

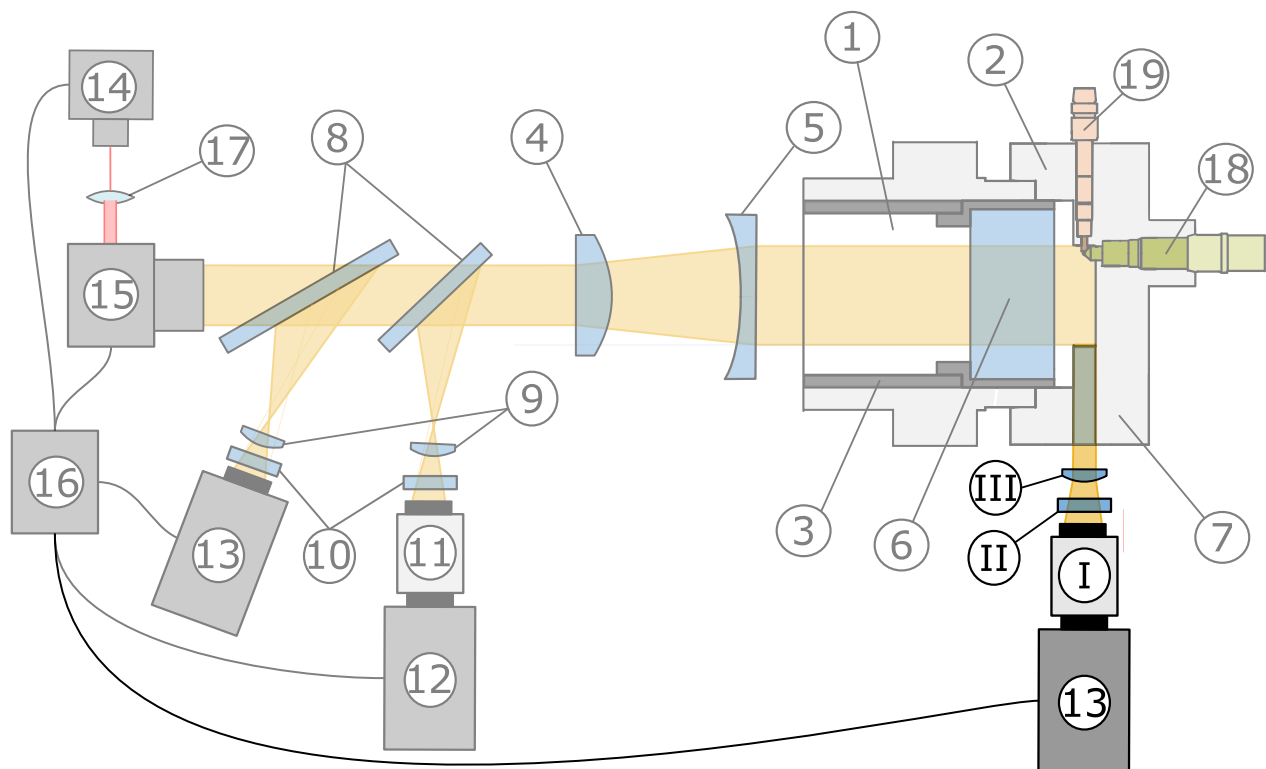
Leistungsbeschreibung

für die Beschaffung eines Messgesamtsystems für eine Rapid Compression Expansion Maschine zur Untersuchung von Strömungs- und Verbrennungsprozessen mittels Shadowgraphy, PIV, OH*-Chemielumineszenz und Mie-Scattering

Professor Dr.-Ing. Agnes Jocher, Professur für Sustainable Future Mobility

TUM School of Engineering and Design, Technische Universität München

1. Oktober 2026



Auftraggeber:

Autor:

Kontakt-E-Mail:

Vergabeverfahren:

Aktenzeichen:

Bearbeitungsstand:

Professor Dr.-Ing. Agnes Jocher

Maximilian Aabel

maximilian.aabel@tum.de

EU-weite Ausschreibung / Offenes Verfahren

064/2026

Finale Fassung

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Angaben	3
1.1	Auftraggeber	3
1.2	Gegenstand der Ausschreibung	3
1.3	Ziel der Beschaffung	3
2	Leistungsumfang	4
2.1	Allgemeiner Leistungsumfang	4
2.2	Anforderungen an das Gesamtsystem	4
3	Systemübersicht	4
3.1	Existierendes System	4
3.2	Erweiterung	6
4	Funktionale Anforderungen	7
5	Technische Anforderungen an die Komponenten	7
6	Schnittstellen und Integration	8
7	Lieferung, Installation und Inbetriebnahme	8
7.1	Lieferung	8
7.2	Installation	8
7.3	Inbetriebnahme	9
7.4	Gewährleistung	9
8	Abnahme	9
9	Dokumentation	9
10	Schulung	9
11	Angaben des Bieters	10
12	Service, Wartung und Gewährleistung	10
13	Zuschlagskriterien	10
13.1	Service/Support	10
13.2	Preis	11
13.3	Lieferzeit	11
13.4	Messtechnische Qualität	11
13.5	Wertungsmatrix	12

