



Smart Dust und Micro Robots im industriellen Sektor

Chancen, offene Punkte und Handlungsempfehlungen

Manuel Holler  · Christian Dremel · Benjamin van Giffen · Rainer Fuchs

Eingegangen: 4. Juni 2020 / Angenommen: 30. September 2020 / Online publiziert: 15. Oktober 2020
© Der/die Autor(en) 2020

Zusammenfassung Neben der massiven Erhöhung der Leistungsfähigkeit ist die radikale Miniaturisierung von Technologien ein zentraler Aspekt des digitalen Zeitalters – auch im Bereich der Robotik. In diesem Kontext stellen Smart Dust und Micro Robots mikro-elektro-mechanische Systeme im Sub-Millimeter-Bereich dar, je nach Ausprägung mit Sensorik-, Verarbeitungs-, Kommunikations- und Aktuatorikfähigkeiten ausgestattet. Dieser praxisorientierte Beitrag beschäftigt sich mit der Rolle von Smart Dust und Micro Robots im industriellen Sektor auf der Evidenzgrundlage von Fokusgruppen mit Industrievertretern. Interessierten Fach- und Führungskräften wird aufgezeigt, welche Potentiale resultieren, welche Hürden gemeistert werden müssen und welche strategische Aktivitäten es zur wertschöpfenden Nutzung in die Wege zu leiten gilt. Auch wenn heute in der Praxis noch schwierig umzusetzen, erkennt die Industrie diese Technologien und den damit verbundenen Mehrwert durchaus an.

M. Holler (✉) · R. Fuchs

Product Management Center, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften,
Theaterstrasse 17, 8400 Winterthur, Schweiz
E-Mail: manuel.holler@zhaw.ch

R. Fuchs

E-Mail: rainer.fuchs@zhaw.ch

C. Dremel

Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, Otto-Friedrich-Universität Bamberg, An der
Weberei 5, 96047 Bamberg, Deutschland
E-Mail: christian.dremel@uni-bamberg.de

B. van Giffen

Institut für Wirtschaftsinformatik, Universität St. Gallen, Müller-Friedberg-Strasse 8, 9000 St.
Gallen, Schweiz
E-Mail: benjamin.vangiffen@unisg.ch

Schlüsselwörter Smart Dust · Micro Robots · Mikro-elektro-mechanische Systeme · Robotik · Chancen · Offene Punkte · Handlungsempfehlungen · Fokusgruppe · Industrieller Sektor · DACH-Region

Smart Dust and Micro Robots in the Industrial Sector

Opportunities, Open Points and Recommendations for Action

Abstract In addition to the massive increase in performance, the radical miniaturization of technologies is a central aspect of the digital age—also in the field of robotics. In this context, Smart Dust and Micro Robots represent micro-electro-mechanical systems in the sub-millimeter range, equipped with sensor, processing, communication and actuation capabilities, depending on their characteristics. This practice-oriented paper deals with the role of Smart Dust and Micro Robots in the industrial sector based on evidence from focus groups with industry representatives. Interested experts and managers are shown which potentials result, which hurdles need to be mastered and which strategic activities have to be initiated for a value-added use. Although still difficult to implement in practice at present, the industry does recognize these technologies and the added value they bring.

Keywords Smart Dust · Micro Robots · Micro-electro-mechanical systems · Robotics · Opportunities · Open Points · Recommendations for action · Focus group · Industrial sector · DACH region

1 Smart Dust und Micro Robots im industriellen Sektor

Smart Dust und Micro Robots beschreiben mikro-elektro-mechanische Systeme in der Größenordnung von einem Kubikmillimeter und darunter (Dario et al. 1992; Warneke et al. 2001). Während beide Ausprägungen sowohl Verarbeitungs- wie auch Kommunikationsfähigkeiten aufweisen, zeichnet sich Smart Dust lediglich durch sensorische (fühlende) Eigenschaften (Kahn et al. 2000; Warneke et al. 2001) aus, während Micro Robots zusätzlich aktuatorische (bewegende) Funktionalitäten (Dario et al. 1992; Abbott et al. 2007) ermöglichen.

Basierend auf visionären Anwendungsfällen wie minimal-invasiver Inspektion und Chirurgie entstanden erste Ideen bereits vor über 30 Jahren in Kalifornien (Warneke et al. 2001; Ilyas und Mahgoub 2018). Konkretisiert durch Prototypen für militärische Anwendungen wie die Überwachung feindlicher Truppenbewegungen waren die folgenden Jahrzehnte von technologischer Forschung im Labor-, IT- und Start-Up-Umfeld geprägt, wohingegen bis auf wenige Leuchtturmanwendungen der Einsatz in der realen Welt trotz hohem wirtschaftlichen Potential vernachlässigt wurde (Dario et al. 1992; Warneke et al. 2001).

