



STUDIENBRIEF

RADARSENSOREN

Weiterbildender Masterstudiengang „Sensorsystemtechnik“
der Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik
mit dem Abschluss „Master of Science (M. Sc.)“
an der Universität Ulm

9 Radarsensoren

Kürzel / Nummer:	RS
Englischer Titel:	Radar sensors
Leistungspunkte:	4 ECTS
Sprache:	Deutsch
Turnus / Dauer:	jedes Sommersemester / 1 Semester
Modulverantwortlicher:	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Menzel
Dozenten:	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Menzel
Einordnung des Moduls in Studiengänge:	Sensorsystemtechnik, M.Sc., Wahlpflichtmodul, Sensorik
Voraussetzungen (inhaltlich):	Signale und Systeme, Felder und Wellen, Einführung in die HF-Technik
Lernziele:	<p>Radarsensoren werden seit vielen Jahrzehnten zur Überwachung von Flug und Schiffsverkehr sowie in diversen militärischen Systemen eingesetzt. In den letzten Jahren ist eine ganze Reihe von neuartigen Anwendungen im kommerziellen Bereich dazu gekommen, erwähnt werden sollen hier nur Radarsensoren in der Automobiltechnik oder der industriellen Messtechnik. Weitere Entwicklungen gehen in Richtung kompakt integrierter, abbildender Systeme mit immer größerem Anteil der Signalverarbeitung. Dieses Modul führt die Lernenden in die Thematik ein und lenkt den Blickpunkt auch auf neuere Entwicklungen.</p> <p>Nach der Belegung des Moduls sind die Studierenden in der Lage, die Prinzipien der Hochfrequenztechnik und der Mikrowellentechnik zum Entwurf und der messtechnischen Überprüfung von Systemen der Funkmesstechnik (Radartechnik) anzuwenden. Sie können die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Radarsensorsysteme und deren Subsysteme sowie unterschiedliche Radiometer- und Radaranwendungen bewerten.</p>
Inhalt:	<ul style="list-style-type: none"> - Ausbreitungseigenschaften von Mikrowellen in der Atmosphäre - Radiometrie - Radar mit den verschiedenen Radarverfahren, ihrer Realisierung, ihren Eigenschaften (CW-, FMCW-, Pulsradar, phasengesteuertes Radar, Beamforming, SAR) - Radarantennen
Literatur:	<ul style="list-style-type: none"> - Baur: Einführung in die Radartechnik, Teubner, 1985 - Collin: Antennas and Radiowave Propagation. McGraw-Hill, Singapore 1985 - Detlefsen: Radartechnik : Grundlagen, Bauelemente, Verfahren, Anwendungen, Springer Verlag - Huder: Einführung in die Radartechnik, Teubner, 1999 - Johnson: Antenna engineering handbook, McGraw-Hill, 1984 - Kark: Antennen und Strahlungsfelder, Viehweg, Wiesbaden, 2004 - Klausning, Holpp: Radar mit realer und synthetischer Apertur. Oldenbourg, München, Wien, 2000 - Ludloff: Handbuch Radar und Radarsignalverarbeitung, Vieweg, 1993 - Silver: Microwave antenna theory and design, Peregrinus, 1986 - Skolnik: Introduction to radar systems, McGraw-Hill , 1981 - Skolnik: Radar Handbook, McGraw-Hill, 1990 - Vohwinkel: Passive Mikrowellenradiometrie, Vieweg , 1988

Grundlage für:	Masterarbeiten im Bereich der Radarsensoren und -antennen
Lehrveranstaltungen und Lehrformen:	Präsenzveranstaltungen: Einführungsveranstaltung: 4 h Vertiefende Übungen: 8 h Seminar zur Prüfungsvorbereitung: 4 h Modulprüfung: 4 h E-Learning: Selbststudium: 80 h Vor- und Nachbereitung, Übungen, Anwendung: 20 h
Abschätzung des Arbeitsaufwands:	Vermittlung des Unterrichtsstoffs: 80 h Vor- und Nachbereitung, Übungen, Anwendung: 36 h Modulprüfung: 4 h Summe: 120 h
Leistungsnachweis und Prüfungen:	Die Modulprüfung erfolgt mündlich.
Voraussetzungen (formal):	Keine
Notenbildung:	Die Modulnote ergibt sich aus der Modulprüfung.