1 Allgemeine Angaben

1.1 Auftraggeber

Offizieller Auftraggeber

Prof. Dr.-Ing. Agnes Jocher
Technische Universität München
School of Engineering and Design
Professur für Sustainable Future Mobility
Boltzmannstr. 15
85748 Garching

Ansprechpartner

Maximilian Aubel
Technische Universität München
School of Engineering and Design
Professur für Sustainable Future Mobility
Boltzmannstr. 15
85748 Garching

1.2 Gegenstand der Ausschreibung

Gegenstand dieser Ausschreibung ist die Lieferung, Inbetriebnahme und Übergabe der Erweiterung eines vollständigen optischen Messgesamtsystems für einen Prüfstand zur Untersuchung von Strömungs- und Verbrennungsprozessen einer Einhubmaschine. Diese Einhubmaschine bildet auf der Skala von Schiffsmotoren den Einspritz- und Verbrennungsvorgang eines zweistoffbetriebenen Motors mit Dieselpilotzündung ab. Die verwendeten Treibstoffe umfassen Ammoniak, Methanol und Diesel. Bei den Untersuchungen liegt der Fokus auf Injektionseffekten und dem Zündungsprozess. Das System muss Messungen mittels folgendes Verfahrens ermöglichen:

Ergänzende OH*-Chemielumineszenzmessung

Welches sich mit den bestehenden Messverfahren synchronisieren lässt.

1.3 Ziel der Beschaffung

Ziel der Beschaffung ist ein integriertes, funktionsfähiges, synchronisiertes, adaptives und für den Laborbetrieb geeignetes Messsystem, mit dem das genannte Messverfahren reproduzierbar, sicher und mit hoher Messqualität durchgeführt werden kann.

2 Leistungsumfang

2.1 Allgemeiner Leistungsumfang

Der Auftragnehmer hat sämtliche zur vollständigen Funktionsfähigkeit erforderlichen Lieferungen und Leistungen zu erbringen. Dies umfasst insbesondere:

- Lieferung aller im Leistungsverzeichnis beschriebenen Hardwarekomponenten,
- vollständige Integration der Einzelkomponenten in das funktionsfähige Gesamtsystem,
- Installation und Inbetriebnahme am vom Auftraggeber spezifizierten Aufstellort,
- Justage und Funktionsprüfung der Ergänzung des Gesamtsystems,
- Übergabe der technischen Dokumentation der einzelnen Komponenten (aufgelistet in Abschnitt 5),
- Einweisung und Schulung des Bedienpersonals in der Nutzung und Bedienung der Ergänzung des Gesamtsystems, wenn diese nicht bereits anderweitig im Rahmen eines anderen Auftrags mit dem Auftraggeber erfolgt ist.

2.2 Anforderungen an das Gesamtsystem

Das Gesamtsystem muss:

- Das in Abschnitt 1.2 genannte Messverfahren unterstützen,
- Eine zeitlich präzise Synchronisation mit der schon existierenden OH*-Chemielumineszenz- oder Shadowgraphymessung ermöglichen,
- Für den wissenschaftlichen Laborbetrieb geeignet sein,
- Modular aufgebaut und erweiterbar sein,
- einen stabilen und reproduzierbaren Messbetrieb gewährleisten,
- Kompatibel mit den hohen Injektionsgeschwindigkeiten und den kleinen Partikelgrößen sein, die in Abschnitt 3 genauer spezifiziert sind.

3 Systemübersicht

Hier wird zunächst das bestehende System beschrieben und anschließend auf die Erweiterung des Messsystems eingegangen, die der eigentliche Bestandteil dieser Leistungsbeschreibung ist.

