ergebnisse

Vollautonomer Flug

Einstieg – DN800 – DN600 – DN450 – DN400



DIANE: Abschlusspräsentation - Universität Würzburg

- 1 Drohnen @ JMU Würzburg
- 2 Ausgangslage
- 3 Projektziele in DIANE
- 4 Entwicklung
- 5 Ergebnisse
- 6 Bilanz und Ausblick**

Soll-Ist-Abgleich gegen das Lastenheft

Bilanz und Ausblick

Anforderung	Soll	Erreicht	
Rohrdurchmesser	$\geq$ DN 450	vollständig autonom bis DN 400 (Kanalnachbau)	✓
Ein-/Ausflug über Schacht	600 mm	autonomer Ein- und Ausflug umgesetzt und erprobt	✓
Flugzeit	$\geq$ 8 min	ca. 15 min Schwebeflug, ca. 10 min im Kanal	✓
Videoauflösung	$\geq 720 \times 576$	Full HD	✓
Beleuchtung	bis DN 1200	8 zusätzliche LEDs; Bildqualität im Eiprofil 1500 mm bestätigt	✓
Inspektion ohne Schachteinstieg	gefordert	erfüllt	✓
Betrieb ohne Fremdlicht, ohne Fernsteuerung	gefordert	erfüllt	✓
Schadenserkennung ZKo-ZK2	DWA-M 149-3	Bildqualität im Testkanal als ausreichend bestätigt	✓
Flugstrecke	$\geq$ 100 m Haltung	autonom nachgewiesen über 37 m (Länge Übungskanal); längere Strecken nicht erprobt	teilw.
Stationierung längs	$\pm$ 30 cm	ca. $\pm$ 0,5 m über 37 m	teilw.
Optional			
3D-Modell	Punktwolke	Rekonstruktion aus Tiefendaten umgesetzt	✓

Was wir (noch) nicht gezeigt haben

Bilanz und Ausblick

Für eine ehrliche Einordnung ebenso wichtig:

- Alle Nachweise erfolgten in **trockenen Rohren** – Feuchtigkeit, Kondensat, Aerosole, Schmutzwasser, Teilfüllung nicht systematisch untersucht
- **Unregelmäßige Hindernisse** (Wurzeleinwuchs, Inkrustationen, Ablagerungen) nicht systematisch untersucht
- **Netztopologien** mit Abzweigen, Querschnitts- oder Profilwechseln nur im Labor untersucht
- Längste zusammenhängend autonom beflogene Strecke: **37 m**
- **Kein Einsatz durch Betriebspersonal** – zur Bedienbarkeit durch Nichtfachpersonal liegen keine gemessenen Aussagen vor
- **Explosionsschutz:** Prototyp ist nicht ATEX-zertifiziert

Wie geht es weiter?

Bilanz und Ausblick

Verwertung

- Marktsegment unterhalb DN 800:
bislang für flugbasierte Inspektion
praktisch nicht bedienbar
- Verwertungspfade:
akademische Ausgründung (primär),
Lizenzierung, freie Lizenz für
generische Softwarekomponenten
- Ergebnisse fließen in die Lehre (B.Sc.
Luft- und Raumfahrtinformatik); 4
Bachelor-, 2 Masterarbeiten, 1
Dissertation

Wie geht es weiter?

Bilanz und Ausblick

Verwertung

- Marktsegment unterhalb DN 800: bislang für flugbasierte Inspektion praktisch nicht bedienbar
- Verwertungspfade: akademische Ausgründung (primär), Lizenzierung, freie Lizenz für generische Softwarekomponenten
- Ergebnisse fließen in die Lehre (B.Sc. Luft- und Raumfahrtinformatik); 4 Bachelor-, 2 Masterarbeiten, 1 Dissertation

Anschlussvorhaben AURIS (VIP+)

- Antrag eingereicht, Bewilligung offen
- Ziel: Validierung der Einsatzfähigkeit unter realen Kanalbedingungen
 - Härtung gegen Feuchte und Aerosole
 - Sensorfusion und Regelung unter realen Störungen
 - Navigation in komplexen Topologien (Abzweigungen, Erkundung)
 - Anbindung an DWA-M 150 / ISYBAU
 - Bedienbarkeit durch Betriebspersonal

Zusammenfassung

Bilanz und Ausblick

DIANE hat gezeigt, dass ...

