

# Leistungsbeschreibung

## für einen Mikrofokus-Computertomografen

### 1 Ausgangslage und Zielsetzung

Das Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) plant die Installation eines Mikrofokus-Computertomographen zur zerstörungsfreien, dreidimensionalen Untersuchung von Baumaterialien und Bauteilen im Labormaßstab. Das Gerät soll das im Rahmen der DFG-Großgeräteinitiative entstehende Tomografieportal Gulliver ergänzen um skalenübergreifende Untersuchungen von der Mikro- bis zur Makroebene zu ermöglichen.

Im Mittelpunkt stehen die hochaufgelöste Charakterisierung von Schädigungs- und Alterungsmechanismen in Beton, Stahlbeton und faserverstärkten Kunststoffen (FVK) sowie die Analyse von Verbundbereiche zwischen Bewehrung und Beton. Die Mikro-CT-Anlage soll hierzu effiziente Voruntersuchungen sowie detaillierte Nachuntersuchungen ausgewählter Probenabschnitte ermöglichen und die Planung und Auswertung der Versuche im Tomografieportal unterstützen.

Gegenstand der Ausschreibung ist die Lieferung, Installation und betriebsbereite Übergabe eines industriellen Mikro-Computertomographie-Systems (Mikro-CT) einschließlich aller für den Routinebetrieb notwendigen Hardware- und Softwarekomponenten sowie die Einweisung des wissenschaftlichen und technischen Personals der RPTU.

Das Mikro-CT-System soll zur zerstörungsfreien 3D-Untersuchung und Vermessung von zementgebundenen Baustoffen, porösen Materialien, Faserverbundwerkstoffen, Einbauteilen sowie Verbundzonen zwischen Bewehrungen und Beton eingesetzt werden. Typische Aufgaben sind dabei:

- Analyse von Faserverteilung und -orientierung in faserbewehrtem Beton.
- Detektion und Quantifizierung von Rissbildung (Rissbreite, -fläche, -volumen).
- Ermittlung von Porenverteilung, Porenvolumen und Porengeometrie.
- Untersuchung von Verbundschäden an bewehrten/sanierten Betonproben (Stahlbewehrung, FVK-Bewehrung, geklebte Lamellen, etc.).
- Beurteilung der Form- und Maßhaltigkeit von Formschlussverbindungen und Einbauteilen.
- Materialdegradationsanalyse im Rahmen von Dauerhaftigkeitsprüfungen (ex-situ-CT).

Die Anlage soll sowohl eigenständige materialwissenschaftliche Untersuchungen an Kleinproben (siehe Abmessungen in Punkt 2.3) ermöglichen als auch Detailuntersuchungen an Ausschnitten aus großformatigen Bauteilversuchen, die am Tomografieportal Gulliver und am Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der RPTU durchgeführt werden.

### 2 Anforderungen und Spezifikationen

#### 2.1 Anforderungen an den Auftragnehmer (Eignungskriterien)

Der Auftragnehmer hat seine Eignung, Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit nach den Vorgaben der Vergabestelle der RPTU im Rahmen eines EU-weiten Vergabeverfahrens nachzuweisen. Hierzu gehören insbesondere Nachweise zur fachlichen Qualifikation (Referenzen für vergleichbare  $\mu$ CT-Systeme), zur wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit sowie zur rechtlichen Zuverlässigkeit.

Entsprechende Eignungskriterien und Nachweise werden in den Vergabeunterlagen der Beschaffungsabteilung spezifiziert.

## 2.2 Angebotspreis

Das Angebot hat einen verbindlichen Gesamtpreis in Euro zu enthalten. Das zur Verfügung stehende Budget beträgt maximal 607.000 € (inkl. MwSt.).

## 2.3 Grundgerät, Messvolumen und Aufbau

Die Anlage ist als Gerät mit integrierter Strahlenschutzkabine auszuführen. Quelle, Detektor und Probe sollen auf einer hochpräzisen Basis aus Granit montiert sein und sich über mindestens fünf CNC-gesteuerte Achsen positionieren lassen, um eine flexible Anpassung an unterschiedliche Probengeometrien zu gewährleisten.