3.1 Existierendes System

Das **bereits existierende** Messgesamtsystem, welches in Abb. 1 dargestellt ist, gliedert sich in folgende Hauptbestandteile:

- Doppelpuls-Laser für zeitaufgelöste PIV/PTV-Messungen (Nr. 14),
- Lichtschnittoptiken zur Lenkung und Steuerung des Laserstrahles (Nr. 17),
- Kamera 1 zur PIV- oder Shadowgraphy-Messung (Nr. 13),
- Kamera 2 zur OH*-Messung (Nr. 12),
- Synchronisationseinheit für Kameras und Laser (Nr. 16),

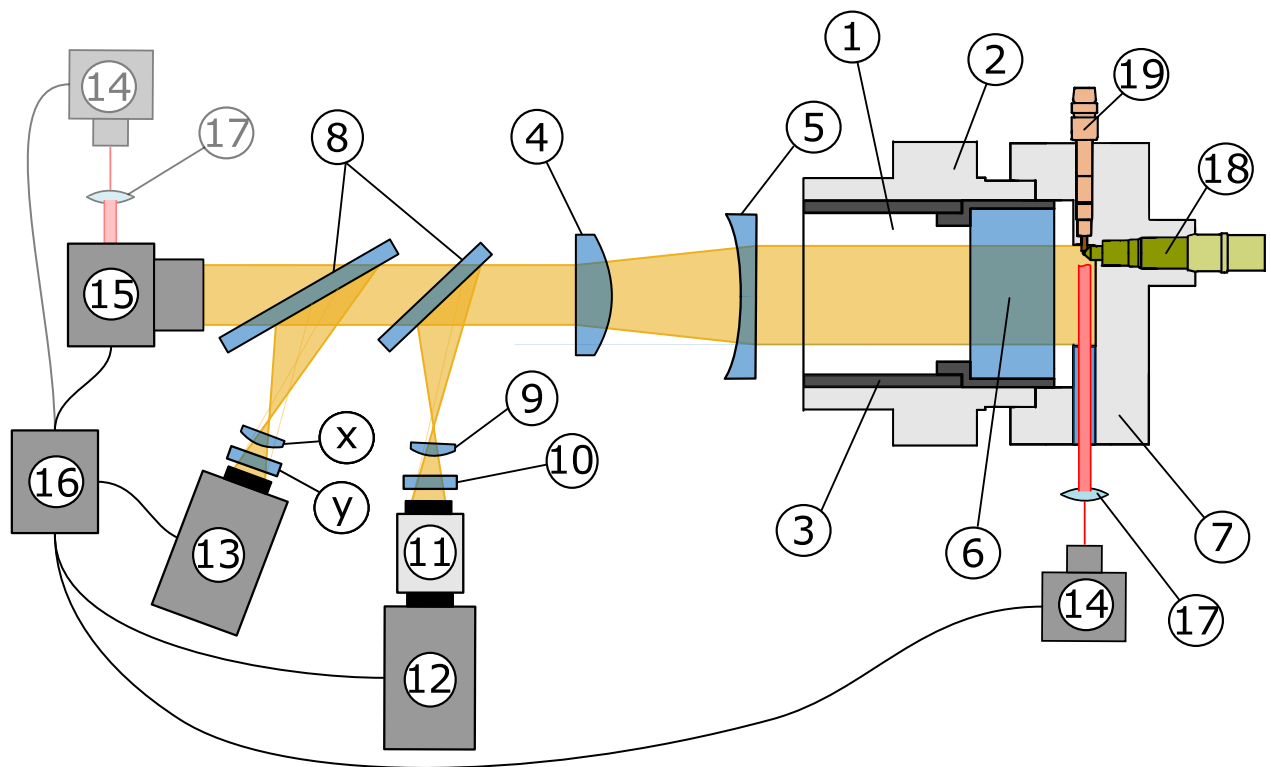


Abbildung 1 Schematische Übersicht des optischen Messaufbaus der RCEM inklusive aller Komponenten für das PIV- sowie Shadowgraphy-Setup.

- Kamera- und Optikhalter (nicht dargestellt in Abb. 1),
- Generelle Umlenk- und Fokussieroptiken (Nr. 4, 5, 8) (Optional),
- Laserlichtfilter (Nr. x) und Makroobjektiv zur PIV-Messung (Nr. y),
- Fernfeldmikroskop (Nr. x) und lasergesteuerte Lichtquelle für Shadowgraphy (Nr. 15),
- Kamerafilter (Nr. 9), UV-Kameraobjektiv für OH*-Messung (Nr. 10) und Bildverstärkereinheit (Nr. 11),
- Softwarepaket zum Setup, zur Automatisierung und zur Steuerung der Hardwarekomponenten, nicht dargestellt in Abb. 1),
- Softwarepaket zur Auswertung von 2D-PIV und Shadowgraphy (mit Möglichkeit der 2D-PTV-Messung, nicht dargestellt in Abb. 1),
- Messgesamtsystem-PC mit installierter Software (nicht dargestellt in Abb. 1).