Vor dem Hintergrund der grundsätzlichen Machbarkeit adressiert der vorliegende Beitrag die Rolle von Smart Dust und Micro Robots im industriellen Sektor. Dieser wirtschaftlich bedeutsame und gleichermaßen innovationsabhängige wie -affine Sektor (McKinsey 2018) zeichnet sich als spannendes Untersuchungsumfeld ab. Als Resultat zunehmender Technologiematurität und geringem Verständnis über Nut-

zenpotentiale (Webster und Watson 2002; Müller-Bloch und Kranz 2015) stehen die folgenden forschungsleitenden Fragen im Zentrum:

- [FF1] Welche Chancen sehen Praktiker im industriellen Sektor für derartige Technologien?
- [FF2] Welche offenen Punkte nimmt diese Zielgruppe wahr, die mit einem industriellen Einsatz einhergehen?
- [FF3] Welche Handlungsempfehlungen können aus diesen Erkenntnissen abgeleitet werden?

Aus methodischer Sicht greift dieser empirische Beitrag auf Fokusgruppen (Morgan 1988; Tremblay et al. 2010) mit Produkt- und Innovationsmanagern aus der DACH-Region zurück.

In Anknüpfung an diese Einführung ist der Beitrag in vier Teile gegliedert: Der erste Abschnitt befasst sich mit den Gemeinsamkeiten und Unterschieden von Smart Dust und Micro Robots. Der zweite Abschnitt beleuchtet die Forschungsmethodik Fokusgruppe und ihre Durchführung. Der dritte Abschnitt präsentiert die Resultate in Form von Chancen und offenen Punkten. Der vierte Abschnitt offeriert neben abschließender Diskussion und Handlungsempfehlungen auch den Nutzen des Beitrags, Limitationen und einen Ausblick.

2 Smart Dust und Micro Robots: Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Historisch gesehen stammen erste Überlegungen zur Thematik aus der kompetitiven Fragestellung, wie stark mikro-elektro-mechanische Systeme miniaturisiert werden können (Warneke et al. 2001). Im Detail beschreibt einer der Gründungsväter Smart Dust als ein „*autonomes Erfassungs-, Rechen- und Kommunikationssystem, das in ein Kubikmillimeter-Korn verpackt werden kann, um die Grundlage für integrierte, massiv verteilte Sensornetzwerke zu bilden*“ (Warneke et al. 2001, S. 44), wobei durch das „*Hinzufügen von Beinen oder Flügel Micro Robots entstehen*“ (Warneke et al. 2001, S. 46). Die folgende Sektion beschreibt zentrale Aspekte sowie die resultierende Forschungslücke basierend auf einer Literaturanalyse nach den Empfehlungen von Webster und Watson (2002).

Mit feingranularer Sensorik von Parametern wie Temperatur, Druck oder Feuchtigkeit agiert Smart Dust typischerweise als verteiltes Netzwerk in Gasen, Flüssigkeiten oder Feststoffen (Gorder 2003). Theoretische Anwendungen beschreiben in etwa Ilyas und Mahgoub (2018) im Landwirtschafts- (Messung von Wasser- und Nährstoffgehalt im Boden), im Infrastruktur- (Verkehrsflussmessung von Fahrzeugen) oder gar im Gesundheitsbereich (Thrombosewarnung in Blutgefäßen). Aktuatoren der Micro Robots in Form von Beinen oder Flügeln können dabei intern oder extern angetrieben werden (Ceylan et al. 2017). Spekulative Einsatzgebiete sieht Dario et al. (1992) in der Medizintechnik (Medikamentendosierung im Körper), im Freizeitbereich (tangibles Fernsehen für Blinde) oder in der Geologieforschung (Erkundung von engen Spalten).

Beiden gemeinsam ist das umgekehrte Verhältnis von Größe zu Funktionsumfang. Sollen komplexe sensorische und aktuatorische Fähigkeiten Anwendung finden, be-

nötigen diese viel Bauraum und umgekehrt (Dario et al. 1992; Warneke et al. 2001). Als essentieller Unterschied agieren Micro Robots im Vergleich zu Smart Dust-Körnern eher als individuelle Einheiten (Abbott et al. 2007). In Hinblick auf die eingeführte Größenordnung finden sich dabei zahlreiche Spielarten. Neben ähnlichen Begriffen wie *Intelligent Dust* dominieren größere *Brilliant Rocks* mit hoher Funktionalität und dem Ziel einer Mehrfachverwendung (Satyanarayanan 2003). Analog sind neben den minimalistischen *Micro Machines* voluminösere *Synthetic Insects* in Entwicklung, welche sich in der Größenordnung ihrer lebenden Verwandten bewegen (Dario et al. 1992; Abbott et al. 2007).