Die Strahlenschutzkabine muss mit einer Innenraumbeleuchtung sowie Kameras zur Beobachtung der Position der Proben ausgestattet sein. Zudem wird eine aktive Belüftung des Messraums sowie eine farbcodierte LED-Statusanzeige gefordert, die mindestens die Zustände „bereit/kein Scan“, „Scan/Strahlung aktiv“ und „Störung/Fehler“ eindeutig signalisiert. Die Bedienung erfolgt über eine Softwareoberfläche sowie ein Bedienelement (z. B. Joystick, Bedienpanel oder Touchpanel) für die manuelle Positionierung.

Zur Unterstützung der Probenpositionierung soll das System über optische Hilfsmittel (z. B. Laserlinien) verfügen, die in der Messposition aktiviert werden können und eine schnelle und reproduzierbare Ausrichtung der Prüfkörper im Messvolumen ermöglichen.

Das Messvolumen des Systems muss Proben mit einer Höhe von mindestens 200 mm und einem Durchmesser von mindestens 300 mm in einem einzelnen Scan erfassen können. Mit geeigneten Messbereichserweiterungen soll eine effektive Scanhöhe von 350 mm und ein effektiver Durchmesser von 400 mm erreichbar sein. Der Messraum muss Proben mit einem Durchmesser von mindestens 400 mm und einer Höhe von mindestens 500 mm aufnehmen können. Dabei ist eine maximal zulässige Probenmasse von mindestens 15 kg erforderlich. Eine variable Quelle-Detektor-Distanz ist vorzusehen, die bis auf mindestens 800 mm vergrößert werden kann, um Auflösung, Feldgröße und Dosisleistung optimieren zu können. Die erreichbare Strukturauflösung im Volumenmodus soll mindestens 3 µm betragen.

## 2.4 Röntgendetektor

Das µCT-System ist mit einem digitalen Flachdetektor auszustatten, der für den Einsatz mit Röntgenspannungen von mindestens 225 kV geeignet ist. Die nutzbare aktive Detektorfläche muss mindestens 400 mm × 400 mm betragen, bei einer Pixelmatrix von mindestens 3.000 × 3.000 Pixeln und einer maximalen Pixelgröße von 140 µm.

Der Detektor muss eine Grauwertauflösung von mindestens 16 Bit bieten und Bildraten von mindestens 6 Bildern pro Sekunde im 1×1-Betrieb sowie 12 Bildern pro Sekunde im 2×2-Binning ermöglichen, um sowohl CT-Aufnahmen als auch einfache 2D-Durchstrahlungsbilder effizient erzeugen zu können.

Der Flachdetektor ist in Verbindung mit den Abmessungen des Messraums sowie der Anordnung von Röntgenquelle, Detektor und Manipulator und den vorgesehenen Scantrajektorien (Standard-CT, Helix-CT und Field-of-View-Erweiterungen) so auszulegen, dass die in Abschnitt 2.3 beschriebenen Anforderungen an das Messvolumen (einzelner Scan sowie erweiterte Field-of-View-Messungen) vollständig erfüllt werden können.

## 2.5 Röntgenquelle

Die Anlage ist mit einer Mikrofokus-Röntgenquelle in Transmissionsbauweise als offenes System oder einer vergleichbaren Lösung mit austauschbaren Verschleißteilen (insbesondere Filament) auszuführen. Die maximale Beschleunigungsspannung muss mindestens 225 kV und die maximale Targetleistung mindestens 80 W betragen. Messungen mit hoher geometrischer Auflösung ( $\leq 20 \mu\text{m}$ ) sollen auch bei erhöhter Leistung möglich sein.

Das Transmissionstarget ist so zu kühlen (beispielsweise durch ein wassergekühltes Target und eine geeignete Kühlung des Röhrenkopfs), dass die Nennleistung dauerhaft genutzt werden kann und thermisch bedingte Fokusdriften minimiert werden. Dadurch werden kurze Scanzeiten und eine hohe Stabilität der Bildqualität gewährleistet. Zudem soll die Quelle über automatische Funktionen wie Aufwärmprogramme, Fokussierung, Zentrierung, Intensitätskontrolle und Röhrenkalibrierung verfügen und einen einfachen Wechsel der Verschleißteile erlauben.

Im Strahlengang der Röntgenquelle ist ein motorisierter, abnehmbarer und softwaregesteuerter Filterwechsler mit mehreren Vorfilterpositionen vorzusehen. Beispielsweise können Aluminium-, Kupfer- und Zinnfilter in unterschiedlichen Kombinationen verwendet werden, sodass für verschiedene Proben und Spannungsbereiche eine geeignete Strahlungsqualität eingestellt und in Scanprofilen gespeichert werden kann.