Der dargestellte Messaufbau existiert in zwei Konfigurationen. Wobei die Platzhalter x und y aus der Abb. 1 ersetzt wurden und der Laser sich in seiner verwendeten Position befindet.

- Einmal zur Messung für PIV mit Laserlichtfilter (Nr. 20), Laser (Nr. 14) beim Zylinderkopf, Lichtschnittoptiken (Nr. 17) und Makroobjektiv (Nr. 21). Dieser Aufbau ist dargestellt in Abb. 2a.
- Zum anderen zur Messung für Shadowgraphy mit Fernfeldmikroskop (Nr. 22) und lasergesteuerter Lichtquelle (Nr. 15) inklusive Laser (Nr. 14) und Lichtschnittoptiken (Nr. 17). Dieser Aufbau ist dargestellt in Abb. 2b.

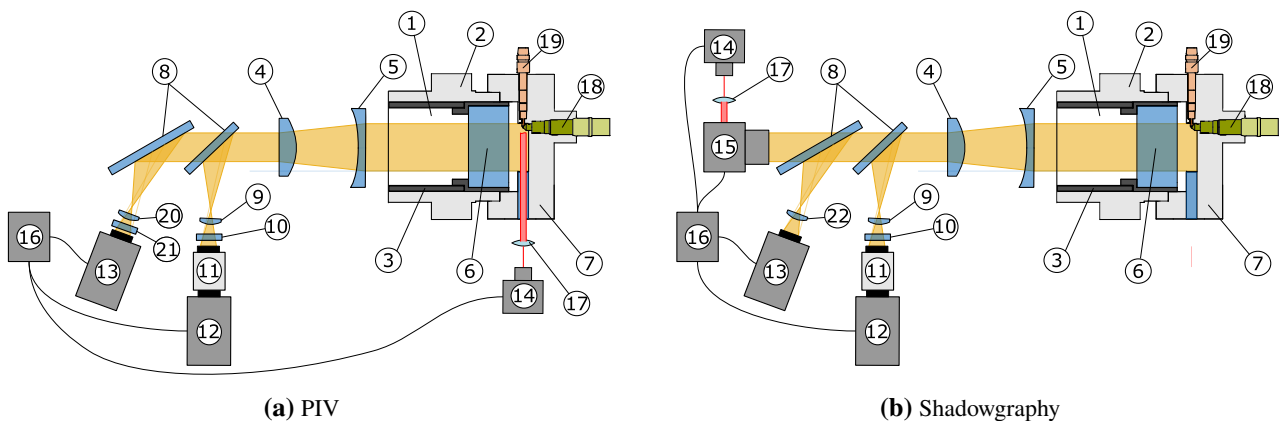


Abbildung 2 Schematische Darstellung des optischen Messaufbaus der RCEM mit PIV-Setup Abb. 2a links und Shadowgraphy-Setup Abb. 2b rechts.

Wobei jeweils die Komponenten der anderen Konfiguration, ausgenommen der Laser und möglicherweise nötige Lichtschnittoptiken, nicht im Einsatz sind.

Eine Injektion des Treibstoffes erfolgt über den Injektor (Nr. 18), die Injektion des Pilottreibstoffes über den Injektor (Nr. 19), die im Zylinderkopf mit optischem Zugang (Nr. 7) verbaut sind. Die Flüssigkeitstropfen sollen als durch PIV/PTV zu erfassende Partikel dienen, haben Größen in einem Intervall von einstelligen bis zweistelligen Mikrometern und besitzen Geschwindigkeiten im dreistelligen Bereich in Metern pro Sekunde. Während des Kompressionsprozesses der Einhubmaschine verfährt der durchsichtige Kolben (Nr. 3) in horizontaler Richtung im zylindrischen Gehäuse (Nr. 2). Dabei bleibt stets ein optischer Zugang mit einem Durchmesser von mindestens 115 mm durch das Quarzglas (Nr. 6). Der Raum vor der Verengung zum Quarzglaskolben (Nr. 1) hat einen Durchmesser von 160 mm. Unmaßstäblich ist in der Abb. 1 und in Abb. 2 die horizontale Länge des Raumes (Nr. 1) dargestellt. Die Länge von der optischen Messebene, die durch die Laserebene bestimmt wird, bis zum Ende des Raumes (Nr. 1) beträgt circa 1400 mm. Um eine Interaktion mit der Peripherie der Einhubmaschine zu vermeiden, sollte der optische Aufbau mindestens auf eine Distanz von 1600 mm zur Messebene ausgelegt sein.

