

**Liste von möglichen Prüfungsfragen der Kapitel 1-13 zur Vorlesung 141.A71, „Physikalische Messtechnik I“ aus dem Wintersemester 2019/2020.**

**Diese Fragen sollen zur Orientierung beim Lernen helfen.**

**Fragen können auch in abgewandelter Form in Prüfungen auftauchen, daher bitte immer genau lesen, was eigentlich gefragt ist.**

**Es geht um VERSTÄNDNIS, nicht „pattern recognition“.**

VO1-Einführung

Erklären Sie was systematische und was zufällige Fehler sind und geben Sie Beispiele.

Ist die Unterscheidung systematisch/zufällig immer eindeutig?

Welche lassen sich im Prinzip korrigieren und wie?

Erklären Sie, wie durch mehrmalige Messungen und Mittelung der Ergebnisse der Messfehler reduziert werden kann. Und wie hängt die Reduktion des Messfehlers mit der Zahl der Messungen zusammen?

Für welche Arten von Fehler funktioniert das?

Wie lautet die Gauss'sche Wahrscheinlichkeitsverteilung  $W(x)$  und was ist die Bedeutung der darin enthaltenen Parameter?

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass bei Vorliegen einer Gauss'schen Wahrscheinlichkeitsverteilung die Einzelmessung um weniger als 1, 2, bzw. 3 Standardabweichungen vom Mittelwert abweicht?

Unter welchen Bedingungen kann man erwarten, dass der Messfehler einer Gauss'schen Wahrscheinlichkeitsverteilung unterliegt?

Einfache Fehlerfortpflanzung: Wie lautet der Fehler einer Größe  $G(x,y,z)$ , die aus den verschiedenen Messgrößen  $x,y,z$  errechnet wird? Was ist Voraussetzung für die Gültigkeit dieses Gesetzes?

Temperaturmessung mittels Thermoelement und Messverstärker: Welchen möglichen Fehlerquellen unterliegt der funktionale Zusammenhang (=Übertragungsfunktion) zwischen der tatsächlichen Temperatur des zu messenden Objektes und der dem ADC zugeführten Spannung?

Was ist der Effekt der Digitalisierung der Spannung? Unter welchen Bedingungen kann durch Mittelung digitaler Messwerte eine Verbesserung der Genauigkeit erreicht werden?

Was ist ein Sensor? Und was ist ein Aktor?

Was ist die Empfindlichkeit eines Sensors?

Was ist die „dynamic range“ eines Sensors?

Was versteht man unter Hysterese eines Sensors? (Auch Skizze)

### VO1-Fehlerfortpflanzung

Wie ist der Erwartungswert (=Mittelwert) einer Messgröße definiert?

Wie ist die Varianz einer Messgröße definiert? Was ist die Standardabweichung?

Bestimmung einer Größe  $y$  durch Messung einer Größe  $x$  bei bekanntem Zusammenhang  $y(x)$ : Wie geht die Methode der Gauss'schen Fehlerfortpflanzung vor, um auch für nichtlineare Funktionen  $y(x)$  die Varianz bestimmen zu können? (Wichtigste Schritte der Herleitung)

Welcher Zusammenhang besteht dann zwischen der Standardabweichung von  $y$  und jener von  $x$ ?

Was ist die Kovarianz?

Was sagt die Kovarianz über die Korrelation zwischen zwei verschiedenen Messgrößen aus?

Was ist eine Hauptkomponenten-Transformation und wie beeinflusst sie die Kovarianz?

### VO2-Längenmessung

Wie funktioniert die momentan genaueste Methode um kleinste Längenänderungen zu messen? (Auch Skizze)

Wie funktioniert ein Widerstandsgeber und in welchem Längenbereich wird er zur Längenmessung herangezogen?

Erklären Sie die Grundlagen des Dehnmessstreifens. In welchem Bereich *relativer* Längenänderung wird er eingesetzt? Wie sollte ein Dehnmessstreifen auf Temperaturänderung reagieren?