## 2.6 Workstation und Datenmanagement

Für die Steuerung des Systems, die Rekonstruktion der CT-Daten sowie die grundlegende Visualisierung und Auswertung ist eine leistungsfähige Workstation erforderlich. Sie muss eine vorinstallierte Bedien- und Rekonstruktionssoftware enthalten und über einen Mehrkernprozessor ( $\geq 12$  Kerne), eine leistungsfähige GPU mit mindestens 32 GB Grafikspeicher, 256 GB Arbeitsspeicher sowie schnelle SSD-Speicherlaufwerke verfügen. Damit können typische CT-Datensätze in praxisgerechten Zeiten rekonstruiert und dargestellt werden.

Es ist ein lokaler Datenspeicher vorzusehen, der sowohl das Betriebssystem als auch die CT-Daten auf getrennten SSD-Laufwerken vorhält (mindestens 2 TB SSD für das System und mindestens 8 TB SSD für Messdaten). Die Workstation muss über eine schnelle Netzwerk-Anbindung (z. B. 10 Gbit-Ethernet) verfügen, um eine Integration in die bestehende IT-Infrastruktur der RPTU und die Anbindung an zentrale Speicher- oder Archivsysteme zu ermöglichen.

Zusätzlich zur primären System-Workstation ist eine weitere Rekonstruktions- und Auswertungsworkstation vorzusehen. Diese ermöglicht eine parallele Datenrekonstruktion und -analyse unabhängig vom Messbetrieb und erhöht damit die Effizienz der Gesamtanlage. Die Bereitstellung einer solchen zusätzlichen Workstation wird im Rahmen der Angebotsbewertung positiv berücksichtigt.

Für die Handhabung der bei CT-Messungen entstehenden großen Datenmengen ist ein durchdachtes Datenmanagement erforderlich. Das System soll neben dem lokalen SSD-Speicher eine effiziente Organisation, Sicherung und Archivierung der Messdaten unterstützen. Dazu gehören die strukturierte Ablage von Projekten, der Export in etablierte Datenformate und die einfache Anbindung an zentrale Speicher- und Backup-Infrastrukturen der RPTU. Dies gewährleistet eine langfristig nachvollziehbare, sichere und leistungsfähige Nutzung der erzeugten Datensätze.

## 2.7 Software

Die Anlage ist mit einer integrierten Software zur Anlagen- und Scansteuerung auszuliefern. Diese muss sämtliche Funktionen zur Bedienung des Systems, zur Definition der Scantrajektorien und zur Rekonstruktion der CT-Daten umfassen. Die Steuerungssoftware muss die vollständige Kontrolle aller Achsen und Komponenten des Manipulators erlauben und eine hinreichende Genauigkeit sicherstellen. Damit müssen sich standardisierte 3D-CT-Scans, Helix-CT-Trajektorien sowie Field-of-View-Erweiterungen sicher und reproduzierbar durchführen lassen.

Die Software soll neben der Volumentomografie auch die Aufnahme digitaler Durchstrahlungsbilder (d. h. 2D-Röntgenbilder ohne Rekonstruktion) unterstützen. Sie soll außerdem Werkzeuge zur Live-Bilddarstellung, Grauwertskalierung, Bildfilterung sowie zur Erfassung von Bildsequenzen bereitstellen. Darüber hinaus soll sie ein digitales Maschinenlogbuch, einen automatisierten Systemcheck (Geometrie- und Bildqualitätsprüfung) sowie eine Überwachung des Systemzustands und der Verfügbarkeit der Anlage bieten. Scanberichte mit den wesentlichen Bildgebungs- und Rekonstruktionsparametern sollen automatisch erzeugt werden.

Zur grundlegenden Auswertung und Visualisierung der rekonstruierten Volumendaten ist eine Auswertungssoftware bereitzustellen, die sowohl 2D- als auch 3D-Visualisierung der Volumendaten ermöglicht und Werkzeuge für einfache Schwellenwert-Segmentierung bereitstellt.

Für die Rekonstruktion der CT-Daten wird neben konventionellen Rekonstruktionsalgorithmen eine fortgeschrittene, physikalisch basierte Rekonstruktionssoftware als vorteilhaft angesehen. Diese soll insbesondere zur Reduktion von Strahlenhärte-, Metall- und weiteren Rekonstruktionsartefakten beitragen. Hierzu wird eine Integration der Software *Voxray* in das Gesamtsystem im Rahmen der Angebotsbewertung positiv berücksichtigt.

Die Software muss rekonstruierte 3D-Datensätze in verschiedenen offenen Formaten exportieren können (z. B. TIFF-Stacks, RAW, REK). Darüber hinaus soll die Software die Möglichkeit bieten, bei Bedarf eine Kompatibilität mit standortspezifischen Auswertumgebungen (z. B. bestehenden Fraunhofer-Tools am Standort wie MAVI) herzustellen. Eine entsprechende Unterstützung oder nachträgliche Integration geeigneter Exportformate soll grundsätzlich möglich sein und kann in Abstimmung mit den jeweiligen Softwareanbietern realisiert werden.

## 2.8 Wartung

Für das angebotene  $\mu$ CT-System ist ein regelmäßiges Wartungskonzept vorzusehen, das planmäßige Inspektionen, Kalibrierungen und Funktionsprüfungen der Anlage umfasst. Hierfür soll ein Wartungsvertrag angeboten werden, der nach Ablauf der Gewährleistung jährlich verlängerbar ist und für mindestens die ersten fünf Betriebsjahre gilt.

Die jährlichen Wartungskosten sollten maximal etwa 10.000 € betragen. Preislich günstigere Wartungskonzepte werden bei der Angebotsbewertung positiv berücksichtigt.

Komponenten, die regelmäßig gewartet werden müssen, sind in einem Wartungsplan mit den vorgesehenen Intervallen und den entsprechenden Kosten aufzulisten. Eine schrittweise Übernahme einfacher Wartungsarbeiten durch geschultes Personal der Einrichtung sollte möglich sein. In diesem Fall sind die Vertragskonditionen entsprechend anzupassen bzw. zu reduzieren.

## 2.9 Garantie/Gewährleistung

Der Auftragnehmer ist für die Einhaltung aller in der Ausschreibung geforderten technischen Spezifikationen verantwortlich. Es gilt die gesetzliche Gewährleistungsfrist. Eine darüberhinausgehende Garantiezeit wird als Option gewünscht und bei der Angebotsbewertung positiv berücksichtigt. Im Rahmen dieser Garantieverlängerung sollen sowohl Ersatzteile als auch Arbeitsleistungen abgedeckt sein.

## 3 Anlieferung und Aufstellung

### 3.1 Liefer- und Aufstellort

Das µCT-System ist an der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU), Standort Kaiserslautern, zu liefern, zu montieren und in Betrieb zu nehmen.

Der Aufstellort befindet sich im Gebäude 60, Raum 312, Gottlieb-Daimler-Straße, 67663 Kaiserslautern. Der Raum hat eine Grundfläche von ca. 5,80 m × 13,0 m und eine lichte Raumhöhe von ca. 3,50 m. Der Zugang zum Aufstellraum erfolgt über große Türen mit einer nutzbaren Öffnungsbreite von ca. 2,20 m und einer lichten Höhe von ca. 3,00 m.

Die Anlieferung hat „frei Verwendungsstelle“ bis zum finalen Aufstellungsort im genannten Raum zu erfolgen. Die Transport- und Einbringkosten sind im Angebot zu berücksichtigen.

### 3.2 Aufstellmaße und Bodenlast

Das µCT-System ist so auszulegen, dass es innerhalb des vorgesehenen Aufstellbereichs im Raum 312 aufgebaut werden kann. Das Gesamtgewicht des Systems darf 6.500,00 kg nicht überschreiten.

Die zulässige Bodenlast am Aufstellort beträgt maximal 7,50 kN/m<sup>2</sup>. Der Anbieter hat die auf den Boden wirkenden Lasten (Gesamtgewicht, Anzahl und Größe der Auflageflächen, resultierende Lasten bzw. Flächenpressungen) im Rahmen seines Angebots darzustellen und nachzuweisen, dass die statischen Vorgaben eingehalten werden. Sofern die aus der Maschinenkonstruktion resultierenden Punkt- oder Flächenlasten die zulässige Bodenlast überschreiten würden, hat der Anbieter eine geeignete Lösung zur Lastverteilung (z. B. Lastverteilungsplatten, Trägerrost aus Stahlprofilen o. Ä.) vorzuschlagen und mitzuliefern. Diese Lösung ist unter Berücksichtigung der geometrischen Randbedingungen des Raums 312 (z. B. verfügbare Fläche, Türen, ggf. vorhandene Installationen) zu planen und statisch so zu bemessen, dass die wirksame Aufstellfläche vergrößert wird und die zulässige Bodenlast nicht überschritten wird.

