

**Modulbezeichnung:** Mikro-, Nano- und rechnergestützte Messtechnik (MNMT u. 5 ECTS  
RMT)

(Micro, Nano and Computer-Aided Metrology)

Modulverantwortliche/r: Tino Hausotte

Lehrende: Tino Hausotte

Startsemester: SS 2015

Dauer: 1 Semester

Turnus: jährlich (SS)

Präsenzzeit: 60 Std.

Eigenstudium: 90 Std.

Sprache: Deutsch

**Lehrveranstaltungen:**

Mikro- und Nanomesstechnik (SS 2015, Vorlesung mit Übung, 2 SWS, Tino Hausotte)

Rechnergestützte Messtechnik (SS 2015, Vorlesung, 2 SWS, Tino Hausotte)

**Empfohlene Voraussetzungen:**

- Der Besuch der Grundlagen-Vorlesungen *Grundlagen der Messtechnik* (GMT) wird empfohlen.

**Inhalt:**

**Mikro- und Nanomesstechnik [MNMT]**

- **Einführung:** Nanotechnologie grundlegende Strategien - Aufgaben der Mikro- und Nanomesstechnik - Herausforderungen - Koordinatensystem, Oberflächen- und Koordinatenmessungen - Allgemeiner Aufbau eines Mikro- und Nanokoordinatenmessgerätes
- **Positioniersysteme:** Führungen: Aufgaben, Arten (Gleitführungen, aerostatischen und hydrostatische Führungen, Wälzführungen, Federgelenkführungen), mehrachsige Führungssysteme (Seriellkinematik und Parallelkinematik) - elektromagnetische Antriebe: Lorentzkraft, Reluktanzkraft, Transmissionen bzw. Übertragungselemente (kraft- und formgepaart, Zahn- und Reibstangen, Gewinde- und Kugelumlaufspindeln), Direktantriebe (Tachspulantriebe, kommutierte Antriebe, Reluktanzkraftantriebe) - piezoelektrische Antriebe: Piezoeffekt, Arten von Aktoren (Stapel-, Rohr-, Biege- und Scheraktoren), Hubaddition (Prinzipien der Trägheits- und Schreitantriebe) - Gewichtskraftkompensation (Notwendigkeit, Anforderungen, Beispiel mit mechanischen Federn und Getrieben)
- **Längenmesssysteme:** abbesches Komparatorprinzip, Abweichungen 1.- und 2.-Ordnung - Längenmessung mit Linearencodern, Abtastplatte (Gitter), Ermittlung der Bewegungsrichtung, Ausgangssignale und Demodulation, abbildende und interferentielle Ablesung, Durchlicht und Reflexion - Überlagerung von Wellen: destruktive und konstruktive Interferenz, Voraussetzung der Interferenz von Lichtwellen, Interferenz von Lichtwellen - Homodyn- und Heterodynprinzip, Interferenz am Michelson-Interferometer und Homodynterferometer, Demodulation, Luftbrechzahl, Totstreckenkorrektur, Demodulationsabweichungen durch Quantisierung, Rauschen, Offset-, Amplituden- und Phasenabweichungen - kapazitive Längenmessung
- **Metrologischer Rahmen:** metrologischer Rahmen und Strukturrahmen (Anforderungen, Kriterien für Materialauswahl, Ausdehnungskompensation) - Werkstoffe für Metrologierahmen: Metalle (Stahl, Invar), Naturstein, Polymerbeton und Keramiken (NEXCERA®), Glas (ULE) und Glaskeramiken (Zerodur®, Clearceram®-Z und Astrosital®) - mechanische Spannungen und Kriechen - Gerätekoordinatensystem (bei Geräten mit serieller Metrologie und Parallelmetrology)
- **Optische Antastung im Fernfeld:** allgemeine Einteilung von Antastverfahren, Antastwechselwirkung und Einflussgrößen - Messmikroskope, numerische Apertur, Auflösungsvermögen - Fokusvariation - Konfokale Mikroskopie, Laser-Rastermikroskop (Prinzip), chromatischer Weißlichtsensor (Prinzip) - Laser-Autofokusverfahren (Prinzip mit astigmatischer Linse und Foucault'sches Schneidenprinzip) - Interferenzmikroskopie (Michelson-, Mireau- und Linnikinterferometer, Auswertung für monochromatisches Licht) - Weißlichtinterferenzmikroskopie (Korrelogramm, Prinzip, Einhüllenden- und Phasenauswertung) - Eigenschaften optische Antastung im Fernfeld
- **Elektrische Antastung (Tunnelstrom):** Entwicklung der Tunnelstrommessung und Beschreibung des Stromsignals - 3-D-Antastung mit Tunnelstrom - 3-D-Richtungserkennung
- **Rasterkraftmikroskope:** prinzipielle Funktionsweise - Betriebsarten - Wechselwirkungen und Arbeitsweisen - Contact mode AFM - Tapping Mode AFM - LiftModes (MFM, EFM) - Torsional Resonance und Critical Dimension Atomic Force Microscopy - Methoden zur Messung der Cantilever-

Auslenkung (Lichtzeigerprinzip, Faserinterferometer, Fokussensor, Interferometer, piezoresistiv)

- **Optische Antastung im Nahfeld und Elektronenmikroskope:** Nahfeld - Nahfeldsonden - Rasternahfeldmikroskope - Elektronenmikroskope
- **Taktile Antastung:** taktile Tastsysteme (Überblick und Anforderungen) - passive und aktive Tastsysteme (Prinzipien, Aufbau und Eigenschaften) - 1-D-Tastsysteme (Richtcharakteristik, Querempfindlichkeit) - Betragstastsysteme (Prinzip, Eigenschaften, Beispiel UMAP) - 2-D-Tastsysteme (Beispiel Fasertaster WFP) - 3-D-Tastsysteme (Anforderungen, Auswirkung Tastelementverkleinerung, Beispiel IBS-NPL Probe System)
- **Mikro- und Nanokoordinatenmessgeräte:** 3-D-Realisierung des Abbe-Komparatorprinzips - 3-D-Messbefehle (Arbeitsweisen bei Punktmessungen, Open-loop scans, Closed-loop scans, Dodge scans und Free-form scans)

### Rechnergestützte Messtechnik [RMT]

- **Grundlagen:** Grundbegriffe (Messgröße, Messsignal, Informationsparameter, analoges und digitales Signal) - Prinzip eines Messgerätes, direkte und indirekte Messung - Klassifizierung von Signalen (Informationsparameter) - Fourierreihen und Fouriertransformation - Fourieranalyse - DFT und FFT (praktische Realisierung) - Aliasing und Shannon's-Abtasttheorem - Übertragungsverhalten (Antwortfunktionen, Frequenzgang, Übertragungsfunktion) - Laplace-Transformation, Z-Transformation und Wavelet-Transformation - Digitalisierungskette
- **Verarbeitung und Übertragung analoger Signale:** Operationsverstärker (idealer und realer, Rückkopplung) - Kenngrößen von Operationsverstärkern - Frequenzabhängige Verstärkung von Operationsverstärkern - Operationsverstärkertypen - Rückkopplung und Grundsaltungen - OPV mit differentiellen Ausgang - analoge Filter (Bode-Diagramm, Tiefpassfilter, Hochpassfilter, Bandpassfilter, Bandsperfilter) - Messsignalübertragung (Einheitssignale) - Spannungs-Frequenz-Wandler - Galvanische Trennung und optische Übertragung - Modulatoren und Demodulatoren - Multiplexer und Demultiplexer - Abtast-Halte-Glied
- **A/D- und D/A-Umsetzer:** digitale und analoge Signale - Digitalisierungskette - A/D-Umsetzer (Nachlauf ADU, Wägeverfahren, Rampen-A/D-Umsetzer, Dual Slope-Verfahren, Charge-Balancing-A/D-Umsetzverfahren, Parallel-A/D-Umsetzer, Kaskaden-A/D-Umsetzverfahren, Pipeline-A/D-Umsetzer, Delta-Sigma-A/D-Umsetzer / 1-Bit- bis N-Bit-Umsetzer, Einsatzbereiche, Kennwerte, Abweichungen, Signal-Rausch-Verhältnis) - Digital-Analog-Umsetzungskette - D/A-Umsetzer (Direkt bzw. Parallelumsetzer, Wägeumsetzer, Zählverfahren, Delta-Sigma-Umsetzer / 1-Bit- bis N-Bit-Umsetzer)
- **Verarbeitung digitaler Signale:** digitale Codes - Schaltnetze (Kombinatorische Schaltungslogik) - Schaltalgebra und logische Grundverknüpfungen - Schaltwerke (Sequentielle Schaltnetze) - Speicherglieder (Flip-Flops, Sequentielle Grundsaltungen), Halbleiterspeicher - anwendungsspezifische integrierte Schaltungen (ASICs) - programmierbare logische Schaltung (PLDs) - Rechnerarten
- **Bussysteme:** Bussysteme (Master, Slave, Arbiter, Routing, Repeater) - Arbitrierung - Topologien (physikalische und logische Topologie, Kennwerte, Punkt-zu-Punkt-Topologie, vermaschtes Netz, Stern-Topologie, Ring-Topologie, Bus-Topologie, Baum-Topologie, Zell-Topologie) - Übertragungsmedien (Mehrdrahtleitung, Koaxialkabel, Lichtwellenleiter) - ISO-OSI-Referenzmodell - Physikalische Schnittstellenstandards (RS-232C, RS-422, RS-485) - Feldbussysteme, GPIB (IEC-625-Bus), Messgerätebusse
- **USB Universal Serial Bus:** Struktur des Busses - Verbindung der Geräte, Transceiver, Geschwindigkeitserkennung, Signalkodierung - Übertragungsarten (Control-Transfer, Bulk-Transfer, Isochrone-Transfer, Interrupt-Transfer, Datenübertragung mit Paketen) - Frames und Mikroframes, Geschwindigkeiten, Geschwindigkeitsumsetzung mit Hub - Deskriptoren und Software - Layer Entwicklungstools - Compliance Test - USB 3.0
- **Digitale Filter:** analoge Filter - Eigenschaften und Charakterisierung von digitalen Filtern - Implementierung von digitalen Filtern - digitale Filter (IIR-Filter und FIR-Filter) und Formen - Messwert-Dezimierer, Digitaler Mittelwertfilter, Gaußfilter - Fensterfunktion - Realisierung mit Matlab
- **Messdatenauswertung:** zufällige und systematische Messabweichungen, Kalibrierung - Kennlinienabweichungen und Methoden zu deren Ermittlung - Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse - Kennlinienkorrektur - Approximation, Interpolation, Extrapolation - Arten der Kennlinienkorrektur - Messunsicherheit und deren Bestimmung - Vorgehensweise zur Ermittlung der Unsicherheit
- **Schaltungs- und Leiterplattenentwurf:** Leiterplatten - Leiterplattenmaterial - Leiterplattenarten -

