

Leistungsbeschreibung

für ein Rasterkraftmikroskop (AFM)

1 Ausgangslage und Zielsetzung

Die Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) und der Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik beabsichtigen im Rahmen eines offenen Vergabeverfahrens die Beschaffung eines fabrikneuen, modular erweiterbaren Rasterkraftmikroskops (Atomic Force Microscope, AFM).

Das System soll für hochauflösende Oberflächencharakterisierung sowie für quantitative Untersuchungen der mechanischen, adhäsiven, tribologischen und elektrischen Eigenschaften von Partikeln, Fasern, Membranen, beschichteten Oberflächen und biologischen Proben eingesetzt werden. Von besonderer Bedeutung sind Kraftspektroskopie, lokale Nanomechanik, Adhäsions- und Reibungsmessungen sowie Untersuchungen einzelner Zellen und Partikel in Flüssigkeiten.

Die Messdaten sollen unter anderem zur Parametrisierung und Validierung physikalischer Kontakt-, Adhäsions- und Deformationsmodelle sowie zur Modellierung partikulärer Systeme verwendet werden.

2 Anforderungen und Spezifikationen

2.1 Allgemeine Anforderungen

Verbindliche Lieferzeit: Der Bieter hat eine verbindliche Lieferzeit ab Auftragserteilung anzugeben. Die maximale Lieferzeit beträgt 6 Monate; kürzere Lieferzeiten werden im Rahmen der Angebotsbewertung positiv berücksichtigt.

Lieferung und Inbetriebnahme: Lieferung frei Verwendungsstelle DAP bzw. für Bieter außerhalb Deutschlands DDP gem. Incoterms 2010 einschließlich Aufstellung, Installation, vollständiger Inbetriebnahme und Funktionsprüfung.

Technischer Support: Technischer und administrativer Support in deutscher und/oder englischer Sprache.

Dokumentation: Umfassende technische Dokumentation in deutscher und/oder englischer Sprache, insbesondere Bedienungsanleitungen, Wartungspläne einschließlich Kostenübersicht, technische Datenblätter sowie Hard- und Softwareschnittstellen.

CE / Konformität: Das angebotene Gesamtsystem muss den einschlägigen gesetzlichen und sicherheitstechnischen Anforderungen entsprechen und mit den erforderlichen Konformitätsunterlagen geliefert werden.

Gewährleistung: Es wird mindestens eine Gewährleistung von 12 Monaten verlangt. Eine darüberhinausgehende Garantie wird bewertet.

2.2 Angebotspreis

Das Angebot hat einen verbindlichen Gesamtpreis einschließlich sämtlicher für die vertragsgemäße Nutzung erforderlicher Komponenten, Software, Zubehörteile, Lieferung, Installation, Inbetriebnahme und Schulung zu enthalten. Optionale Leistungen sind separat auszuweisen. Maßgeblich ist das für die Beschaffung zur Verfügung stehende Budget in Höhe von 550.000 Euro inkl. MwSt.

2.3 Technische Mindestanforderungen (Ausschlusskriterien)

Die folgenden Anforderungen sind als Mindestanforderungen zu verstehen. Nicht erfüllte Anforderungen führen – vorbehaltlich der vergaberechtlichen Prüfung durch die zuständige Vergabestelle – zum Ausschluss des Angebots. Der Bieter hat die Erfüllung durch eindeutige technische Angaben und geeignete Nachweise zu belegen.

AFM-Grundsystem: Fabrikneues Rasterkraftmikroskop für hochauflösende Messungen in Luft und Flüssigkeiten, geeignet für harte, weiche und biologische Proben.

Tip-Scanning-Architektur: AFM-Messsystem mit Tip-Scanning-Architektur, bei der die Rasterbewegung und die Messung des Cantilevers in einer hierfür ausgelegten Scan-Head-Konfiguration integriert sind.