Für die technischen Teilfragestellungen wurden eine Reihe an Lösungsoptionen erarbeitet, wie für die Energiebereitstellung (Batterie, Solarzelle, *Energy Harvesting*) oder die Kommunikation (Optisch, Radiowellen) (Warneke et al. 2001). Insbesondere unter einer bestimmten Größenordnung findet ein Übergang von klassischen mikro-elektro-mechanischen Systemen hin zu biologischen und chemischen Ansätzen statt (Abbott et al. 2007; Dong und Nelson 2007). Angesichts der rapiden Fortschritte gewinnen aktuell beide Manifestationen an Aufmerksamkeit in der Wirtschaft (Wall Street Journal 2018). Mit zahlreichen Unternehmen wie IBM oder CubeWorks ist Smart Dust dabei tendenziell stärker in Richtung Kommerzialisierung unterwegs, während sich Micro Robots eher noch im Laborzustand befinden (Gartner 2018; Huber 2018). Bei einer Foresight-Betrachtung, ab wann die diskutierten Technologien marktreif sein könnten, herrscht aber nach wie vor große Unsicherheit. Während einzelne Innovationsführer den Eindruck vermitteln, die Einführung stehe in Kürze bevor (IBM 2019), sehen unabhängige Analysten eine Mainstream-Adaption erst in rund zehn Jahren (Gartner 2018).

Mit einem Blick auf den Untersuchungskontext des industriellen Sektors lässt sich abschließend eine wissensorientierte Forschungslücke (Müller-Bloch und Kranz 2015) ableiten, da für Fach- und Führungskräfte kaum branchenspezifische Erkenntnisse über das Potential und notwendige Aktivitäten zur Nutzung dieser Technologien vorliegen.

3 Forschungsmethodik: Fokusgruppen

Ziel des Beitrags ist es, die Rolle von Smart Dust und Micro Robots im industriellen Sektor besser zu verstehen. Um dieses Ziel zu erreichen, findet das Paradigma der Fokusgruppenforschung (Morgan 1988; Tremblay et al. 2010) Anwendung. Gemäß Powell und Single (1996, S. 499) definieren die Autoren eine Fokusgruppe als eine „Gruppe von Personen, die von den Forschern ausgewählt und versammelt wurden, um basierend auf persönlicher Erfahrung den Forschungsgegenstand zu diskutieren und zu kommentieren“.

Neben dem zentralen Entscheidungskriterium „aus der Praxis für die Praxis“ beschreibt Zikmund (1997) mit seinen „zehn S“ zahlreiche Vorteile, wobei für den vorliegenden Beitrag besonders folgende Aspekte relevant sind: Vor dem Hintergrund, dass nur wenige Erfahrungen oder gar echte Implementierungen bestehen, offeriert ein Fokusgruppenansatz eine gedankliche Anregung (*Stimulation*), Synergie- (*Synergy*) und Weiterentwicklungseffekte (*Snowballing*). Weiterhin bietet ein derartiges

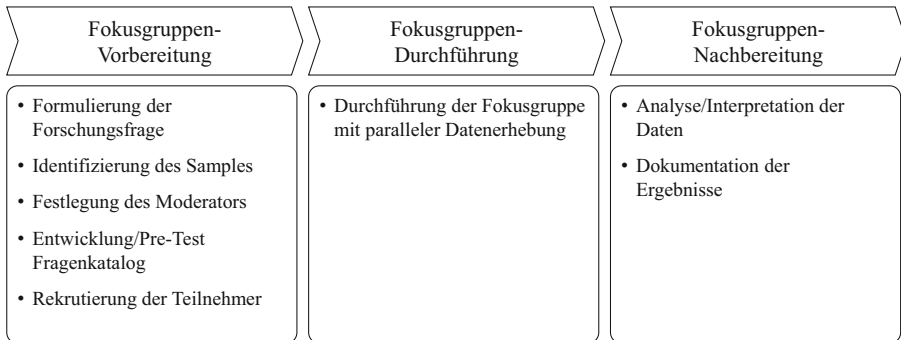


Abb. 1 Forschungsprozess gemäß Tremblay et al. (2010)

Verfahren gemeinsame, abgesicherte Perspektiven auf den Untersuchungsgegenstand (*Scrutiny*), welche einen positiven Einfluss auf die Ergebnisqualität bewirken. Der wirtschaftlich bedeutsame und gleichermaßen innovationsabhängige wie -affine industrielle Sektor (McKinsey 2018) stellt in diesem Zusammenhang ein hochrelevantes Forschungsumfeld dar.

Über fünf Dekaden an qualitativer Forschung haben zahlreiche methodische Grundsätze hervorgebracht (Myers 2013). Im Sinne einer Orientierung an der Wirtschaftsinformatik folgen die Autoren den etablierten Empfehlungen von Tremblay et al. (2010), ergänzt durch Fokusgruppen-spezifische (Morgan 1988; Wilkinson 1998) und generelle qualitative (Miles und Huberman 1994; Coyne 1997) Richtlinien. Abb. 1 visualisiert den Forschungsprozess gemäß Tremblay et al. (2010).