3.2 Erweiterung

Die Erweiterung umfasst drei Komponenten, welche in Abb. 3 vorgehoben dargestellt sind:

- Bildverstärkereinheit (Nr. I),
- UV-Kameraobjektiv für OH*-Messung (Nr. II),
- Kamerafilter (Nr. III).

Dies dient der Generierung von OH*-Chemielumineszenzmessungen aus einem zweiten Blickwinkel mithilfe einer der vorhandenen Kameras (Nr. 12 oder Nr. 13). Dieser Blickwinkel ist durch den neuen optischen Zugang im Zylinderkopf entstanden. Der alte und neue Blickwinkel sollen für synchronisierte stereoskopische Erfassung der Verbrennung der Sprays dienen.

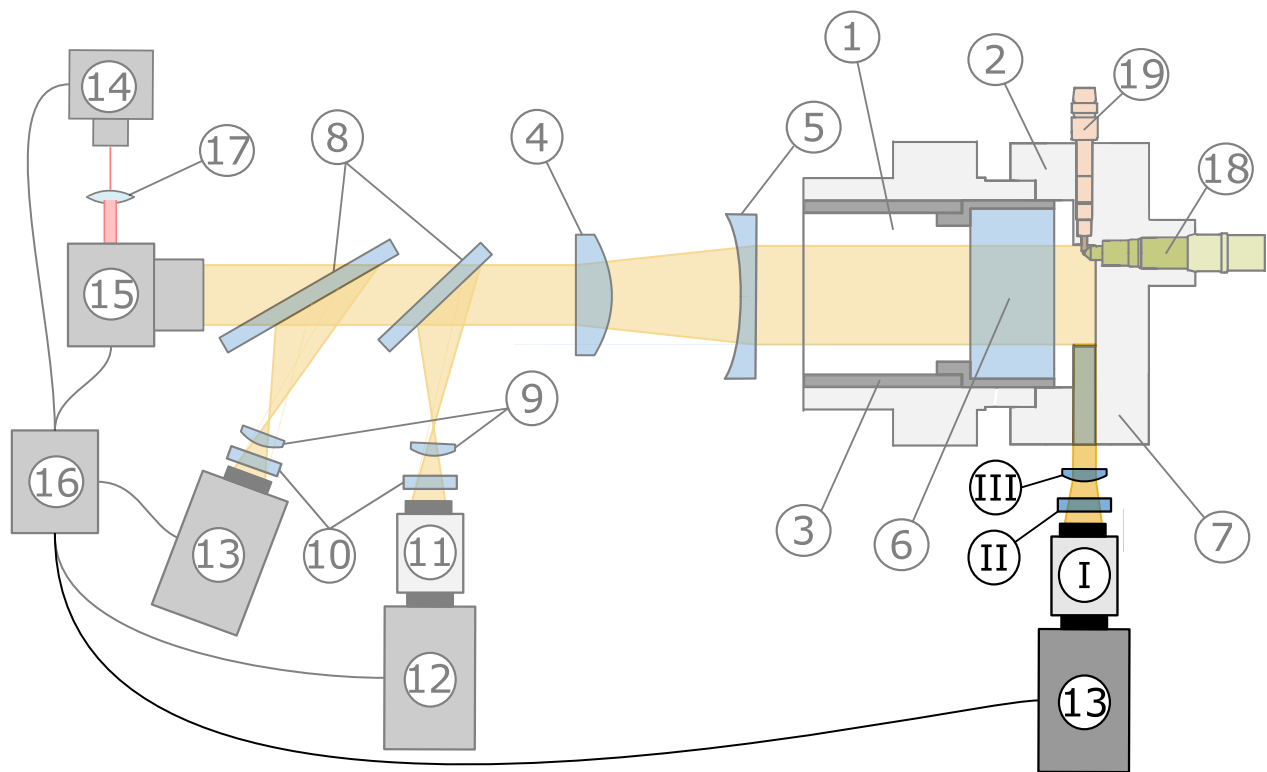


Abbildung 3 Schematische Übersicht der Erweiterung des optischen Messaufbaus der RCEM mit dem Gesamtsystem selbst ausgegraut.

4 Funktionale Anforderungen

Alle in diesem Abschnitt aufgeführten Eigenschaften sind als Mindestanforderungen zu verstehen.