Was ist das Messprinzip eines induktiven Weggebers? Für welchen Längenbereich wird er eingesetzt?

Wie funktionieren kapazitive Weggeber? Welche drei wesentlichen Typen gibt es, und welchen Parameter der Basisformel variieren sie?

Was kann man mit einer Lateraldiode messen? Wie funktioniert sie?

Wie funktioniert ein Stylometer und für welche Zwecke wird es eingesetzt?

Raster-Kraftmikroskop: Wie funktioniert die genaueste Methode, nämlich der Tapping mode? Wie wird die Höhenänderung gemessen? Welche Auflösung wird erreicht? Welche Kräfte spielen eine Rolle?

Erklären Sie zwei Methoden zur Schichtdickenmessung für Beschichtungsvorgänge und welche Auflösung jede erreicht.

Welche zwei optischen Methoden werden zur Dickenmessung schwach absorbierender bzw. transparenter Schichten eingesetzt. Welche physikalischen Effekte werden jeweils genutzt?

### VO3-KraftUndDruck

Wie lautet das Gesetz das in der Federwaage zur Anwendung kommt? In welche andere Größe wird die Kraft umgewandelt?

Wie funktioniert eine DMS Kraftmessdose?

Was ist das Prinzip eines Drehmomentmessers zwischen Kraft gebender und Kraft nehmender rotierender Achse?

Quarz-Kristall als Piezo-Druckwandler: Erklären Sie wie durch Druck ein elektrisches Dipolmoment entsteht.

Skizzieren Sie die Anordnungen zur Kraftmessung mittels longitudinalem und transversalem Piezoeffekt, und beachten Sie insbesondere wo die elektrische Messspannung abgenommen wird.

### VO3-Temperatur

Allgemein:

Nennen Sie mindestens drei verschiedene Methoden der Temperaturmessung und das jeweils verwendete physikalische Prinzip.

Wie messen Sie tiefe Temperaturen unter 50 K?

Wie messen Sie hohe Temperaturen über 1500 K?

Spezifisch:

Wie ist der Zusammenhang zwischen elektrischem Widerstand und Temperatur in einem Platin-Widerstandsthermometer?

Welcher systematische Fehler ist beim Widerstandsthermometer zu berücksichtigen?

Thermoelemente: Was ist die Ursache des Seebeckeffekts?

Skizzieren und erklären Sie den Aufbau eines Thermoelements und wie damit die Temperatur gemessen werden kann. Welche elektrische Größe wird gemessen? Wie ist der funktionale Zusammenhang mit der Temperatur? In welchem Temperaturbereich werden Thermoelemente angewendet?

Erklären Sie Gesamtstrahlungs- und Teilstrahlungs- pyrometer. In welchem Temperaturbereich werden sie eingesetzt?

Wie funktioniert ein Farbpyrometer? Welchen besonderen Vorteil hat es gegenüber anderen Strahlungs- pyrometern?

Wie funktioniert ein Gasthermometer und welches physikalische Gesetz wird genutzt? Auf welche physikalische Größe wird die Temperatur abgebildet? Welche absolute Genauigkeit wird erreicht?

Zeichnen Sie den funktionalen Zusammenhang zwischen der jeweils genutzten elektrischen Messgröße und der absoluten Temperatur im Bereich 0-300 K für a) ein Germanium-Widerstandsthermometer, b) Platin-Widerstandsthermometer und c) ein Thermoelement (AuFe-CrNi). Welches ist im Bereich unter 100 K am empfindlichsten?

## VO4-Magnetfeldmessung

Skizzieren und beschreiben Sie die vorgestellten Methoden zur Erzeugung von Magnetfeldern und geben Sie die dazugehörigen maximalen Feldstärken an.

Welche physikalischen Effekte werden zur Magnetfeldmessung genutzt? Nennen Sie zu jedem Effekt mindestens zwei Sensortypen in denen er zur Anwendung kommt.