In Bezug auf die Vorbereitung formulieren die Autoren die beiden fokussierten Forschungsfragen nach Chancen und offenen Punkten, aus denen Handlungsempfehlungen abgeleitet werden (Webster und Watson 2002; Müller-Bloch und Kranz 2015). Aufgrund des geringen Reifegrads der Forschungsdomäne findet die explorative Variante (Tremblay et al. 2010) Anwendung. Für das angestrebte Ziel der Informationssättigung (Myers 2013) wurden eine pilotierende (Pre-Test mit 6 Teilnehmern), eine zentrale (Hauptdurchführung mit 15 Teilnehmern) und eine klärende (Nachbereitung mit 3 Teilnehmern) Fokusgruppe durchgeführt. Im Sinne eines *Purposeful Sampling* (Coyne 1997) rekrutierten die Autoren dazu Produkt- und Innovationsmanager aus dem industriellen Sektor aus Deutschland, Österreich und der Schweiz (Schwerpunkt). Dieses Sample wurde durch persönliches Netzwerk und im Rahmen einer Digitalisierungskonferenz ohne Vergütung generiert. Entsprechend den Teilzielen waren die Teilfokusgruppen geprägt durch Methodenexperten, Industrievertreter mit breit gestreuten Hintergründen, Funktionen und Branchenzugehörigkeiten (*Maximum Variation Sampling*, Coyne 1997) sowie Spezialisten mit vertieftem Vorwissen zu mikro-elektro-mechanischen Systemen.

Für die eigentliche Durchführung der Runden wurden zwei wissenschaftliche Mitarbeiter kompetenzbasiert (Tremblay et al. 2010) als Moderatoren ausgewählt. Alle Fokusgruppen fanden im Februar 2020, März 2020 und Mai 2020 (virtuell) mit einer Dauer von rund 60 min im Großraum Zürich statt. Der Fragenkatalog bestand aus einer einleitenden Zielvorstellung, Einführung über die Thematik und einem

interaktiven Diskussionsteil, welcher in der pilotierenden Ausführung im Sinne eines Pre-Tests (Tremblay et al. 2010) adaptiert wurde. Besonderer Wert wurde auf die Dokumentation gelegt, welche durch ein digitales Tool realisiert wurde. Weiterhin wurden in einer direkten Nachbesprechung essentielle Punkte notiert.

Bezüglich der Nachbereitung fokussieren die Autoren gemäß Wilkinson (1998) auf eine inhaltliche Auswertungsstrategie. Basis hierfür stellen der Auszug des digitalen Tools sowie das Protokoll der Nachbesprechung dar. Im Detail Tremblay et al. (2010) folgend werden anerkannte Analysemethoden (Miles und Huberman 1994) zur systematischen Aggregation der in den Fokusgruppen getätigten Aussagen adaptiert. Diese Synthese in mehreren Stufen und Iterationen gemäß der gestellten Forschungsfragen (Miles und Huberman 1994) erfolgte computergestützt. Entstehende Unklarheiten wurden dabei insbesondere in der abschließenden klärenden Fokusgruppe aufgearbeitet.

Neben Relevanz stellt die Rigorosität ein zentrales Kriterium dar. Für den vorliegenden Beitrag wurden qualitätssteigernde Maßnahmen nach Tremblay et al. (2010) angewendet, wie etwa Triangulation (mehrere Sessions, Moderatoren und Autoren).

4 Smart Dust und Micro Robots: Chancen und offene Punkte

4.1 Vielfältige Nutzenpotentiale für beide Ausprägungen

In Bezug auf [FF1] *Welche Chancen sehen Praktiker im industriellen Sektor für derartige Technologien?* zeigen sich vielfältige Nutzenpotentiale für beide Ausprägungen. Abb. 2 kontrastiert die Chancen von Smart Dust und Micro Robots im industriellen Sektor.

Im Bereich Smart Dust beschreibt ein erstes Feld *Anforderungserhebung/-verfeinerung/-validierung* das Requirements Engineering von unbekanntem, nicht ausreichend detaillierten oder potentiell mit Fehlern behafteten Anforderungen im Kontext der Produktentwicklung. Hochauflösende Daten über die tatsächliche Produktnutzung optimieren so das Anforderungsmanagement für kommende Produktgenerationen. Als konkreter Anwendungsfall wurde in der Fokusgruppe die Spezifizierung basierend auf unterschiedlichen Maschinenstandorten diskutiert. Ein zweites Feld

Smart Dust	Micro Robots
<ul style="list-style-type: none"> • Anforderungserhebung/-verfeinerung/-validierung • Überwachung von Logistikprozessen • Gas- und Flüssigkeitsmessungen • Materialüberwachung in Feststoffen • Miniatur-Sensorik 	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptive Oberflächen • Inspektion und Wartung • Lokation und Zusammenbau