1. Einleitung
2. Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in der Atmosphäre
3. Radiometrie
4. Radar und Radarreichweite
5. Reflexionsquerschnitt
6. Dopplerradar (CW-Radar)
7. Inkohärentes Pulsradar
8. Kohärentes Pulsradar
9. Verbesserung von Radarfunktionen
10. FMCW-Radar
11. Radarantennen (Teil 1)
12. Phasengesteuerte Antennen (Radarantennen Teil 2)
13. Digitale Strahlformung
14. Synthetisches Apertur-Radar (SAR)

Allgemeine Einleitung Radar

Radartechnik ist heute weitverbreitet

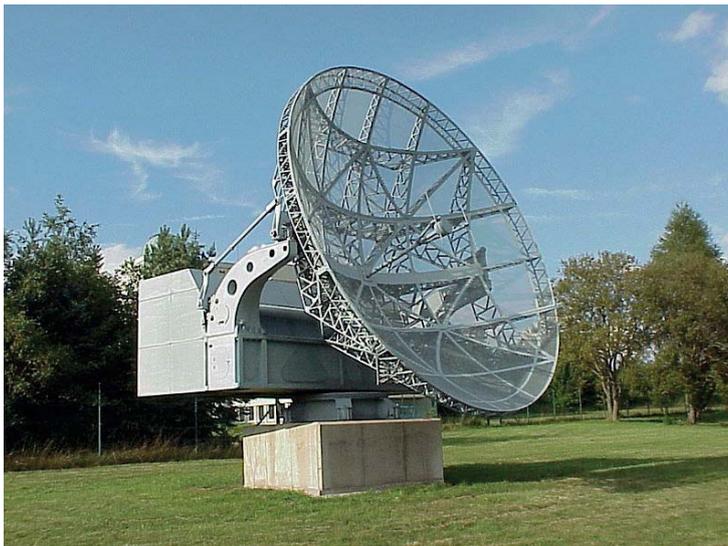
- Militärische Systeme
- Flugüberwachung
- Verkehrsüberwachung
- Automobiltechnik
- Industrielle Sensorik
-

Die Technik ist aber noch vergleichsweise jung:

1886	Heinrich Hertz	Reflexion elektromagnetischer Wellen an Metall
1904	Christian Hülsmeier	Patent zur Erkennung von Schiffen durch Reflexion elektromagnetischer Wellen
1919	Alexander Watson-Watt	Patent Radar
ca. 1935	“	Ortung von Flugzeugen
ca. 1939	Telefunken	Würzburg-Radar, erster militärischer Einsatz dieses Radars
1999	Mercedes	Erstes kommerzielles Automobilradar

Allgemeine Einleitung Radar

Eigentlicher Beginn der Entwicklung im 2. Weltkrieg

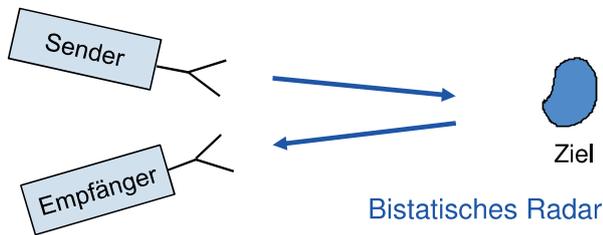
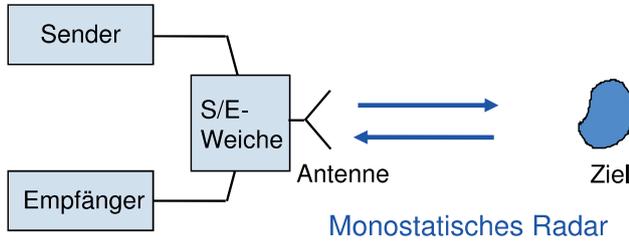


Würzburg-Radar von Telefunken

Quelle: Creative Commons Lizenz, Ch.Whisky, <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mvc-471x.jpg>

Einführung Radar

Schemata



Beim bistatischen Radar kann es unterschiedliche Entfernungen von Sender bzw. Empfänger zum Ziel geben. Auch die Antennen in Sender und Empfänger können unterschiedlich sein.