Das System muss für die Detektion schwacher OH*-Chemielumineszenzsignale im geeigneten Spektralbereich geeignet sein. Hierzu sind insbesondere erforderlich:

- empfindliche Detektionseinheit,
- geeignete Filterung des relevanten Emissionsbereichs,
- Bildverstärkung bei geringem Rauschen,
- geeignete optische Abbildung im UV-Bereich.

5 Technische Anforderungen an die Komponenten

Für alle hier aufgelisteten Anforderungen muss der Bieter angeben, wie diese für die jeweiligen aufgelisteten Posten erfüllt werden. Alle in diesem Abschnitt aufgeführten Eigenschaften sind als Mindestanforderungen zu verstehen.

Für die OH*-Messung ist ein vollständiger Detektionsstrang bereitzustellen, der mit einer Phantom T2540- oder T4040-Kamera betrieben werden kann.

- Die Filter und Objektive können mit passenden, standardisierten Anschlüssen (F-Mount) an die Kameras und andere optische Komponenten angeschlossen werden

- **Bildverstärkereinheit**

- Minimale Gate-Zeit: ≤ 50 ns
- Photokathoden-Durchmesser: 24 mm bis 26 mm
- Empfindlichkeit im UV-Bereich
- Quarzfenster oder gleichwertig
- Schneller Phosphorschirm für Hochgeschwindigkeitsanwendungen im genannten Geschwindigkeitsbereich
- Optische Kopplung mit geeigneter Relaisoptik
- Möglichkeit des Betriebs ohne externen Steuerungscomputer, sondern allein im Verbund mit der Kamera.
- Die Wiederholrate des Bildverstärkers: ≥ 100 kHz.

- geeigneter optischer Filter für Wellenlängen im Bereich der OH*-Emissionen mit einem höchsten Transmissionswert von ≥ 50 %

- **UV-taugliches Kameraobjektiv**

- Brennweite: 90 mm bis 110 mm,
- Lichtstärke: mindestens $f/2.8$
- Geeignet für UV-Anwendungen

6 Schnittstellen und Integration

Der Auftragnehmer ist für die vollständige Integration sämtlicher angebotener Komponenten verantwortlich. Sämtliche Hardware- und Softwarekomponenten müssen im gelieferten Systemzustand miteinander kompatibel sein.

Insbesondere muss gewährleistet sein, dass:

- Existierende Kameras und die existierende Synchronisationseinheit gemeinsam mit dem neuen Bildverstärker betrieben werden können,
- alle erforderlichen Kabel, Adapter, Treiber und Schnittstellenumsetzungen im Lieferumfang enthalten sind.

7 Lieferung, Installation und Inbetriebnahme

7.1 Lieferung

Die Lieferung erfolgt frei Verwendungsstelle und mit Zeitbedingungen von Abschnitt 13.3 an den vom Auftraggeber benannten Aufstellort.

7.2 Installation

Der Auftragnehmer hat alle gelieferten Komponenten vollständig zu montieren, anzuschließen und in betriebsbereiten Zustand zu versetzen. Bei optischen Komponenten beinhaltet dies auch die Ausrichtung der Komponenten zueinander, um die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems zu gewährleisten.

7.3 Inbetriebnahme

Nach Installation ist das Gesamtsystem in Betrieb zu nehmen und auf Funktionsfähigkeit zu prüfen. Der Auftragnehmer hat im Rahmen der Inbetriebnahme sämtliche zur Verifikation der vertragsgemäßen Leistung erforderlichen Funktionsnachweise und Tests durchzuführen. Die Tests sind zu dokumentieren und dem Auftraggeber in geeigneter Form zur Verfügung zu stellen. Die hierfür maßgeblichen Prüfkriterien werden vorab zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer abgestimmt.

7.4 Gewährleistung

Der Auftragnehmer gewährleistet, dass das Gesamtsystem zum Zeitpunkt der Abnahme sowie während der Gewährleistungsfrist frei von Sach- und Rechtsmängeln ist. Die Gewährleistungsfrist beträgt, sofern nicht anders vereinbart, mindestens 24 Monate ab Abnahme. Während der Gewährleistungsfrist festgestellte Mängel sind durch den Auftragnehmer unverzüglich und kostenfrei zu beheben.

8 Abnahme

Die Abnahme erfolgt nach erfolgreicher Installation, Inbetriebnahme und Vorführung der Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems.

Zur Abnahme sind mindestens der Nachweis der grundsätzlichen Funktionsfähigkeit der OH*-Messkette und der Synchronisation mit dem existierenden Gesamtmesssystem zu erbringen.