Abb. 2 Chancen von Smart Dust und Micro Robots im industriellen Sektor

Überwachung von Logistikprozessen fasst das Tracking von Rohstoffen und Produkten bei Transportprozessen innerhalb und außerhalb des eigenen Unternehmens zusammen. Die so zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort nachverfolgbaren sowie mit weiteren Sensordaten angereicherten Güter stellen die Basis für bessere, aber auch für neue Logistikansätze dar. In diesem Feld nannten die Teilnehmer zahlreiche Anwendungen, von einer Verfolgung der Materialherkunft (seltene Erden) über ein Monitoring des Lieferwegs (politische Embargos) bis hin zu einer Schocküberwachung (stoßempfindliche Güter). Ein drittes Feld *Gas- und Flüssigkeitsmessungen* umfasst die Infusion von Smart Dust in Gase und Flüssigkeiten aller Art in verteilter Form. Die Produkt- und Innovationsmanager sehen großes Potential in zahlreichen Use Cases, wie etwa der hochauflösenden Messung des Verschmutzungsgrads von Öl, der Geschwindigkeitsbestimmung von Luftströmungen oder Leckagewarnungen bei kritischen Rohrsystemen. Ein viertes Feld *Materialüberwachung in Feststoffen* geht in eine ähnliche Richtung und zielt auf die Verteilung von Smart Dust in Festkörper wie Metall oder Kunststoff ab. Die Experten erkennen vielfältige Anwendungen im Bereich verteilter statischer und dynamischer Festigkeitsmessungen in sicherheitskritischen Bauteilen (z. B. Bremskomponenten) bis hin zur langfristigen Alterungsvorhersage von Materialien (z. B. Kunststoffe). Schließlich summiert ein fünftes Feld *Miniatur-Sensorik* sämtliche technische Anwendungen, bei denen die geringe Größe und weiträumige Verteilung von Smart Dust-Sensorik genutzt wird. Ein Unternehmensvertreter nannte hier etwa Temperaturmessungen bei schnell drehenden Teilen, bei welchen konventionelle Messtechnik aufgrund hoher Fliehkräfte nur bedingt einsetzbar ist.

Im Bereich Micro Robots repräsentiert ein erstes Feld *Adaptive Oberflächen* die flächige Ausstattung von aero- oder fluiddynamischen Oberflächen mit Micro Robots. Basierend auf den gemessenen Parametern (z. B. Strömungsgeschwindigkeit) kann die Oberfläche durch gezielte Steuerung der Aktuatoren verschiedene Strukturen annehmen, um den Strömungswiderstand zu verringern oder zu erhöhen. Aufgrund der Komplexität sehen Industrievertreter diese Anwendungen eher im Hochtechnologiebereich wie der Luft- und Raumfahrt. Ein zweites Feld *Inspektion und Wartung* bildet sämtliche Inspektions- und Wartungsarbeiten im Anwendungsbereich kleiner Geometrien mit nicht vorhandener Austauschbarkeit ab. Hier erkennen die Experten Einsatzmöglichkeiten für Micro Robots bei wenig anspruchsvollen Wartungsarbeiten, wie beispielsweise der Befreiung von Ablagerungen. Final beschreibt ein drittes Feld *Lokation und Zusammenbau* die Unterstützung durch Micro Robots im Montageumfeld. Derartige Fallbeispiele wie die hochgenaue Positionierung von Bauteilen finden besonders im Elektronik- oder Uhrenbereich Anwendung, wo es auf höchste Präzision ankommt.

4.2 Multidimensionale Herausforderungen vor wertschöpfender Nutzung

Bezüglich [FF2] *Welche offenen Punkte nimmt diese Zielgruppe wahr, die mit einem industriellen Einsatz einhergehen?* sehen die Praktiker multidimensionale Herausforderungen, die vor einer wertschöpfenden Nutzung zu adressieren sind. Abb. 3 gruppiert zentrale offene Punkte von Smart Dust und Micro Robots im industriellen Sektor.

Technische Aspekte	Wirtschaftliche Aspekte	Soziale Aspekte	Umweltbezogene Aspekte
<ul style="list-style-type: none"> • Tatsächliche Leistungsmerkmale: Energieversorgung, Sendestärke • Lebenszyklus: Applizierung und Updatefähigkeit • Integration in betriebliche Informationssysteme 	<ul style="list-style-type: none"> • Intransparenter Markt über Anbieter- und Kostenstrukturen • Kosten-Nutzen-Verhältnis der diskutierten Use Cases 	<ul style="list-style-type: none"> • Schwierige Kundenakzeptanz in B2C-, aber auch B2B-Branchen • Datenschutzbedenken durch Unsichtbarkeit • Sicherheitsbesorgnisse im Kontext kritischer Anwendungsfelder 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachhaltigkeit: Einsammlung und Entsorgung nach Verwendung • Gesundheit: Schädigung durch Mikroplastik

Abb. 3 Offene Punkte von Smart Dust und Micro Robots im industriellen Sektor

Technisch werden in erster Linie Herausforderungen durch unsichere Leistungsmerkmale (Dauer der Energieversorgung, Sendestärke in Feststoffen) wahrgenommen. Weitere Aspekte beruhen auf Unwägbarkeiten bezüglich des technischen Lebenszyklusmanagements (Applizierung und Updatefähigkeit) und der Integration in betriebliche Informationssysteme (Product Lifecycle Management und Enterprise Resource Planning). Wirtschaftlich wird der Markt, insbesondere auf Anbieter- und Kostenseite und im Vergleich zu etablierten Technologien wie Cloud-Computing, als sehr intransparent angesehen. Auch das Kosten-Nutzen-Verhältnis der diskutierten Use Cases stellt viele Teilnehmer vor Fragen (Helfen noch genauere Anforderungen wirklich, bessere Produkte zu bauen?). Sozial stellt die grundsätzlich schwierige Kundenakzeptanz dieser miniaturisierten Datensammler einen bedeutsamen Punkt dar. Insbesondere dominieren an dieser Stelle Datenschutzbedenken aufgrund der Unsichtbarkeit und Sicherheitsbesorgnisse bei kritischen Anwendungsfeldern wie Rechenzentren. Ergänzend zu diesen Themen spielen auch umweltbezogene Punkte eine essentielle Rolle. Es stellen sich Fragen der Nachhaltigkeit (Wie kann mikroskopischer Smart Dust nach seinem Einsatz wieder eingesammelt werden?) und der Gesundheit (Wie kann mit losem Smart Dust außerhalb geschlossener Systeme in Bezug auf eine mögliche Schädigung durch Mikroplastik umgegangen werden?).

5 Diskussion und Handlungsempfehlungen

Der vorliegende Beitrag adressiert die Rolle von Smart Dust und Micro Robots im industriellen Sektor, insbesondere in Hinblick auf Chancen und offene Punkte. Auf einer Datenbasis von Fokusgruppen mit Produkt- und Innovationsmanagern konnten insgesamt acht Anwendungs- und vier Herausforderungsfelder identifiziert werden.

In Hinblick auf die Chancen zeigen die Daten eine Tendenz in Richtung Sensorik, aktuatorische Anwendungen finden sich bedeutend seltener. Ein Grund hierfür mag in der verbreiteten Beschäftigung mit Sensor- und IoT-Technologien liegen (Deuker und Meinhardt 2019; Knoll und Strahinger 2019), während komplexe Robotik-Themen erst langsam Einzug in die Industrie finden. In Bezug auf den Lebenszyklus lässt sich ein weiterer Schwerpunkt der Anwendungen in der Pro-

duktentwicklung (Smart Dust) sowie der Produktnutzungsphase (Smart Dust, Micro Robots) erkennen. Mögliche Erklärungen sind hier durch das wichtige Frontloading im Produktlebenszyklusmanagement und den teilweise sehr langen Lebenszyklen von industriellen Gütern (Stark 2015) gegeben. Ein Vergleich mit der analysierten Literatur (Dario et al. 1992; Ilyas und Mahgoub 2018) zeigt, dass in der Industrie aktuell weniger die visionären, sondern vielmehr evolutionäre Use Cases als Weiterentwicklung bekannter Sensorik und Aktuatorik Anklang finden. Auch wenn heute in der Praxis noch schwierig umzusetzen, erkennt die Industrie diese Technologien und den damit verbundenen Mehrwert durchaus an.

Spannend ist diesbezüglich auch eine Gegenüberstellung mit möglichen Alternativtechnologien. Zum einen sind Felder wie *Überwachung von Logistikprozessen* durch auto-ID-Technologien (Shamsuzzoha et al. 2013) und *Adaptive Oberflächen* durch nanotechnologische Materialien (Bhushan 2017) schon heute in vereinfachter Form realisierbar. Zum anderen finden sich mit *Gas- und Flüssigkeitsmessungen* und *Inspektion und Wartung* aber auch Anwendungen, die in der genannten Form mit aktuellen Technologien noch nicht erschließbar sind. Somit wird klar, dass das Innovationspotenzial in spezifischen Nischen mit hohen Anforderungen liegt.

Mit Verweis auf die offenen Punkte ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei vielen aufstrebenden digitalen Innovationen – ein heterogenes Spannungsfeld, dessen Lösung verschiedene Anspruchsgruppen und Disziplinen erfordert. Weiterhin fällt auf, dass Praktiker in diesem frühen Stadium bezüglich der Herausforderungen kaum zwischen Smart Dust und Micro Robots unterscheiden. Neben den in der Forschung diskutierten „harten“ Kriterien wie Energieversorgung und Kommunikation (Dario et al. 1992; Warneke et al. 2001) nehmen in der Industrie insbesondere auch die „weichen“ Faktoren wie Kundenakzeptanz und Nachhaltigkeit großen Raum ein.

Entsprechend [FF3] *Welche Handlungsempfehlungen können aus diesen Erkenntnissen abgeleitet werden?* zeigen die identifizierten Chancen und offenen Punkte gleichermaßen Empfehlungen für das Management von Smart Dust und Micro Robots auf. Abb. 4 fasst Handlungsempfehlungen für Anwender im industriellen Sektor zusammen.