Grundlagen der Reichweitenberechnung

Voraussetzung: ungestörte, quasioptische Ausbreitung, atmosphärische Dämpfung hier vernachlässigt

a) Kommunikation

P_S : Sendeleistung
 G_S : Gewinn der Sendeantenne

A_{Ant} : Effektive Antennenfläche ($G_E \frac{\lambda^2}{4\pi}$)
 G_E : Gewinn der Empfangsantenne
 Δf : Empfängerbandbreite
 F : Empfängerrauschzahl
 S/N : Signal - Rausch - Verhältnis



Leistungsdichte S im Abstand R :
$$S_E = \frac{P_S \cdot G_S}{4\pi R^2}$$

Von Antenne empfangene Leistung:

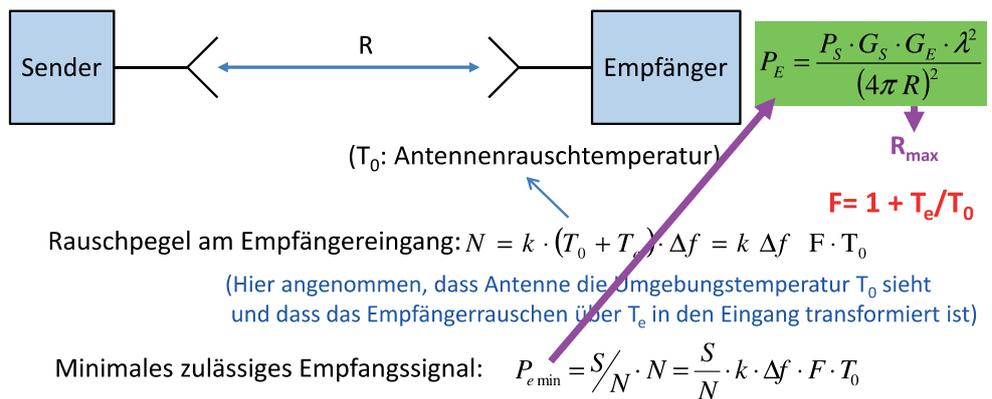
$$P_E = S_E \cdot A_{Ant} = \frac{S_E \cdot G_E \cdot \lambda^2}{4\pi} = \frac{P_S \cdot G_S \cdot G_E \cdot \lambda^2}{(4\pi R)^2}$$

Grundlagen der Reichweitenberechnung

Voraussetzung: ungestörte, quasioptische Ausbreitung,
atmosphärische Dämpfung hier vernachlässigt

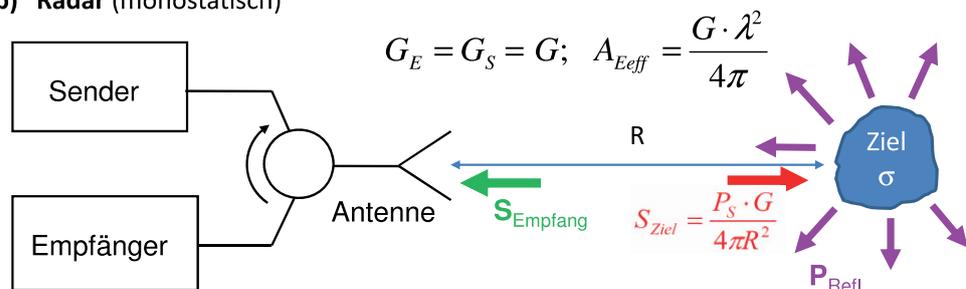
P_S : Sendeleistung
 G_S : Gewinn der Sendeantenne

A_{Ant} : Effektive Antennenfläche ($G_E \frac{\lambda^2}{4\pi}$)
 G_E : Gewinn der Empfangsantenne
 Δf : Empfängerbandbreite
 F, T_e : Empfängerrauschzahl/Temperatur
 S/N : Signal - Rausch - Verhältnis



Grundlagen der Reichweitenberechnung

b) Radar (monostatisch)



Das Signal trifft im Abstand R auf Ziel. Das Ziel habe (in eine vorgegebene Richtung) einen **effektiven** Reflexionsquerschnitt σ , d.h. die reflektierte Leistung beträgt

$$P_{Refl} = S_{Ziel} \cdot \sigma = \frac{P_S \cdot G}{4\pi R^2} \cdot \sigma \quad (\text{zum Radarreflexionsquerschnitt folgt extra Kapitel})$$