Zwei physikalisch unterschiedliche Cantilever-Anregungsverfahren: Das System muss sowohl eine optisch/photothermisch induzierte als auch eine piezoakustische Cantilever-Anregung ermöglichen. Beide Anregungsverfahren müssen innerhalb desselben AFM-Messsystems nutzbar sein. Damit soll eine große Flexibilität in den Anwendungen des AFMs ermöglicht werden, weil beide Anregungsarten für unterschiedliche Messaufgaben und unterschiedliche experimentelle Randbedingungen optimiert sind. Darüber hinaus soll durch die Verfügbarkeit beider Anregungsarten ein direkter Vergleich der Messergebnisse ermöglicht werden. Dies ist erforderlich, um anregungsbedingte instrumentelle Effekte und Artefakte von tatsächlich durch die Probe verursachten Effekten unterscheiden und die entwickelten quantitativen Messverfahren experimentell validieren zu können. **Photothermische Cantilever-Anregung:** Photothermische Anregung des Cantilevers muss für stabile Resonanzanregung und Frequenzbestimmung sowohl in Luft als auch in Flüssigkeiten zur Verfügung stehen.

Langzeitstabile resonanzbasierte Messung: Das System muss eine resonanzbasierte Messung von Cantilever-abhängigen Frequenzänderungen ermöglichen und eine reproduzierbare Frequenzbestimmung mit hoher Langzeitstabilität erlauben.

Stabile Anregung in Flüssigkeiten: Die Anregung muss eine stabile Cantilever-Schwingung in Flüssigkeiten ermöglichen und störende Anregungseffekte durch Flüssigkeitsströmungen bzw. unerwünschte Resonanzanregungen minimieren.

Photothermische Off-Resonance-Tapping: Das System muss einen Tapping-/Intermittent-Contact-Modus ermöglichen, bei dem die Cantileverschwingung gezielt außerhalb der Eigenresonanz betrieben werden kann (Off-Resonance Tapping). Dieser Modus muss für schnelle Bildgebung und quantitative nanomechanische Messungen nutzbar sein.

Hohe Off-Resonance-Frequenz: Im Off-Resonance-Tapping-Modus muss zur Beschleunigung von Kraftspektroskopie und quantitativer nanomechanischer Kartierung eine Anregungs-/Messfrequenz von mindestens 80 kHz verfügbar sein. Der Bieter hat den maximal erreichbaren Wert sowie die zugehörigen Messbedingungen anzugeben.

Gleichzeitige Nanomechanik: Im Off-Resonance-Tapping-Modus muss die gleichzeitige Erfassung topographischer und quantitativer nanomechanischer Informationen möglich sein.

Closed-Loop-Positionierung: Geschlossene Positionsregelung für die relevanten Bewegungsachsen zur Gewährleistung hoher Positionsgenauigkeit und Reproduzierbarkeit.

Scanbereich: AFM-Scanbereich mindestens $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ in X/Y und mindestens $15\ \mu\text{m}$ in Z.

Erweiterter Kraft-/Verfahrweg: Kraftspektroskopie mit einem Z-Verfahrweg von mindestens $150\ \mu\text{m}$; die Lösung muss ohne Austausch des eigentlichen AFM-Messkopfes nutzbar sein.

Lateralpositionierung: Motorisierte bzw. reproduzierbare laterale Positionierung mit einem Bereich von mindestens $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ im Probenbereich; automatisierte Messungen und Mapping größerer Probenareale müssen möglich sein.

Volle Motorisierung und Automatisierung: Das System muss motorisierte und softwaregesteuerte Funktionen für Probenpositionierung, Annäherung/Approach, relevante Justage- und Ausrichtvorgänge sowie reproduzierbare Messabläufe bereitstellen.

Kraftmessung: Quantitative Kraft-Weg-Messungen im Pikonewton- bis Nanonewtonbereich mit geeigneten Cantilevern und nachvollziehbaren Kalibrierverfahren.