Handlungsempfehlung 1	Berücksichtigung von Smart Dust und Micro Robots im Innovationstunnel des Unternehmens
Handlungsempfehlung 2	Identifizierung von internen und externen Anwendungspotentialen für Smart Dust und Micro Robots
Handlungsempfehlung 3	Entwicklung und Umsetzung einer Smart Dust- und Micro Robots-Strategie mit Berücksichtigung kritischer Faktoren und bestehender Ansätze

Abb. 4 Handlungsempfehlungen für Smart Dust und Micro Robots für Anwender im industriellen Sektor

Handlungsempfehlung 1: Berücksichtigung von Smart Dust und Micro Robots im Innovationstunnel des Unternehmens Im Sinne eines Technology-Push gilt es, die rapiden Technologie- und Marktentwicklungen zu beobachten. Auch wenn ein kurzfristiger Einsatz heute noch nicht absehbar ist, sollten diese für eine langfristige Implementierung im Auge behalten werden. *„Für uns sind diese Technologien ein absolut spannendes Thema, wenn auch noch ziemlich weit vom operativen Geschäft entfernt. IoT ist für uns eine wichtige Stoßrichtung, so dass wir nicht nur unsere Rohrsysteme, sondern auch deren Inhalte vernetzen können. Wir werden das definitiv auf dem Schirm behalten.“* (Abteilungsleiter Produktmanagement in einem internationalen Fluidtechnik-Unternehmen, Aussage aus Fokusgruppe 2 im Kanton Zürich im März 2020).

Handlungsempfehlung 2: Identifizierung von internen und externen Anwendungspotentialen für Smart Dust und Micro Robots Im Sinne eines Market-Pull gilt es analog, unternehmensintern und -extern nach wertschöpfenden Anwendungsmöglichkeiten zu fahnden. Entsprechend eines evolutionären Ansatzes sollten diese in einem ersten Schritt wenig kritische interne Use Cases sein und in einem letzten Ausbauschnitt Anwendungsfälle, die einen flächendeckenden Einsatz beim Kunden erfordern. *„Diese Devices bieten viele Potentiale, aber man sollte langsam und mit einfachen Cases starten. Davon kann man lernen, insbesondere auch für den Umgang mit den kritischen Themen.“* (Produktmanager in einem internationalen Logistik-Unternehmen, Aussage aus Fokusgruppe 2 im Kanton Zürich im März 2020).

Handlungsempfehlung 3: Entwicklung und Umsetzung einer Smart Dust- und Micro Robots-Strategie mit Berücksichtigung kritischer Faktoren und bestehender Ansätze Im Sinne einer Zusammenführung beider Punkte gilt es, eine passende Strategie zu gestalten und zu realisieren. Insbesondere sollte dieser Plan Lösungen für die sensiblen Themen wie Datenschutz und -sicherheit bieten. Auch eine enge Abstimmung und Verzahnung mit bereits vorhandenen IoT- (Smart Dust) und Robotik- (Micro Robots) Strategien bietet sich an. Ganz im Sinne der diskutierten Alternativen sollten dabei stets mögliche Ersatztechnologien berücksichtigt werden. *„Faktoren wie die Kundenakzeptanz werden entscheidend sein, aber wenn man die löst, dann ist Smart Dust eine tolle Sache.“* (Leitung Forschung in einem internationalen Fluidtechnik-Unternehmen, Aussage aus Fokusgruppe 3 im Kanton Zürich im Mai 2020).

Zentrale Nutznießer der Erkenntnisse in diesem Beitrag sind Anwender, die von den Potenzialen dieser miniaturisierten Geräte, aber auch Hersteller, die von kunden- und nutzerseitigem Wissen profitieren. Ganz im Sinne des sozio-technischen Paradigmas der Wirtschaftsinformatik (Bostrom und Heinen 1977) leistet dieser explorative Beitrag weiterhin einen Teil zum Verständnis von digitalen Innovationen (Skog et al. 2018), welcher nicht zuletzt auch für die Gesellschaft als Endanwender industrieller Produkte hochrelevant ist.

Trotz der rigorosen Durchführung ist dieser Beitrag nicht frei von möglichen Limitationen: Zum einen gehen diese mit der gewählten Methodik einher, die es zwar ermöglicht, gehaltvolle, aber keine populationsumfassenden Aussagen über die ge-

samte Industrie zu treffen (Tremblay et al. 2010). Zum anderen gilt es den gewählten Zeitpunkt zu berücksichtigen, der Erkenntnisse über den potentiellen Einsatz dieser noch nicht implementierten Technologien generiert (Zikmund 1997).

Der vorliegende Beitrag zeigt gleichermaßen zahlreiche Impulse für die Weiterentwicklung des noch jungen Feldes auf: Eine natürliche Fortführung dieser Arbeiten bietet sich in der Beantwortung der Forschungsfragen durch den Einsatz von Smart Dust und Micro Robots im echten industriellen Umfeld, um von Pilotversuchen zu lernen. Einen größeren Fokus sollte weiterhin auch die Berücksichtigung der verschiedenen Industriesparten einnehmen.

