

Elektronik

Know-how für Entwickler

Hardwarebasierte Sicherheitsarchitekturen

CYBERSECURITY IN EMBEDDED- SYSTEMEN

Seite 66



Elektronik•medical
Innovative Produkte und Lösungen für die Medizintechnik

8
Größtflüge Heißt
Das war der alljährliche Electronics
Summit 2025

16
48 und 96mm Auge
Die Apple Vision Pro im
Krankenhaus

29
Totale Wirtsumstellung
Software in der funktionellen
Neurochirurgie



cicor
Engineering:
Ohne Systemkompetenz
geht's nicht

**ALS
HEFT IM
HEFT!**

**Kapazitive DC-USV-Systeme
in modernen Produktions-
anlagen** Seite 14

**Code-Coverage:
Schnellere Markteinführung
durch Toolkombination** Seite 56

GMM-Preis 2025

Innovationen in der Mikrofluidik und Nanopartikel-Charakterisierung

Den GMM-Literaturpreis 2025 erhält Ebrahim Taiedinejad für seine herausragende Veröffentlichung über ein neuartiges System zur Echtzeitanalyse von Nanopartikeln während ihrer Synthese. Der mit 2.500 Euro dotierte Preis wird im Rahmen des MikroSystemTechnik Kongresses 2025 verliehen.



Bild 1. Ebrahim Taiedinejad, der Preisträger des GMM-Preises 2025.

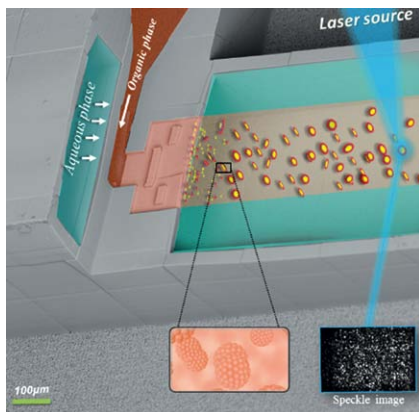


Bild 2. Rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahmen des miniaturisierten Low-Aspect-Ratio Lamination Mixers (LARLM). Dieses einzigartige Design ermöglicht die Injektion der organischen Lösungsmittelphase als dünnes, zentriertes Blatt (orange), das vollständig von der wässrigen Antilösungsmittelphase (blau) umschlossen ist. Diese Konfiguration realisiert ein schnelles, diffusionsbasiertes Mikromischen, das entscheidend für die Herstellung kleiner und monodisperser Lipidnanopartikel (LNPs) ist und gleichzeitig Verstopfungen (Fouling) der Kanäle verhindert.

Die GMM vergibt ihren Literaturpreis jährlich für eine exzellente Veröffentlichung auf den Gebieten der Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik. In diesem Jahr geht die Auszeichnung an Ebrahim Taiedinejad vom Institut für Mikrotechnik (IMT) der Technischen Universität Braunschweig für die Veröffentlichung »Diffusive micromixing combined with dynamic in situ laser scattering allows shedding light on lipid nanoparticle precipitation«, erschienen in Scientific Reports (**Bild 1**). Die Arbeit wurde von Prof. Dr.-Ing. Andreas Dietzel, Leiter des IMT, eingereicht. Sie beschreibt ein neuartiges 3D-Mikrofluidiksystem, das die kontinuierliche und hocheffiziente Herstellung von Lipidnanopartikeln (LNPs) hinsichtlich Partikelgröße und Polydispersität ermöglicht und erstmals eine in-situ-Echtzeitanalyse ihrer Größe und Größenverteilung direkt im Mikrokanal erlaubt. Der direkte Einblick in den Syntheseprozess war bislang eine der größten Herausforderungen in der Nanopartikel-Forschung.

Nach seinem Bachelorabschluss in Produktionstechnik im Iran absolvierte Ebrahim Taiedinejad 2019 seinen Master in Micro and Nano Electromechanical System Engineering an der Universität Teheran mit Auszeichnung. Im Juni 2020 begann er seine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMT der TU Braunschweig. Das Arbeitsthema seiner Dissertation lautet: »DLS-Feedback-regulierte kontinuierliche Partikelproduktion«.

Sein Forschungsschwerpunkt liegt auf der Entwicklung innovativer mikrofluidischer Systeme zur präzisen Synthese von Nanopartikeln.

Die Herausforderung: Präzision in der Nanowelt

Pharmazeutische Wirkstoffe und mRNA-Moleküle, wie zum Beispiel für Impfstoffe, werden in Nanopartikel verpackt, um sie effektiv an ihr Ziel im Körper zu transportieren. Die Größe und Monodispersität dieser Partikel sind entscheidend für ihre Wirksamkeit, Stabilität und Bioverfügbarkeit. Konventionelle Herstellungsverfahren basieren häufig auf Batch-Prozessen, gefolgt von einer Offline-Größenbestimmung (z. B. mittels Dynamischer Lichtstreuung, DLS). Dieses Vorgehen ist zeitaufwendig, fehleranfällig und erlaubt keine Echtzeitkontrolle des Produktionsprozesses.