Die konkrete Ausgestaltung und Positionierung der Lastverteilungselemente sowie die endgültige Anordnung des  $\mu$ CT-Systems und der dafür vorgesehenen Workstation sind in Abstimmung mit der RPTU festzulegen und im Rahmen der Projektplanung gemeinsam zu vereinbaren.

### 3.3 Lieferung, Einbringung und Inbetriebnahme

Die Lieferung hat innerhalb von maximal sechs Monaten nach Auftragserteilung zu erfolgen. Der Lieferumfang umfasst die Einbringung des Systems bis zum Aufstellort im Raum 312 des Gebäudes 60 einschließlich aller erforderlichen Hebe- und Transportmittel.

Der Auftragnehmer ist für die Planung und Durchführung der Einbringung verantwortlich und muss bestehende bauliche Randbedingungen (Türöffnungen, Tragfähigkeit der Verkehrswege und des Aufstellraums) berücksichtigen. Die Übergabe der Anlage erfolgt im Rahmen einer gemeinsamen Abnahme vor Ort unter Verwendung eines zuvor zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer abgestimmten Übergabeprotokolls. In diesem werden die wesentlichen Funktions-, Sicherheits- und Qualitätsprüfungen dokumentiert. Im Zuge der Abnahme ist eine vollständige Funktionsprüfung der Anlage durchzuführen. Etwaige notwendige Nachbesserungen sind in Abstimmung mit dem Auftraggeber zeitnah und ohne zusätzliche Kosten vorzunehmen.

Ein Bestandteil der Lieferung ist eine vollständige technische Dokumentation in deutscher und englischer Sprache. Hierzu gehören insbesondere eine Bedienungsanleitung in digitaler und gedruckter Form, sicherheitsrelevante Unterlagen, Schalt- und Stromlaufpläne der Anlage, Datenblätter der wesentlichen Komponenten sowie eine Beschreibung der verfügbaren mechanischen, elektrischen und softwareseitigen Schnittstellen. Darüber hinaus sind die für den Betrieb relevanten Datenübertragungsprotokolle zu dokumentieren und die zugehörigen Handbücher zur System- und Rekonstruktionssoftware bereitzustellen.

### 3.4 Energie- und Medienzuführung

Der Auftragnehmer hat sicherzustellen, dass das  $\mu$ CT-System an alle für den Betrieb erforderlichen Energie- und Medienversorgungen der RPTU angeschlossen werden kann. Hierzu zählen insbesondere der elektrische Anschluss am vorgesehenen Standort, der Anschluss an das Datennetz (LAN) sowie, sofern erforderlich, der Anschluss an einen vorhandenen Kühlwasserkreislauf.

Die Aufstellung, der fachgerechte Anschluss und die Inbetriebnahme der Anlage müssen durch qualifiziertes Fachpersonal des Herstellers oder durch von diesem autorisierte Servicepartner erfolgen. Sämtliche hierfür notwendigen Materialien, Verbindungselemente und Anpassungsarbeiten sind im Leistungsumfang des Angebots zu berücksichtigen.

### 3.5 Schulung

Der Auftragnehmer verpflichtet sich, nach der Inbetriebnahme eine umfassende Schulung für das wissenschaftliche und technische Personal der RPTU an der gelieferten Anlage durchzuführen. Die Schulung soll in deutscher Sprache erfolgen und sowohl theoretische als auch praktische Inhalte umfassen. Sie beinhaltet mindestens die Einweisung in die Bedienung der Anlage, die Nutzung der Steuerungs- und Rekonstruktionssoftware, die Prozessführung bei typischen Messabläufen, die relevanten Sicherheitsfunktionen sowie die Durchführung und Dokumentation einfacher Wartungs- und Pflegearbeiten. Ziel ist es, das Bedienpersonal in die Lage zu versetzen, das  $\mu$ CT-System

selbstständig, sicher und reproduzierbar zu betreiben und die vorgesehenen Forschungsarbeiten eigenständig durchzuführen.