Über die Abnahme ist ein Protokoll zu erstellen. Werden im Rahmen der Abnahme Mängel festgestellt, so sind diese durch den Auftragnehmer innerhalb des Kalenderjahres 2026 zu beheben.

9 Dokumentation

Mit der Lieferung sind mindestens folgende Unterlagen in deutscher oder englischer Sprache bereitzustellen:

- Bedienungsanleitungen,
- technische Datenblätter aller Systeme und Komponenten,
- Softwaredokumentation aller zum Betrieb nötigen und in dem Angebot spezifizierten Software,
- Installationshinweise,
- Wartungs- und Sicherheitshinweise,
- Übersicht über die Gesamtsystemkonfiguration.

10 Schulung

Der Auftragnehmer hat das vom Auftraggeber benannte Personal in die Bedienung, Grundkonfiguration und den sicheren Betrieb des Systems einzuweisen. Die Schulung muss mindestens folgende Inhalte umfassen:

- Bedienung und Montage der Hardwarekomponenten,
- Einrichtung typischer Messabläufe,
- Datenerfassung,
- Sicherheitsaspekte beim Betrieb.

11 Angaben des Bieters

Der Bieter hat mit dem Angebot mindestens folgende Informationen vorzulegen:

- Hersteller und Typenbezeichnung sämtlicher angebotener Komponenten,
- Angaben über die Art der Einhaltung der Mindestanforderungen,
- technische Datenblätter,
- Beschreibung des Gesamtsystems,
- Angaben zu Installation und Inbetriebnahme,
- Angaben zu Schulung, Service und Gewährleistung,
- Gegebenenfalls Abweichungen von den Anforderungen in tabellarischer Form.

12 Service, Wartung und Gewährleistung

Der Bieter hat Angaben zu folgenden Punkten zu machen:

- Gewährleistungsdauer,
- Reaktionszeiten im Servicefall,
- Zeitraum nach Abschluss der Gewährleistungsdauer in der noch ein Service/Beratung zur Verfügung steht,
- Supportmöglichkeiten,
- Ersatzteilverfügbarkeit,
- Empfohlene Wartungsintervalle.

13 Zuschlagskriterien

13.1 Service/Support

Ein langer Servicezeitraum, abzüglich des gesetzlich vorgeschriebenen Garantiezeitraums, sowie eine hohe Verfügbarkeit von Serviceleistungen wirken sich positiv auf die Bewertung des Angebots in Abschnitt 13.5 aus. Bewertet werden insbesondere:

- Dauer des angebotenen Service- und Supportzeitraums [30],
- Reaktionszeit im Onlinesupport [20],
- Verfügbarkeit von qualifiziertem Servicepersonal [20],
- Reaktionszeit für Vor-Ort-Serviceeinsätze [30].

Die Bewertung erfolgt auf Grundlage der vom Bieter angegebenen Werte im Vergleich zu den übrigen wertbaren Angeboten. Die Punktevergabe erfolgt nach folgenden Grundsätzen:

- Für Kriterien, bei denen ein höherer Wert vorteilhaft ist (z. B. Servicezeitraum):

$$P_{\text{SWG},i} = \text{Subpunkte}_i \cdot \frac{\text{Wert}_i}{\text{Wert}_{\text{max}}}$$

- Für Kriterien, bei denen ein niedrigerer Wert vorteilhaft ist (z. B. Reaktionszeit):

$$P_{\text{SWG},i} = \text{Subpunkte}_i \cdot \frac{\text{Wert}_{\text{min}}}{\text{Wert}_i}$$

wobei Subpunkte_i durch [Zahl] in der Auflistung nach jedem Kriterium gegeben ist. Danach werden alle Punkte aufsummiert. Dabei erhält das jeweils beste Angebot in einem Kriterium die maximale Punktzahl. Die Bewertung der übrigen Angebote erfolgt proportional anhand der angegebenen Werte. Bei der Angabe der Zeitwerte wird sich ein Ausschluss durch Plausibilität durch Ermittlung des nächstgelegenen Standortes vorbehalten. Hierzu ist vom Bieter stets eine Angabe zum nächstgelegenen Standort vorzulegen. Zusätzlich sind die angebotenen Zeiträume argumentativ darzulegen. Hierbei wird sich das Recht vorbehalten, Zeiträume ohne valide Argumentation aus der Wertungskategorie für Service, Wartung und Gewährleistung auszuschließen.