PicoBalance / massenbasierte Messung: Das System muss die Bestimmung der Masse mikrometergroßer Objekte auf Basis der Cantilever-Frequenzänderung ermöglichen. Die Auswertung muss als integrierte bzw. unmittelbar mit dem AFM nutzbare Funktion zur Verfügung stehen. Diese Messungen sollen beispielsweise die Massenzunahme beim Wachstum von Kristallen oder biologischen Zellen erfassen.

Nanomechanik: Möglichkeit zur quantitativen Bestimmung lokaler mechanischer Eigenschaften, insbesondere Adhäsion, Steifigkeit/Elastizität und Deformation.

Kraftmodulation: Kraft-Weg-Messungen mit überlagerter Schwingung zur Untersuchung dynamischer bzw. viskoelastischer Eigenschaften.

Messmodi: Mindestens Kontaktmodus, dynamischer Modus/Tapping bzw. funktional gleichwertiger Modus, Kraftspektroskopie sowie ein quantitativer bzw. kraftbasierter Imaging-Modus.

Elektrische Charakterisierung: Möglichkeit zur Kelvin-Probe-/Oberflächenpotentialmessung und zur leitfähigen AFM-Messung.

Flüssigkeitsbetrieb: Geeignet für stabile Messungen in Flüssigkeiten einschließlich biologisch relevanter Medien; geeignete Flüssigkeitszellen bzw. Flüssigkeitsaufnahmen müssen Bestandteil des Systems sein.

FluidFM-Funktionalität: Integration einer Fluid-Force-Microscopy bzw. funktional gleichwertigen mikrofluidischen AFM-Technologie zur gezielten Fixierung, Manipulation und Kraftmessung an Einzelzellen und Partikeln.

Optische Kopplung und zwei Aufbauvarianten: Das AFM muss sowohl als eigenständiges Tischgerät (Table-Top-Aufbau) als auch in Verbindung mit einem inversen optischen Mikroskop betrieben werden können. Beide Betriebsvarianten müssen mit demselben grundlegenden AFM-Messsystem realisierbar sein. Damit soll eine größtmögliche Flexibilität bezüglich einer zukünftigen Erweiterung des Messsystems um eigene Komponenten bereitgestellt werden.

Fluoreszenzbeobachtung: Ein inverses optisches Mikroskop muss für die gleichzeitige optische Beobachtung des Messbereichs einschließlich Fluoreszenzbeobachtung enthalten sein.

Live-Cell-Inkubation: Für Langzeitmessungen an lebenden Zellen muss ein integriertes bzw. vollständig in das System integrierbares Inkubationskonzept vorhanden sein, das die Kontrolle der für Zellkulturmessungen relevanten Umgebungsbedingungen ermöglicht, insbesondere Temperatur sowie – soweit erforderlich – CO₂ und Luftfeuchte.

Langzeit-Zellmessungen: Das Inkubationskonzept muss Messungen an lebenden Zellen über Zeiträume deutlich über typische Kurzzeitmessungen von etwa 2 Stunden hinaus ermöglichen, ohne dass während der Messung ein grundlegender Umbau des AFM-Messsystems erforderlich ist. Diese Messungen sollen im Rahmen der Untersuchungen von biologischen Zellen (z.B. Sphäroide) eingesetzt werden.

Temperaturregelung: Temperaturkontrollierte Messungen mit einem Bereich von mindestens Umgebungstemperatur bis +250 °C sowie geeigneten Komponenten für Messungen unterhalb der Umgebungstemperatur.

Software: Integrierte Software zur Steuerung, Datenerfassung und Auswertung einschließlich Speicherung von Kraftkurven und Bilddaten sowie automatisierter Messabläufe.

Schnittstellen: Schnittstellen für externe Hardware, Sensoren und programmierbare bzw. skriptbasierte Steuerung.

Datenformate: Messdaten müssen in einem für wissenschaftliche Weiterverarbeitung geeigneten Format exportierbar sein.

Schwingungs- und Schallschutz: Geeignete Maßnahmen zur Schwingungs- und Schallisolierung des AFM-Systems sind Bestandteil des Angebots.