Durchkontaktierungen - Leiterplattenentwurf und -entflechtung - Software - Leiterplattenherstellung

## Lernziele und Kompetenzen:

### Fachkompetenz

#### Wissen

- Die Studierenden können einen Überblick zur Gerätetechnik der Mikro- und Nanomesstechnik sowie deren Funktionsweise und Einsatzgebiete wiedergeben.
- Die Studierenden können Wissen zur rechnergestützten Messdatenerfassung, -auswertung, -analyse und -visualisierung als Grundlage für zielorientierte, effiziente Entwicklung und für kontinuierliche Produkt- und Prozessverbesserung abrufen

#### Verstehen

- Die Studierenden können Konzepte zur Sensorintegration und Datenfusion beschreiben

#### Evaluiieren (Beurteilen)

- Die Studierenden können Messverfahren zur Erfassung dimensioneller Größen an Mikro- und Nanostrukturen auswählen und bewerten.
- Die Studierenden können rechnergestützte Werkzeuge für die Messdatenerfassung, -auswertung, -analyse und -visualisierung auswählen und bewerten.

## Literatur:

- Bhushan, B. (Ed.): Springer Handbook of Nanotechnology, Springer Verlag, ISBN-13: 978-3642025242
- Hausotte, T.: Nanopositionier- und Nanomessmaschinen, Pro BUSI-NESS, 2011, ISBN-13: 978-3-86805-948-9
- Lerch, R.: Elektrische Messtechnik. Analoge, digitale und computer-gestützte Verfahren. Berlin, Heidelberg: Springer, 4. Auflage, 2007
- Hoffmann, J.: Handbuch der Messtechnik. München: Hanser, 2012

---

## Verwendbarkeit des Moduls / Einpassung in den Musterstudienplan:

Das Modul ist im Kontext der folgenden Studienfächer/Vertiefungsrichtungen verwendbar:

### [1] Mechatronik (Master of Science): 1-3. Semester

(Po-Vers. 2012 | M3 Technische Wahlmodule)

Dieses Modul ist daneben auch in den Studienfächern "Berufspädagogik Technik (Master of Education)", "Energietechnik (Master of Science)", "Maschinenbau (Bachelor of Science)", "Maschinenbau (Master of Science)", "Mechatronik (Bachelor of Science)", "Medizintechnik (Master of Science)", "Wirtschaftsingenieurwesen (Master of Science)" verwendbar.

---

## Studien-/Prüfungsleistungen:

Mikro-, nano- und rechnergestützte Messtechnik (Prüfungsnummer: 73151)

(englische Bezeichnung: Micro, Nano and Computer-Aided Metrology)

Prüfungsleistung, Klausur, Dauer (in Minuten): 120

Anteil an der Berechnung der Modulnote: 100%

weitere Erläuterungen:

**Prüfungstermine**, eine **allgemeine Regel der Prüfungstagvergabe** und **Termine der Klausureinsicht** finden Sie auf StudOn: Prüfungstermine und Termine der Klausureinsicht

Erstablingung: SS 2015, 1. Wdh.: WS 2015/2016

1. Prüfer: Tino Hausotte

Mikro- und Nanomesstechnik (Prüfungsnummer: 770429)

Prüfungsleistung, Klausur, Dauer (in Minuten): 60

Anteil an der Berechnung der Modulnote: 50%

Erstablingung: SS 2015, 1. Wdh.: WS 2015/2016

1. Prüfer: Tino Hausotte

Rechnergestützte Messtechnik (Prüfungsnummer: 205944)

Prüfungsleistung, Klausur, Dauer (in Minuten): 60

Anteil an der Berechnung der Modulnote: 50%

Erstablingung: SS 2015, 1. Wdh.: WS 2015/2016

1. Prüfer: Tino Hausotte

---

**Organisatorisches:**

- Unterlagen zur Lehrveranstaltung werden auf der Lernplattform StudOn ([www.studon.uni-erlangen.de](http://www.studon.uni-erlangen.de)) bereitgestellt. Das Passwort wird in der ersten Vorlesung bekannt gegeben.