Mikrofluidische Mischer, in denen ein organisches Lösungsmittel und ein wässriges Antilösungsmittel präzise vermischt werden, um die Nanopartikel auszufällen, versprechen eine wesentlich bessere Kontrolle. Frühere Ansätze litten jedoch häufig unter Problemen wie Kanalkorrosion/Verstopfung (Fouling) und der Unmöglichkeit, die Partikelgröße während der Synthese zu messen, da die Strömungsprofile in Mikrokanälen eine herkömmliche DLS-Analyse verhindern (**Bild 2**).

Die Lösung: Ein System aus smartem Mischer und Messmethode

Im Zentrum der ausgezeichneten Arbeit steht der am IMT entwickelte Low-Aspect-Ratio Lamination Mixer (LARLM). Dieser

Mikromischer wurde mittels Zwei-Photonen-Polymerisation (2PP), einer Art 3D-Druck mit Nanometer-Präzision, gefertigt.

Seine einzigartige Geometrie injiziert die organische Phase in Form eines nur etwa 7 μm dünnen Films, der vollständig von der wässrigen Phase umgeben in den Hauptkanal eintritt (Bild 3a und b). Dies bringt drei entscheidende Vorteile:

→ **Kein Fouling:** Die organische Phase berührt niemals die Kanalwände – dies verhindert Verstopfungen und erlaubt einen stabilen, langfristigen Betrieb.

→ **Ultraschnelle Diffusion:** Der dünne Film ermöglicht extrem schnelles und homogenes Mischen durch Diffusion, was zu einer hohen Nukleationsrate und somit zu kleinen, monodispersen Nanopartikeln führt.

→ **Homogene Strömungsgeschwindigkeit:** Der Partikelfilm positioniert sich im Zentrum des Kanals, genau im Maximum des parabolischen Strömungsprofils. Dadurch bewegen sich alle Nanopartikel nahezu mit identischer Geschwindigkeit.

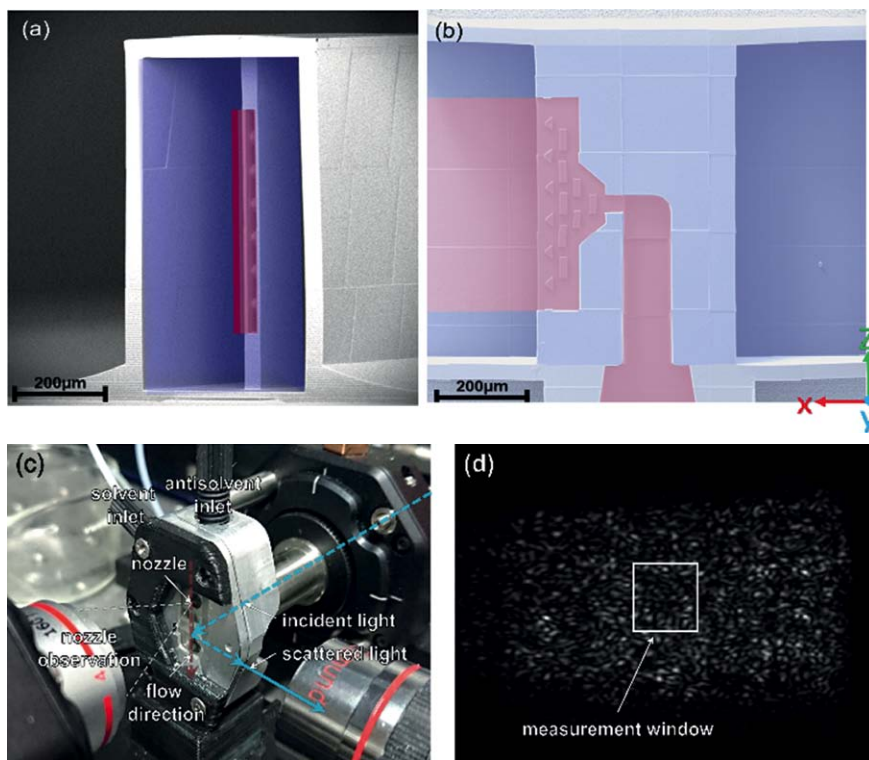


Bild 3. a) REM-Aufnahme der LARLM-Düse für die Lösungsmittelinjektion; b) Innenansicht mit vier Reihen von Strömungshomogenisierungs-Barrieren; c) optischer Aufbau mit eingebautem LARLM-Chip. d) Speckle-Bild von synthetisierten Partikeln, aufgenommen mit der Detektionskamera.