Wie funktioniert eine Feldmessspule? Wie misst man damit Wechselfelder und wie konstante Felder? Was sind ihre Vor- und Nachteile?

Wie ist die Empfindlichkeit einer Feldmessspule definiert? (In Worten und als Formel.)

Wie kann die Empfindlichkeit einer Feldmessspule erhöht werden? Welche Vorteile gewinnt man, welche Nachteile treten auf?

Was sind zwei typische galvanomagnetische Effekte und worauf beruhen sie?

Skizzieren und erklären Sie das Messprinzip des Halleffekts. Was ist der typische Messbereich in Luft (~Vakuum) in Tesla? Wie lautet die Formel für die Hallspannung? Welche Halbleiter werden eingesetzt?

Welche zwei typischen Bauformen für Hallsonden gibt es? Skizzieren Sie wie das Hallplättchen jeweils eingebaut sein muss.

Was versteht man unter dem Magnetowiderstandseffekt? Welche zwei Arten unterscheidet man und wie hängen sie vom Magnetfeld ab?

Wie lautet die relative Änderung des elektrischen Widerstands für den Fall dass das Magnetfeld normal auf die Stromrichtung ist, wie wenn es parallel dazu ist? Welches Problem ergibt sich wenn man – wie meistens – Halbleiter einsetzt?

Für welchen Feldstärkebereich werden Halleffekt-Sensoren eingesetzt, wie weit reichen Magnetowiderstand-Sensoren? Was ist etwa die untere Grenze in beiden Fällen?

Wie ist ein Sensor aufgebaut, der den Giant Magneto Resistance Effekt ausnutzt? Was ist die Ursache für diesen Effekt?

Wo wird der GMR-Effekt heute eingesetzt?

Wie ist ein Fluxgate-Sensor aufgebaut? Erklären Sie seine Funktionsweise. Für welche Feldstärken wird er eingesetzt?

Welche typischen kommerziellen Anwendungen gibt es für den Fluxgate-Sensor und welches Magnetfeld messen diese?

Welche Effekte nutzt ein SQUID? Skizzieren Sie den Aufbau eines SQUIDs und kennzeichnen Sie auch Zu- und Abführung des Stroms sowie die Punkte zur Spannungsmessung. Welche Feldstärken kann man damit messen?

Skizzieren Sie die funktionale Abhängigkeit des magnetischen Flusses durch ein SQUID als Funktion des externen Flusses. Erklären Sie wie es dazu kommt.

Wie wird die Empfindlichkeit eines SQUIDS noch weiter gesteigert?

### VO5-1-Volumendurchfluss

Skizzieren Sie einen Ultraschall-Durchflussmesser. Welche zwei Messprinzipien gibt es? Bei welchem, und wie, ist es möglich die mittlere Durchflussgeschwindigkeit ohne Kenntnis der Schallgeschwindigkeit zu bestimmen?

Skizzieren Sie das Schema des magnetisch-induktiven Durchflussmessers. Welches Prinzip nutzt er? Welche Eigenschaft muss die gemessene Flüssigkeit besitzen?

### VO5-2-Fotowiderstand-FotoDiode

Woraus besteht ein Fotowiderstand und warum kann seine Leitfähigkeit durch Licht beeinflusst werden? Was sind seine Nachteile? Welchen Typ würden Sie für sichtbares Licht einsetzen?

Wie ist eine Fotodiode aufgebaut? Welche Halbleiter werden eingesetzt? Wie hängt der Strom von der einfallenden Lichtintensität ab? Wie wird sie meist geschaltet und wie wird der Strom gemessen?

### VO6-Roentgen-Neutronenbeugung

In welchem Energiebereich müssen Röntgenstrahlen, Elektronen bzw. Neutronen sein, damit die zugehörige Wellenlänge im Bereich atomarer Abstände von Flüssigkeiten und Festkörpern liegt (0.1-0.3 nm)?