Funding Open access funding provided by ZHAW Zurich University of Applied Sciences. The authors of this research paper were supported by the Swiss National Science Foundation “Spark” program.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Abbott JJ, Nagy Z, Beyeler F, Nelson BJ (2007) Robotics in the small, part I: microbotics. *IEEE Robotics Autom Mag* 14:92–103
- Bhushan B (2017) Springer handbook of nanotechnology. Springer, Berlin, Heidelberg
- Bostrom RP, Heinen JS (1977) MIS problems and failures: a socio-technical perspective. Part I: the causes. *MISQ* 1:17–32
- Ceylan H, Giltinan J, Kozielski K, Sitti M (2017) Mobile microrobots for bioengineering applications. *Lab Chip* 17:1705–1724
- Coyne IT (1997) Sampling in qualitative research. Purposeful and theoretical sampling: merging or clear boundaries? *J Adv Nurs* 26:623–630
- Dario P, Valleggi R, Carrozza MC, Montesi MC, Cocco M (1992) Microactuators for microrobots: a critical survey. *J Micromech Microeng* 2:141–157
- Deuker R, Meinhardt S (2019) IoT best practices. *HMD Prax Wirtschaftsinform* 56:1091–1093
- Dong L, Nelson BJ (2007) Robotics in the small, part II: nanorobotics. *IEEE Robotics Autom Mag* 14:111–121
- Gartner (2018) Hype cycle for sensing technologies. www.gartner.com/en/documents/3883980/hype-cycle-for-sensing-technologies-2018. Zugegriffen: 18. Sept. 2020
- Gorder PF (2003) Sizing up smart dust. *Comput Sci Eng* 5:6–9
- Huber J (2018) Microrobots fly, walk and jump into the future. engineering.berkeley.edu/news/2018/11/microrobots-fly-walk-and-jump-into-the-future. Zugegriffen: 27. Apr. 2020
- IBM (2019) The world’s smallest computer. www.research.ibm.com/5-in-5/crypto-anchors-andblockchain. Zugegriffen: 18. Sept. 2020
- Ilyas M, Mahgoub I (2018) Smart dust: sensor network applications, architecture and design. CRC Press, Boca Raton
- Kahn JM, Katz RH, Pister KSJ (2000) Emerging challenges: mobile networking for smart dust. *J Commun Netw* 2:188–196
- Knoll M, Strahinger S (2019) Smarte Produkte. *HMD Prax Wirtschaftsinform* 56:491–493

- McKinsey (2018) Tech-enabled transformation—the trillion-dollar opportunity for industrials. www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/tech-enabled-transformation. Zugegriffen: 27. Apr. 2020
- Miles MB, Huberman AM (1994) *Qualitative data analysis: an expanded sourcebook*. SAGE, Thousand Oaks
- Morgan DL (1988) *Focus groups as qualitative research*. SAGE, London
- Müller-Bloch C, Kranz J (2015) A framework for rigorously identifying research gaps in qualitative literature reviews. 36th International Conference on Information Systems (ICIS), Fort Worth
- Myers MD (2013) *Qualitative research in business and management*. SAGE, Thousand Oaks
- Powell RA, Single HM (1996) Focus groups. *Int J Qual Health Care* 8:499–504
- Satyanarayanan M (2003) Of smart dust and brilliant rocks. *IEEE Pervasive Comput* 2:2–3
- Shamsuzzoha AHM, Ehrs M, Addo-Tenkorang R, Nguyen D, Helo PT (2013) Performance evaluation of tracking and tracing for logistics operations. *Int J Shipp Transport Logist* 5:31–54
- Skog DA, Wimelius H, Sandberg J (2018) Digital disruption. *Bus Inf Syst Eng* 60:431–437
- Stark J (2015) *Product lifecycle management: 21st century paradigm for product realisation*. Springer, London
- Tremblay MC, Hevner AR, Berndt DJ (2010) Focus groups for artifact refinement and evaluation in design research. *Communications of the AIS* 26: Article 27.
- Wall Street Journal (2018) Here comes smart dust, the tiny computers that pull power from the air. www.wsj.com/articles/here-comes-smart-dust-the-tiny-computers-that-pull-power-from-the-air-1541689224. Zugegriffen: 27. Apr. 2020
- Warneke B, Last M, Liebowitz B, Pister KSJ (2001) Smart dust: communicating with a cubic millimeter computer. *Computer* 34:44–51
- Webster J, Watson R (2002) Analyzing the past to prepare the future: writing a literature review. *MISQ* 26:xiii–xxiii
- Wilkinson S (1998) Focus group methodology: a review. *Int J Soc Res Methodol* 1:181–203
- Zikmund WG (1997) *Exploring marketing research*. The Dryden Press, Fort Worth