Mehrkanal-Digitizer

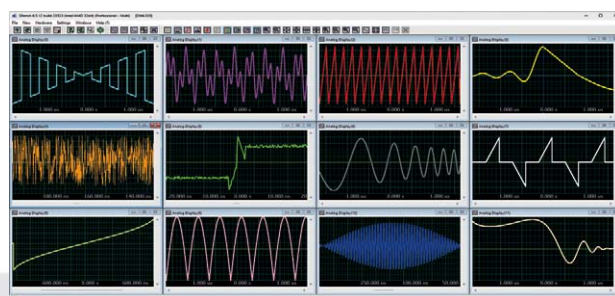
NEU!

SEHR EINFACH

- Verbindung über Ethernet/LXI zu jedem PC oder Netzwerk
- Treiber installieren (Windows oder Linux) und loslegen!
- SDKs für C++, Python, MATLAB, LabVIEW etc.
- Leistungsstarke Software-Tools enthalten

SEHR SCHNELL

- Bis zu 6 Kanäle mit 10 GS/s Abtastrate
- Bis zu 12 Kanäle mit 5 GS/s Abtastrate
- 12 Bit Auflösung
- Bis zu 8 GSample Speicher pro Kanal



DN6.33x (15 verschiedene Modelle)



SPECTRUM
INSTRUMENTATION

Perfect fit – modular designed solutions



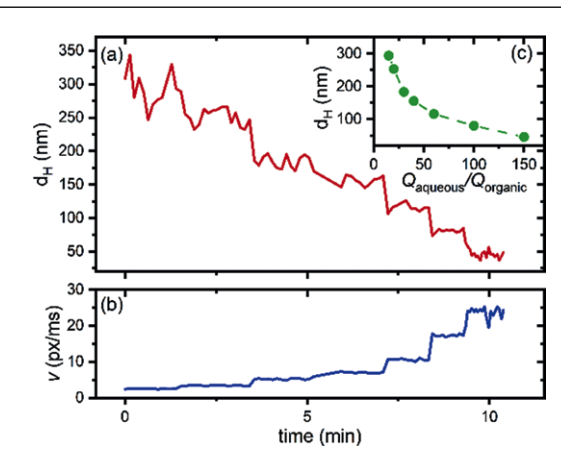


Bild 4. Lipid-Nanopartikel-Durchmesser (a) und Geschwindigkeitsmessungen $Q_{organic} = 2,5 \mu\text{l/min}$ und Durchflussrate $Q_{aqueous}$ (b) variierten während des Experiments im Laufe der Zeit; c) Abhängigkeit des in situ bestimmten Nanopartikel-Durchmessers, ermittelt aus $Q_{aqueous} / Q_{organic}$.

Der dritte Punkt bildet den Schlüssel zur neuartigen Messtechnik: Da sich die Partikel mit nahezu identischer Geschwindigkeit bewegen, können die störenden

Effekte der Scherströmung bei der Lichtstreuung kompensiert werden. Diese Technologie wird flowDLS (flow-compensated Dynamic Light Scattering) genannt. Das flowDLS-Setup (Bild 3c) nutzt eine CMOS-Kamera anstelle eines herkömmlichen Photomultipliers, um zweidimensionale Speckle-Bilder des gestreuten Lichts der strömenden Partikel aufzunehmen (Bild 3d). Durch speziell entwickelte Algorithmen zur Autokorrelationskorrektur wird die konvektive Bewegung der Partikel rechnerisch eliminiert, sodass der hydrodynamische Durchmesser (dH) und der Polydispersitätsindex (PDI) der Nanopartikel live und in Echtzeit bestimmt werden können (Bild 4a, b und c).

Die Perspektive: Von der Grundlagenforschung zur industriellen Anwendung

Die Arbeit von Taiedinejad stellt einen Paradigmenwechsel dar. Erstmals ist es möglich, Nanopartikel nicht nur kontinuierlich und ohne Fouling zu produzieren, sondern auch ihren Bildungsprozess direkt und ver-

zögerungsfrei zu beobachten. Das eröffnet völlig neue Möglichkeiten:

→ **Feedback-Kontrolle:** Der Produktionsprozess kann in Echtzeit anhand der gemessenen Partikelgröße geregelt werden, um eine gleichbleibende, optimale Produktqualität sicherzustellen.

→ **Beschleunigte Prozessentwicklung:** Einflussgrößen wie Strömungsverhältnisse oder Temperatur können innerhalb weniger Minuten systematisch bestimmt werden, statt wie bisher innerhalb tagelanger Offline-Analysen.

→ **Grundlagenforschung:** Nukleation und Partikelwachstum können mit bisher unerreichter zeitlicher Auflösung untersucht werden.

Die in der Arbeit geschilderte Innovation, entwickelt in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IMM in Mainz, hat das Potenzial, den Weg für eine neue Ära der kontrollierten und analysierbaren Nanopartikelproduktion zu ebnen – nicht nur für die pharmazeutische Industrie, sondern für alle Bereiche, in denen Nanomaterialien mit definierten Eigenschaften eine Schlüsselrolle spielen. ih