Warum werden Teilchen an einem periodischen Kristallgitter hauptsächlich nur in bestimmte Richtungen gestreut?

Skizzieren Sie die wesentlichen Elemente eines Streuexperimentes und schreiben Sie die Bragg-Gleichung für elastische Kristallbeugung an. Was ist die wesentliche Information über den Kristall, die man aus einem elastischen Beugungsexperiment gewinnt? (Elastisch heißt: Energie der gestreuten Elektronen, Neutronen oder Röntgenquanten ist unverändert)

Beschreiben Sie wie Elektronen, Röntgenstrahlung und Neutronen mit Atomen wechselwirken.

Beschreiben Sie die zwei Methoden der Erzeugung von Röntgenstrahlung und die Eigenschaften der resultierenden Spektren.

Wie funktionieren folgende Röntgendetektoren: Zählrohr, Szintillator, Halbleiterdetektor?

Schreiben Sie die Bragg-Bedingung an und erklären Sie, jeweils mit Skizze, wie die drei Methoden der elastischen Röntgenbeugung funktionieren, welche diese Gleichung benutzen. Erklären Sie auch für jede Methode, welche Beschaffenheit die Probe haben muss.

Welche Charakteristika hat Neutronenstrahlung? Welche Vorteile bieten insbesondere Neutronen mit thermischen Geschwindigkeiten?

Wie werden Neutronen in einem Kernreaktor erzeugt, und wie in einer Spallationsquelle?

Was versteht man unter Moderation von Neutronen? Mittels welcher Moderatoren erhält man kalte, thermische und heiße Neutronen? Was sind die jeweils typischen de Broglie Wellenlängen?

Beschreiben Sie die Funktionsweise der zwei gebräuchlichen Methoden zur Wellenlängenauswahl (Monochromatisierung) von Neutronen.

Was ist das Prinzip der Neutronendetektion mittels eines Proportionalzählrohres?

Skizzieren Sie die Messanordnung eines Neutronen-2-Achsen Spektrometers mit Kristall-Monochromator. Nützt dieses Instrument elastische oder inelastische Neutronenbeugung? Wie sieht ein typisches Ergebnis der Vermessung einer Probe als Funktion des Streuwinkels aus?

Skizzieren Sie die Messanordnung eines Neutronen-3-Achsen Spektrometers, und beschreiben Sie was an den drei Orten der Streuung geschieht (Monochromator, Probe, Analysator). Welche zusätzliche Information gegenüber einem 2-Achsen Spektrometer kann man erhalten?

Skizzieren Sie ein Neutronenflugzeitspektrometer. Wie werden hier, im Gegensatz zum 3-Achsen Spektrometer, die Richtung des Impulses und die Energie der von der Probe kommenden Neutronen gemessen?

Wie unterscheiden sich die Streuquerschnitte der Elemente als Funktion der Kernladungszahl für Röntgenstreuung und für Neutronenstreuung? Sind Isotope desselben Elements mit Röntgenstreuung unterscheidbar? Sind benachbarte Elemente tendenziell leichter mittels Neutronenstreuung oder mittels Röntgenstreuung unterscheidbar?

Warum kann man mit Neutronen magnetische Strukturen untersuchen? Skizzieren und erklären Sie die Neutronenstreuungsmethoden zur Trennung der atomaren (nuklearen) und magnetischen Struktur eines Kristalls.

#### VO7-1-Fehlerquadrate\_Konkret

Erklären Sie das Prinzip der Methode der kleinsten Fehlerquadrate.

Wie kann man die Methode der kleinsten Fehlerquadrate auch für nichtlineare Fitfunktionen anwenden? Beschreiben Sie den formalen Ausdruck, der dann minimiert werden soll. Wie erkennt man ob die gefundene Lösung ausreicht?