- ... eine Inspektionsdrohne unter **100 g** und mit ca. **15 cm** Durchmesser Kanäle ab **DN 400** befliegen kann

Zusammenfassung

Bilanz und Ausblick

DIANE hat gezeigt, dass ...

- ... eine Inspektionsdrohne unter **100 g** und mit ca. **15 cm** Durchmesser Kanäle ab **DN 400** befliegen kann
- ... eine Haltung **vollständig autonom** von Schacht zu Schacht befliegbar ist – ohne GNSS, ohne Funk, ohne Live-Bild, ohne Fremdlicht

Zusammenfassung

Bilanz und Ausblick

DIANE hat gezeigt, dass ...

- ... eine Inspektionsdrohne unter **100 g** und mit ca. **15 cm** Durchmesser Kanäle ab **DN 400** befliegen kann
- ... eine Haltung **vollständig autonom** von Schacht zu Schacht befliegbar ist – ohne GNSS, ohne Funk, ohne Live-Bild, ohne Fremdlicht
- ... der Ein- und Ausflug über einen **600-mm-Schacht** autonom beherrschbar ist

Zusammenfassung

Bilanz und Ausblick

DIANE hat gezeigt, dass ...

- ... eine Inspektionsdrohne unter **100 g** und mit ca. **15 cm** Durchmesser Kanäle ab **DN 400** befliegen kann
- ... eine Haltung **vollständig autonom** von Schacht zu Schacht befliegbar ist – ohne GNSS, ohne Funk, ohne Live-Bild, ohne Fremdlicht
- ... der Ein- und Ausflug über einen **600-mm-Schacht** autonom beherrschbar ist
- ... Video-, Thermal- und Tiefendaten synchron erfasst und zu einer **3D-Punktwolke** verarbeitet werden

Zusammenfassung

Bilanz und Ausblick

DIANE hat gezeigt, dass ...

- ... eine Inspektionsdrohne unter **100 g** und mit ca. **15 cm** Durchmesser Kanäle ab **DN 400** befliegen kann
- ... eine Haltung **vollständig autonom** von Schacht zu Schacht befliegbar ist – ohne GNSS, ohne Funk, ohne Live-Bild, ohne Fremdlicht
- ... der Ein- und Ausflug über einen **600-mm-Schacht** autonom beherrschbar ist
- ... Video-, Thermal- und Tiefendaten synchron erfasst und zu einer **3D-Punktwolke** verarbeitet werden
- ... Inspektion **ohne Schachteinstieg** und perspektivisch ohne spezialisierte Pilot:innen möglich ist

Zusammenfassung

Bilanz und Ausblick

DIANE hat gezeigt, dass ...

- ... eine Inspektionsdrohne unter **100 g** und mit ca. **15 cm** Durchmesser Kanäle ab **DN 400** befliegen kann
- ... eine Haltung **vollständig autonom** von Schacht zu Schacht befliegbar ist – ohne GNSS, ohne Funk, ohne Live-Bild, ohne Fremdlicht
- ... der Ein- und Ausflug über einen **600-mm-Schacht** autonom beherrschbar ist
- ... Video-, Thermal- und Tiefendaten synchron erfasst und zu einer **3D-Punktwolke** verarbeitet werden
- ... Inspektion **ohne Schachteinstieg** und perspektivisch ohne spezialisierte Pilot:innen möglich ist

Offen bleibt der Nachweis unter realen Kanalbedingungen (nass, verschmutzt, verzweigt) – das ist der Auftrag für die Anschlussarbeiten.

Vielen Dank

Bilanz und Ausblick

Danke an

- die Verbundpartner UNITECHNICS Nord, UNITECHNICS Süd und Berliner Wasserbetriebe
- die assoziierten Partner Hamburg Wasser und Emschergenossenschaft
- die Berliner Wasserbetriebe für den Testkanal
- das Team am Lehrstuhl Informatik VIII und die beteiligten Studierenden
- mFUND / BMV und die Projektträger VDI-TZ und DLR für die Förderung und Begleitung

Kontakt

- Dr. Julian Rothe
- Lehrstuhl für Informationstechnik für Luft- und Raumfahrt (Informatik VIII)
- Julius-Maximilians-Universität Würzburg
- julian.rothe@uni-wuerzburg.de