Annahme: diese Leistung werde dann in alle Richtungen gleichmäßig abgestrahlt.

$$P_e = \frac{P_{Refl}}{4\pi R^2} \cdot A_{Antenne} = \frac{S_{Ziel} \cdot \sigma}{4\pi R^2} \cdot \frac{G_E \cdot \lambda^2}{4\pi} = \frac{P_S \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

Verbesserung der Radarfunktion

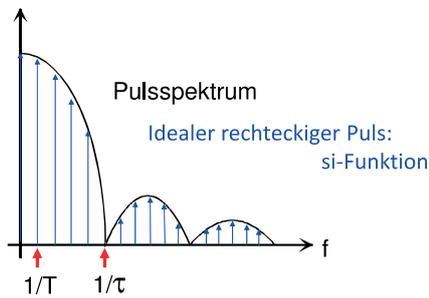
Festzielunterdrückung

Viele Radargeräte sollen nur bewegte Ziele erfassen (Festziele stören!).

Beispiel: Flugsicherungsradar

Lösung: Unterdrückung der Festziele, "Moving target indication", MTI

Spektrum (Basisband) des Signals



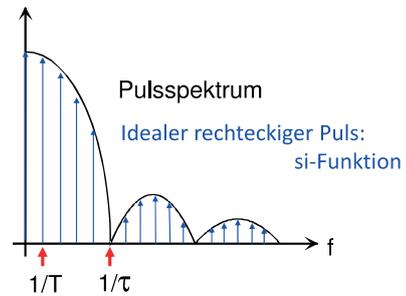
Für bewegte Ziele sind die Linien verschoben!

Verbesserung der Radarfunktion

Festzielunterdrückung

Einsatz eines Kammfilters, das alle Frequenzen n/T unterdrückt, aber dopplerverschobene Signale passieren lässt!

Einfachste Lösung:

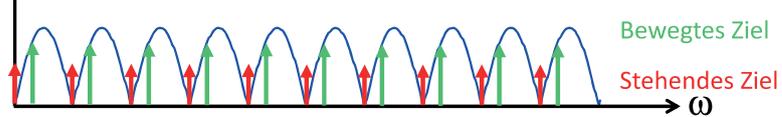


Kohärent detektiertes Basisbandsignal



$|H(j\omega)|$

$$H(\omega) = e^{-j\omega T} - 1 = e^{-j\omega T/2} (e^{-j\omega T/2} - e^{j\omega T/2}) = \underline{K} \sin(\omega \frac{T}{2})$$



Verbesserung der Radarfunktion

Regenunterdrückung

Reflexionen von Regentropfen können Signale von gewünschten Zielen überdecken.

Ausweg: Ausnutzen der Polarisation; hier: zirkulare Polarisation

Regentropfen:

Meist relativ symmetrische (runde) Gebilde. Die Reflexion erfolgt in entgegengesetzt drehender Polarisation, in gleichsinnig drehender Polarisation wird sehr wenig zurückgestrahlt.

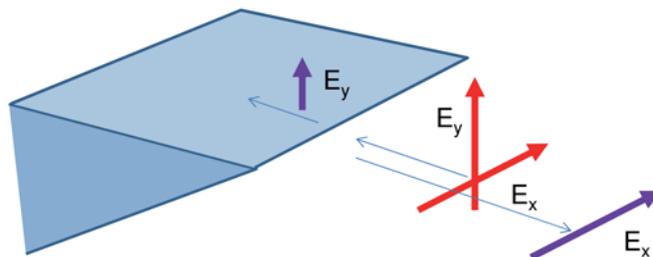
(Die Drehrichtung des Feldes bleibt zwar im Raum erhalten, bezogen auf die Ausbreitungsrichtung der Welle kehrt sie sich jedoch um).

Komplexe Ziele (Flugzeuge, Fahrzeuge):

Aufgrund der unregelmäßigen Form wird auch ein beträchtlicher Anteil der reflektierten Leistung in gleichsinniger Polarisation zurückgestrahlt.