2.4 Zu bewertende Zusatzleistungen und quantitative Kennwerte

Die folgenden Kriterien bleiben als Bewertungskriterien bestehen, sofern die Mindestanforderungen erfüllt sind. Der Bieter hat konkrete Kennwerte, Einheiten und – so weit relevant – Messbedingungen anzugeben.

Erweiterter Temperaturbereich: insbesondere $< 0^{\circ}\text{C}$ und $> +250^{\circ}\text{C}$.

Messrauschen und Kraftauflösung: Der Bieter gibt das intrinsische Rauschen des Kraft- bzw. Deflexionssignals sowie die daraus resultierende minimale nachweisbare Kraft an, z. B. in $\text{N}/\sqrt{\text{Hz}}$ bzw. N unter Angabe von Messbandbreite, Cantilever und Messbedingungen.

Thermische Drift: Der Bieter gibt die thermisch bedingte Drift der Messposition über mindestens 1 h in nm/min unter Angabe der Messbedingungen und Temperaturstabilisierung an.

Maximal messbare Kraft: Der Bieter gibt den maximal tatsächlich nutzbaren Kraftbereich des Gesamtsystems bei Verwendung geeigneter Cantilever an. Statische/quasi-statische und dynamische Kraftmessungen sind getrennt anzugeben; Cantilever, Kraftsensor und Messbedingungen sind zu nennen.

Kraftspektroskopie: Der Bieter gibt maximale Kraftkurvenrate [Hz], maximale Z-Rampengeschwindigkeit [$\mu\text{m}/\text{s}$], Datenpunkte pro Kraftkurve [points/curve] und maximale Kraftkurven-Mappingrate [curves/s] an. Angaben sind für Luft und Flüssigkeit getrennt und mit Cantilever, Rampenamplitude und Signalbandbreite zu dokumentieren.

Hochgeschwindigkeits-Kraftspektroskopie (Off-Resonance): Der Bieter gibt maximale Kraftkurvenrate [kHz], Datenpunkte pro Kraftkurve [points/curve] und maximale Kraftkurven-Mappingrate [curves/s] an. Angaben sind für Luft und Flüssigkeit getrennt und mit Cantilever, Rampenamplitude und Signalbandbreite zu dokumentieren.

Hochgeschwindigkeits-Bildgebung: Der Bieter gibt maximale Scan-Line-Rate [Hz] sowie maximale Bildrate [frames/s] bei 256×256 Pixeln an; Luft und Flüssigkeit sind getrennt anzugeben.

Datenaufnahme: Der Bieter gibt die maximale kontinuierliche Datenrate tatsächlich aufgezeichneter Messdaten [points/s], die Anzahl gleichzeitig aufzeichnungsfähiger Kanäle, Auflösung und Abtastrate an.

Erweiterte Off-Resonance-Tapping-Frequenz: Über die Mindestanforderung von 80 kHz hinausgehende nutzbare Frequenzen im Off-Resonance-Tapping-Modus werden positiv bewertet.

Erweiterte quantitative Nanomechanik: Erweiterte quantitative Imaging- und Nanomechanik-Funktionen sowie zusätzliche Auswertemodelle über den Mindestumfang hinaus werden positiv bewertet.

Automatisierung: Erweiterte automatisierte Flächenmessungen, Tiling/Mapping und reproduzierbare Messworkflows werden positiv bewertet.

Multimodalität: Zusätzliche elektrische, mechanische oder optische Messmodi über KPFM und C-AFM hinaus werden positiv bewertet.

Offene Schnittstellen: Offene Hardware-/Softwarearchitektur, dokumentierte API/Scripting-Schnittstellen und externe Steuerbarkeit werden positiv bewertet.

Garantie: Eine über die gesetzliche Gewährleistung hinausgehende Garantie wird positiv bewertet.

Ersatzteilverfügbarkeit: Eine langfristig garantierte Verfügbarkeit von Ersatzteilen und Zubehör wird positiv bewertet.