Nach einem Fit einer theoretischen Kurve an Messdaten: Woran erkennt man, dass die Fitfunktion die Daten gut beschreibt?

Was ist die Kovarianzmatrix, und was ist die Gewichtsmatrix?

#### VO7-2-DiverseSensoren

Erklären Sie den Zweck und die Funktion eines Pulsoxymeters

Skizzieren Sie die zwei gebräuchlichen Methoden die in Brandmeldern angewendet werden und erklären Sie das jeweilige Funktionsprinzip.

#### VO8-Zeitmessung

Wie lautet die Definition der SI-Sekunde?

Ordnen Sie die folgenden Begriffe nach der jeweiligen Übergangsfrequenz:

Elektronische Übergänge im optischen Spektralbereich  
Feinstrukturaufspaltung (Spin-Bahn-Kopplung)

Hyperfeinstrukturaufspaltung (Spin-Kernspin-Kopplung)  
Zeeman-Verschiebungen durch äußere Magnetfelder (Größenordnung 1-10 G)  
Schwarzkörper-Effekte bei Raumtemperatur  
Gravitationseffekte (Verschiebung um ca. 1 m)

Was ist der Q-Faktor (Formel), zeichnen Sie eine qualitative Darstellung im Falle einer Resonanz

Wie lautet die Definition der Allan Varianz (Text + Formel)?

Was ist der Unterschied zwischen „Precision“ und „Accuracy“?

Was passiert bei „Rabi-Oszillationen“?

Wie funktioniert die Ramsey-Sequenz und was ist ihr Vorteil?

Was beschränkt die Genauigkeit der Cäsium-Atomuhr?

Nennen Sie 3 Anwendungsmöglichkeiten von Präzisions-Uhren

#### VO9-Elementaranalyse

Beschreiben Sie das Grundprinzip der Neutronen Aktivierungsanalyse. Welche Möglichkeiten zur quantitativen Analyse sind möglich? Welche Vorteile bietet dieses Verfahren im Vergleich zu massenspektroskopischen Methoden? Welche Nachteile?

Beschreiben Sie das Prinzip der Röntgenfluoreszenzanalyse. Wonach können verschiedenen Elemente unterschieden werden? Welche Vorteile bietet dieses Verfahren im Vergleich zur Neutronen Aktivierungsanalyse? Was sind die Nachteile?

Beschreiben Sie das Prinzip der Massenspektroskopie. Wonach werden in der Massenspektroskopie einzelne Elemente unterschieden? Ist die Zuordnung eindeutig? Welche Vorteile bietet dieses Verfahren im Vergleich zur Röntgenfluoreszenzanalyse? Was sind die Nachteile?

Welche Methode (Neutronen Aktivierungsanalyse, Röntgenfluoreszenzspektroskopie oder Massenspektroskopie) würden Sie wählen, um Wasseranalysen durchzuführen? Erklären Sie die Auswahl.

Welche Methode (Neutronen Aktivierungsanalyse, Röntgenfluoreszenzspektroskopie oder Massenspektroskopie) würden Sie wählen, um die Qualität von metallischen Legierungen zu bestimmen? Erklären Sie die Auswahl.

Welche Methode (Neutronen Aktivierungsanalyse, Röntgenfluoreszenzspektroskopie oder Massenspektroskopie) würden Sie wählen, um die Pauschalchemie einer geologischen Probe zu bestimmen? Erklären Sie die Auswahl.

#### V10-Gravitation

Reihen Sie folgende Orte nach der Größe der Erdbeschleunigung, die an ihnen herrscht : Helsinki, Nairobi, Nordpol, Wien

Am Nordpol beträgt die Erdbeschleunigung  $9.86 \text{ m/s}^2$ . Berechnen Sie die Veränderung der Erdbeschleunigung am Äquator (Erdradius 6378 km).

Wie lautet die Formel für die Gravitationskraft, wie groß ist die darin auftauchende Konstante?

Wie lautet die Formel für die Gravitationskraft, für die Coulombkraft, wie groß ist das Verhältnis dieser beiden Kräfte in einem Wasserstoff-Atom (1 Elektron, 1 Proton)?

Wie groß ist der Effekt der Gezeiten auf die Erdbeschleunigung (Größenordnung)?

Wie lässt sich mit Hilfe eines Pendels die Erdbeschleunigung messen (Formel)?

Zeichnen Sie den Strahlengang und das Funktionsschema eines ballistischen Gravimeters.

Beschreiben Sie die Impulsübertragung auf ein Atom mittels eines 2-Photonen-Raman Prozesses

### V11-Elektronenmikroskopie

Wie bestimmt sich die Materiewellenlänge eines Elektrons? Ist diese Wellenlänge limitierend für die Auflösung einer elektronenmikroskopischen Methode? Wodurch ist die Auflösung im (a) Rasterelektronenmikroskop und (b) Transmissionselektronenmikroskop gegeben?

Skizzieren Sie die grundlegenden Elemente eines Transmissionselektronenmikroskops (TEM) und beschreiben Sie Hellfeldabbildung anhand des Strahlengangs. Erklären Sie kurz die Funktion der Elemente.

Beschreiben Sie Kontrastmechanismen im Transmissionselektronenmikroskop (TEM): a) Amplitudenkontrast, b) Phasenkontrast. Welcher Kontrast tritt bei einer kristallinen Goldfolie der Dicke 20 nm auf? Erläutern Sie.

Beschreiben Sie die Abbildung mit einer Linse mit Hilfe von Fourieroptik.

### V12-Laser

Nennen Sie 3 Eigenschaften, die Laserlicht von „klassischem Licht“ (z.B. Glühlampe) unterscheiden

Skizzieren Sie die 3 fundamentalen Wechselwirkungen von Licht mit einem atomaren 2-Niveau-System. Nennen Sie für jeden Prozess ein Beispiel.

Skizzieren Sie die Grundelemente eines Lasers

Zeichnen Sie die 3 niedrigsten (gemessen an ihrer Energie) Moden eines ebenen Resonators der Länge  $L$ .

Wie lautet der allgemeine Ausdruck für optische Stehwellen (Formel für die Wellenlängen) in einem Resonator der Länge  $L$ .

Was ist der freie Spektralbereich (Formel und kurze Erklärung)? Was ist der Freie Spektralbereich für einen Laserresonator der Länge 1m?

Wie lautet das Beer'sche Absorptionsgesetz? Unter welcher Bedingung kann ein optisches Medium (bestehend aus 2-Niveau-Atomen) zu einem optischen Verstärker werden?

Skizzieren Sie ein 4-Niveau Laserschema, beschriften Sie mit folgenden Begriffen:

kurzlebig

langlebig

Pumpübergang

## Laserübergang

Was bestimmt bei einem Kurzpulslaser (z.B. Femtosekunden-Laser) die Pulsrate?

Was bestimmt bei einem Kurzpulslaser (z.B. Femtosekunden-Laser) die Pulsdauer?  
V13-Rauschen

Wie berechnet man die Autokorrelation eines Signals?

Wie hängt die Autokorrelationsfunktion mit dem Leistungsspektrum zusammen?

Welche Eigenschaften hat „weißes Rauschen“?

Wie lautet die Nyquist-Formel für die thermische Rauschspannung an einem elektrischen Widerstand?

Wie lautet die Schottky-Formel für das Rauschen eines elektrischen Stroms

Nennen Sie 3 Beispiele für Schrotrauschen (shot noise)

Ein (sehr schwacher) Laser sendet in 1 ms im Mittel 100 Photonen aus, die von einer Photodiode gemessen werden (die Photodiode wird als „perfekt“ angenommen, 100% Effizienz). Zeichnen Sie eine Verteilung (Histogram) für die gemessene Photonenzahl für sehr viele Einzelmessungen (alle 1 ms lang).