Verbesserung der Radarfunktion

Zirkulare Polarisation: $E_{\text{ges}} = E_x + j E_y$



E_x lässt sich wiederum aus der Überlagerung von zwei zirkular polarisierten Wellen darstellen:

$$E_x = \frac{1}{2} \{ (E_x + j E_y) + (E_x - j E_y) \}$$

Phasengesteuerte Antennen

Einführung

$$E_{ges} \sim \cos \left[\frac{1}{2} (k_0 d \sin \Theta - \vartheta_0) \right]$$

Forderung:

Maximum bei $\Theta = \Theta_{max}$

$$\Rightarrow \cos \left[\frac{1}{2} (k_0 d \sin \Theta_{max} - \vartheta_0) \right] = 1 \Rightarrow (k_0 d \sin \Theta_{max} - \vartheta_0) = 0$$

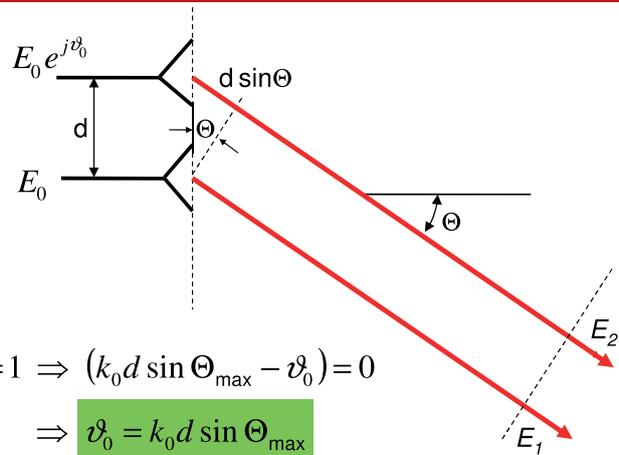
$$\Rightarrow \vartheta_0 = k_0 d \sin \Theta_{max}$$

Strahlungsdiagramm: $E(\Theta) \sim \cos \left[\frac{1}{2} (k_0 d \sin \Theta - k_0 d \sin \Theta_{max}) \right]$

$$E(\Theta) \sim \cos \left[\pi \frac{d}{\lambda} (\sin \Theta - \sin \Theta_{max}) \right]$$

Position der Hauptkeule einstellbar über $\vartheta_0 = k_0 d \sin \Theta_{max}$

\Rightarrow elektronische Strahlschwenkung



Phasengesteuerte Antennen

Voraussetzung: nur **ein** Maximum

$$E(\Theta) \sim \cos \left[\pi \frac{d}{\lambda} (\sin \Theta - \sin \Theta_{max}) \right], \text{ Argument vom cos } < \pi$$

a) Allgemein für alle Θ , Θ_{max}

$$|\sin \Theta - \sin \Theta_{max}| \leq 2 \Rightarrow 2 \pi \frac{d}{\lambda} \leq \pi \Rightarrow d \leq \frac{\lambda}{2}$$

b) für alle Θ , aber $\Theta_{max} < \pi/2$:

$$|\sin \Theta| \leq 1$$

$$|\sin \Theta - \sin \Theta_{max}| \leq 1 + \sin \Theta_{max} \Rightarrow d \leq \frac{\lambda}{(1 + |\sin \Theta_{max}|)}$$

Wenn dies nicht erfüllt ist, gibt es weitere Maxima

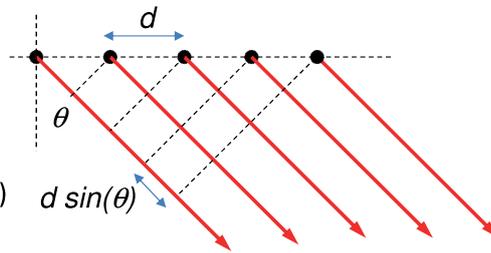
\Rightarrow Grating-Lobes bei

$$\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \Theta - \sin \Theta_{max}) = \pm n \pi$$

Phasengesteuerte Antennen

Gruppe aus N Elementen

- gleicher Abstand
- gleiche Amplitude
- lineare Phasenprogression
(Koordinatenursprung in der Mitte der Gruppe)
- Einzelelemente als isotrope Kugelstrahler



$$G_{\text{gruppe}}(\Theta) = \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} e^{-jnk d (\sin \Theta - \sin \Theta_{\max})} = \frac{\sin \left[N \frac{\pi d}{\lambda} (\sin \Theta - \sin \Theta_{\max}) \right]}{N \sin \left[\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \Theta - \sin \Theta_{\max}) \right]}$$