13.2 Preis

Das Angebot darf einen Betrag von 96.000,00 € nicht überschreiten. Eine Preisreduktion, die nicht erkennbar zum Schaden der Qualität der Erweiterung des gesamten Messsystems führt, wirkt sich positiv auf die Wertung des Angebots aus. Die Preise aller Angebote, die die Mindestanforderungen erfüllen und keine Einsparungen bei der Qualität des Messsystems aufweisen, werden verglichen. Die zu erreichende Punktzahl berechnet sich nach folgender Formel:

$$P_{\text{PR}} = 100 \cdot \frac{\text{Preis}_{\text{max}} - \text{Preis}}{\text{Preis}_{\text{max}} - \text{Preis}_{\text{min}}}$$

welche den maximal zulässigen Preis von 96.000,00 € mit $\text{Preis}_{\text{max}}$ und den minimal zulässigen Preis von 48.000,00 € mit $\text{Preis}_{\text{min}}$ bezeichnet.

13.3 Lieferzeit

Alle Anforderungen und Leistungen müssen bis spätestens zum 01.02.2027 erfüllt sein. Eine garantierte frühere Lieferung führt zu einer positiven Bewertung des Angebots. Die Formel der in dieser Kategorie zu erreichenden Punkte wird durch folgende Gleichung abgebildet:

$$P_{\text{ZR}} = \frac{\text{Lieferdatum}_i - 16.11.2026}{01.02.2026 - 16.11.2026}$$

Alle Rechnungen sind bis spätestens 08.12.2026 zu stellen. Falls eine Lieferung nach dem 08.12.2026 zu erwarten ist, ist eine Bankbürgschaft an den Auftraggeber zu übermitteln, damit die Rechnungszahlung dennoch abgewickelt werden kann.

13.4 Messtechnische Qualität

Die Zahlen, welche bei jeder Kategorie in [Zahl] angegeben sind, designieren die maximale Punktzahl, welche in dieser Kategorie erreicht werden kann durch Erfüllung der Kategoriebedingungen und -eigenschaften. Kategorien, in denen nach der höchsten, kleinsten oder besten Eigenschaft im Vergleich zu den Mitbewerbern gesucht wird, erhalten die beste Bewertung – die volle Punktzahl –, und die zweitbeste die Hälfte der Punkte. Bei einem Gleichstand werden Bewertungen mit demselben Platz in der Rangliste gleichwertig gewertet. Eine Begründung zu jedem Subkriterium ist vom Auftragnehmer vorzulegen. Dieses Kriterium wird erstellt durch die Subkriterien:

- Die kleinste minimale Gate-Zeit des Bildverstärkers. [5]
- Genaueste Ausrichtung des Fokus des Bildverstärkers und der Kamera zueinander mit dem geringstmöglichen Fehlerpotenzial. Eine Beschreibung des Ausrichtungsprozesses ist vom Auftragnehmer vorzulegen. [15]

- Niedrigster Wert der Inhomogenität des erzeugten verstärkten Bildes auf dem Sensor der Kamera durch den Bildverstärker. [10]
- Höchste Framerate des Bildverstärkers in der Linearität des Bildverstärkers gewährleistet ist. [10]
- Beste Übereinstimmung der OH*-Chemielumineszenz-Emissionskurve mit der Transmissionskurve des passenden Filters. Eine gesonderte Begründung der Transmissionskurve im Kontext des Anwendungsfalles ist vom Auftragnehmer vorzulegen. [20]
- Höchster durchschnittlicher Transmissionswert des OH*-Chemielumineszenzfilters im Bereich der OH*-Chemielumineszenz-Emissionskurve. [20]
- Die höchste Lichtstärke des UV-Objektives. [20]

13.5 Wertungsmatrix

Die Wertungsmatrix stellt die Bewertungskriterien dar, die zur Selektion der Angebote verwendet werden, nachdem diese alle Mindestanforderungen erfüllt haben. In jeder der angegebenen Kategorien können 100 Punkte erworben werden. Wie diese Punkte innerhalb der einzelnen Kategorien berechnet werden, ist in den jeweiligen Abschnitten vermerkt. Die Punkte der einzelnen Kategorien werden mit den angegebenen Gewichten zu einer Gesamtpunktzahl von 100 Punkten verrechnet. Diese Gesamtpunktzahl stellt schlussendlich das endgültige Bewertungskriterium dar.

Kriterium	Gewicht	Bemerkung
Messtechnische Qualität	[55%]	Qualität der Gesamtmessinfrastruktur nach Abschnitt 13.4
Preis	[30%]	Relative Wertung der Preise nach Abschnitt 13.2
Lieferzeit	[10%]	Frühere Lieferung von Subsystemen nach Abschnitt 13.3
Service / Support	[5%]	Verfügbarkeit von Service nach Abschnitt 13.1