Wartung: Wartungsarme Konstruktion und transparente, niedrige Wartungskosten werden positiv bewertet.

Für alle Angaben zur Hochgeschwindigkeitsmessung sind Messmedium, Cantilever-Typ, Z-Rampenamplitude, Z-Rampengeschwindigkeit, Anzahl der Datenpunkte pro Kraftkurve, Signalbandbreite und gegebenenfalls verwendete Filter anzugeben. Die Leistungsdaten müssen sich auf tatsächlich aufgezeichnete Messdaten beziehen und dürfen nicht ausschließlich auf interne Regel-, Trigger- oder Samplingraten des Controllers beruhen.

2.5 Wartung

Ein verpflichtender Wartungsvertrag ist zunächst nicht vorgesehen. Der Bieter hat regelmäßig durchzuführende Wartungsarbeiten, Intervalle und voraussichtlich anfallende Kosten transparent darzustellen.

2.6 Lieferung, Aufstellung, Inbetriebnahme und Abnahme

Der Auftragnehmer übernimmt Anlieferung, Aufstellung, fachgerechte Installation, Inbetriebnahme, erforderliche Kalibrierungen und Funktionsprüfung. Im Rahmen der Abnahme ist anhand eines abgestimmten Übergabe- und Prüfprotokolls nachzuweisen, dass die geforderten Mindestanforderungen erfüllt sind.

Die Abnahme hat insbesondere den Nachweis der zwei Cantilever-Anregungsarten, des Off-Resonance-Tapping-Modus, der motorisierten/automatisierten Systemfunktion, der beiden Aufbauvarianten (Table-Top und inverses Mikroskop), der Live-Cell-Inkubationsfunktion und der massenbasierten Cantilever-Messfunktion zu umfassen.

2.7 Schulung

Nach Installation und Inbetriebnahme ist eine umfassende praktische und theoretische Schulung des wissenschaftlichen und technischen Personals der RPTU durchzuführen. Die Schulung umfasst insbesondere Bedienung, Messmodi, Kalibrierung, Kraftspektroskopie, quantitative Nanomechanik, Flüssigkeits- und Zellmessungen, Automatisierung, Auswertung, Datensicherung und grundlegende Wartungsarbeiten.

3 Verwendungsort

Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU)
Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik
Gottlieb-Daimler-Straße, 67663 Kaiserslautern
Gebäude 74, Sockelgeschoss, Raum 152.3

Der vorgesehene Standort (siehe Abbildung 1) befindet sich in einem Forschungsgebäude. Der Gerätestandort liegt auf dem Gebäudefundament; der Messraum ist klimatisiert. Die erforderlichen Aufstell-, Energie-, Medien- und Umgebungsbedingungen sind vom Bieter im Angebot anzugeben.

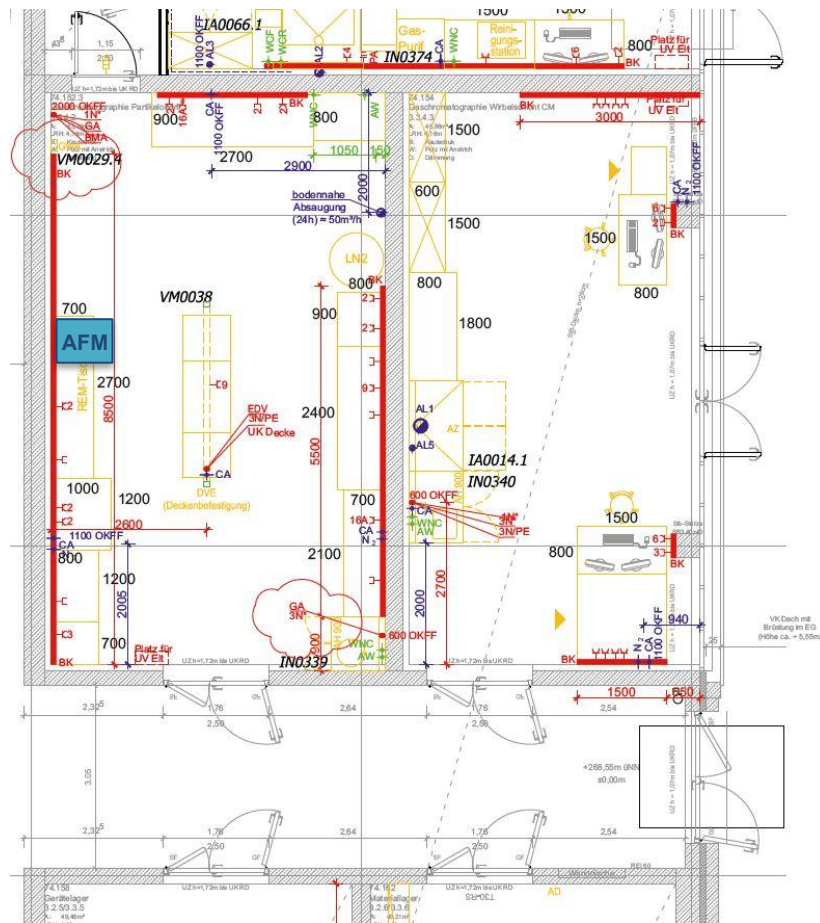


Abbildung 1: Aufstellungsort des AFM im Gebäude 74, Sockelgeschoss, Raum 152.3

4 Vom Bieter einzureichende technische Unterlagen

- vollständige technische Beschreibung einschließlich Hersteller, Typenbezeichnung und Konfiguration;
- ausgefüllte Bewertungsmatrix mit eindeutiger Zuordnung zu den geforderten Leistungsmerkmalen;
- Datenblätter und technische Nachweise für alle wesentlichen Komponenten;
- für quantitative Kennwerte konkrete Zahlenwerte, Einheiten und Messbedingungen;
- Dokumentation der beiden unterschiedlichen Cantilever-Anregungsverfahren und ihrer Verfügbarkeit innerhalb desselben AFM-Systems;
- Dokumentation des Off-Resonance-Tapping-Modus einschließlich maximaler Frequenz;
- Beschreibung des Konzepts für den Betrieb als eigenständiges Tischgerät und in Verbindung mit einem inversen optischen Mikroskop;
- Beschreibung des Inkubationskonzepts einschließlich kontrollierbarer Umgebungsparameter und Eignung für Langzeitmessungen an lebenden Zellen;
- Beschreibung der massenbasierten Cantilever-Messfunktion;
- Beschreibung der Software einschließlich Lizenzmodell, Schnittstellen und Datenexport;
- Angaben zu Lieferzeit, Installation, Inbetriebnahme und Schulung;
- Garantie-/Gewährleistungsbedingungen;
- Wartungsplan mit Intervallen und voraussichtlichen Kosten;
- Angaben zur Verfügbarkeit von Ersatzteilen und Zubehör;
- Angaben zu erforderlichen Energie-, Medien-, Raum- und Umgebungsbedingungen;
- Aufstellplan bzw. Angaben zu Abmessungen, Gewicht und erforderlicher Schwingungsisolierung.

5 Herstellerneutralität und Gleichwertigkeit

Die Anforderungen wurden auf Grundlage, der für die vorgesehenen Forschungsarbeiten notwendigen Funktionen formuliert. Begriffe wie photothermische Anregung, piezoakustische Anregung, Off-Resonance Tapping, integrierte Inkubation und massenbasierte Cantilever-Messung beschreiben physikalische bzw. funktionale Eigenschaften und sind nicht als Bezug auf einen bestimmten Hersteller oder ein bestimmtes Produkt zu verstehen. Soweit ein Bieter eine technisch anders realisierte Lösung anbietet, ist diese zulässig, sofern die gleiche wissenschaftliche Funktionalität und die geforderten Leistungsmerkmale nachweislich erreicht werden.