⇒ **Gruppendiagramm** einer Liniengruppe

Gesamt-Antennendiagramm:

(G_{element} : Einzelelementcharakteristik) $G_{\text{ges}} = G_{\text{gruppe}} \cdot G_{\text{element}}$

Eine rechteckförmige, zweidimensionale Antennengruppe:

Koordinaten sind unter obigen Voraussetzungen separierbar ⇒ $G = G_{\theta} \cdot G_{\phi}$

Phasengesteuerte Antennen

Systemtheoretische Betrachtung:

Eine Gruppenantenne kann als Abtastung einer kontinuierlichen Apertur betrachtet werden. Das Fernfeld ist proportional zu der Fouriertransformation der Belegung; also wiederholt sich bei "Unterabtastung" das Strahlungsdiagramm

⇒ **Grating lobes**

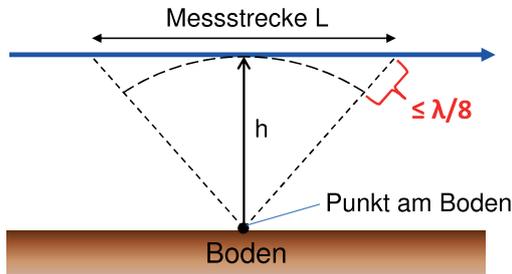
Eine Unterdrückung von Grating lobes ist auch durch eine entsprechende Elementcharakteristik möglich.

Reduktion der Nebenzipfel: reduzierte Belegung an Rändern

SAR

Auflösung eines SAR in Bewegungsrichtung

a) Unfokussiertes SAR (einfache kohärente Addition der Messwerte)



Grenzbetrachtung:
Abweichung von ebener Welle $\lambda/8$

$$h^2 + \left(\frac{L_{\max}}{2}\right)^2 = \left(h + \frac{\lambda}{8}\right)^2$$

$$= h^2 + \frac{h\lambda}{4} + \frac{\lambda^2}{64}$$

$[\lambda \ll h, L_{\max}]$

$$L_{\max} = \sqrt{h \cdot \lambda}$$

SAR

Winkelauflösung des unfokussierten SAR

Besonderheit: Die Diagrammbildung erfolgt erst beim Empfang (das Ziel wird breit ausgeleuchtet):

Betrachtung des Gesamtweges

⇓

doppelter Weg, doppelte Phase!

Zwei aufeinander folgende Messwerte:

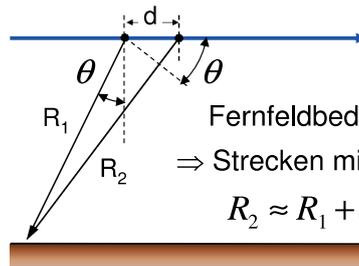
$$E_1 \propto e^{-jk2R_1}$$

$$E_2 \propto e^{-jk2R_2}$$

$$E(\theta) \propto e^{-j2kR_1} (1 + e^{-j2kdsin\theta})$$

$$= e^{-j2kR_1} \cdot e^{-jkdsin\theta} \cdot 2 \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta\right)$$

$$E(\theta) \propto \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta\right)$$



Fernfeldbedingung $R \gg d$

\Rightarrow Strecken mit R_1 und R_2 parallel

$$R_2 \approx R_1 + d \sin\theta$$

Normale Gruppenantenne (ein Weg)

$$E(\theta) \propto \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin\theta\right)$$

Etwa halber Öffnungswinkel!

Ansprechpartner

Dr. Gabriele Gröger
Albert-Einstein-Allee 45
89081 Ulm

Tel 0049 731 – 5 03 24 00
Fax 0049 731 – 5 03 24 09

gabriele.groeger@uni-ulm.de
www.uni-ulm.de/saps

Mod:Master

Sensorsystemtechnik

Postanschrift

Universität Ulm
School of Advanced Professional Studies
Albert-Einstein-Allee 45
89081 Ulm

Das Studienangebot „Sensorsystemtechnik“ wurde entwickelt im Projekt Mod:Master, das aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert und aus dem Europäischen Sozialfonds der Europäischen Union kofinanziert wird (Förderkennzeichen: 16OH11027, Projektnummer WOH11012). Dabei handelt es sich um ein Vorhaben im Programm „Aufstieg durch Bildung: offene Hochschulen“.



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung