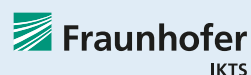
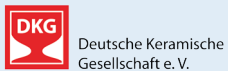
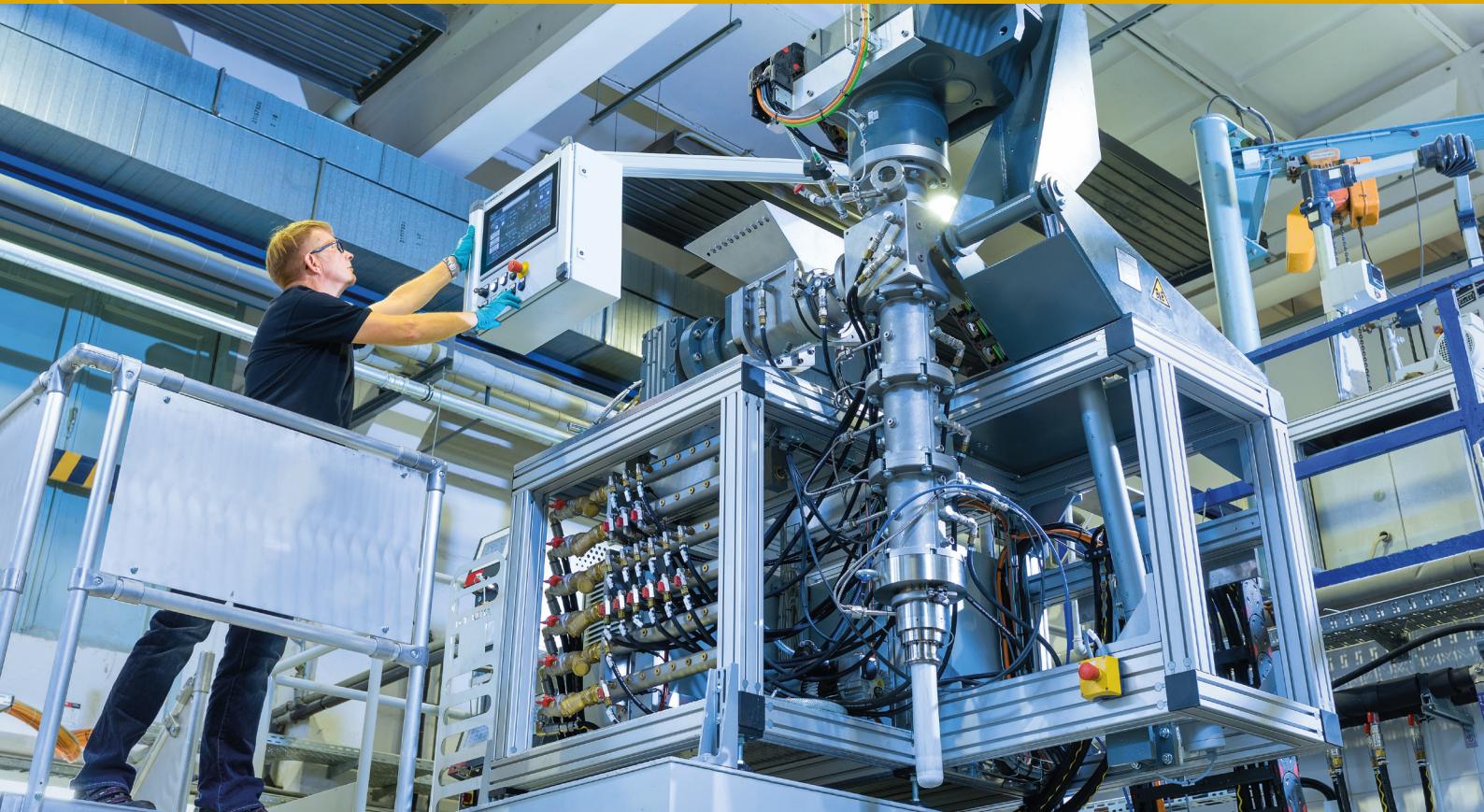


Strategiepapier

Digitalisierung der keramischen Fertigung – Herausforderungen und Chancen



Digitalisierung der keramischen Fertigung – Herausforderungen und Chancen

Herausgeber:

Gemeinschaftsausschuss ‚Hochleistungskeramik‘
der Deutschen Keramischen Gesellschaft (DKG) und
Deutschen Gesellschaft für Materialkunde (DGM)

Deutsche Keramische Gesellschaft e. V. (DKG),
Bergerstraße 145 a, 51145 Köln

Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e. V. (DGM),
Marie-Curie-Straße 11-17, 53757 Sankt Augustin

Autoren

Dr. Jens Eichler, 3M Deutschland GmbH
Dr. Gunnar Picht, Robert Bosch GmbH
Dr.-Ing. Torsten Rabe, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Dr. Wolfgang Rossner, Berater Keramikindustrie
Prof. Dr. Michael Stelter, Fraunhofer IKTS
Prof. Dr. Ingolf Voigt, Fraunhofer IKTS

Redaktion

Stephanie Anderseck, Fraunhofer IKTS
Susanne Freund, Fraunhofer IKTS
Martin Kunath, Fraunhofer IKTS

Layout und Gestaltung

Marie Kaden, Fraunhofer IKTS

Kontakt

Michael Stelter, Fraunhofer IKTS
michael.stelter@ikts.fraunhofer.de

Titelbild

Instrumentierter Extruder zur Herstellung von Elektrolyten für Hochtemperatur-
Batterien. © Fraunhofer IKTS

April 2021

Inhaltsverzeichnis

I. Einleitung	4
II. Besonderheiten des keramischen Fertigungsprozesses	8
III. Status der Digitalisierung in der Keramikindustrie	12
IV. Best-Practice der Digitalisierung in der Keramikfertigung	15
Anlagensteuerung	15
Prozess- und Qualitätssteuerung	17
Additive Fertigung	20
Energiemanagement	22
V. Bausteine zur vollständigen Digitalisierung von Fertigungsprozessen	24
Datengewinnung – Sensoren und zerstörungsfreie Prüftechnik	24
Datenmanagement – Transport, Integration und Verarbeitung der Daten	27
Maschinelles Lernen	28
Datensicherheit	28
Keramik-spezifische Anforderungen	29
VI. Chancen der Digitalisierung für Keramikproduzenten	30
Optimierung keramischer Fertigungsprozesse	30
Vermarktung keramikspezifischer Digitalisierungslösungen	31
Keramische Komponenten für die Digitalisierung	31
Wissenserhalt durch Digitalisierung	31
VII. Handlungsempfehlungen	32
VIII. Glossar	36
IX. Quellenverzeichnis	38



Einleitung

Die keramische Industrie ist eine kleine, aber für Deutschland enorm wichtige Branche. Keramische Komponenten übernehmen Schlüsselfunktionen in zahlreichen Hochtechnologie-Produkten. Auch wenn sie im Endprodukt nicht sichtbar sind, so verfügen sie über eine deutliche Multiplikatorwirkung für den Gesamtwert des Endproduktes. Seien es traditionelle Branchen wie die Automobilindustrie und der Maschinenbau oder zukünftige Wachstumsbranchen wie die Umwelttechnik und die Batterieproduktion – ohne keramisches Know-how dreht sich buchstäblich kein Rad. Die Digitalisierung dieser Schlüsselbranche ist zwingend erforderlich, um keramische Produkte in immer stärker digitalisierte Fertigungsketten von Hochtechnologie-Produkten kompatibel einzubinden. Für die von KMUs dominierte keramische Industrie ist die Digitalisierung der Fertigung besonders herausfordernd, sie bietet jedoch große Chancen neue Märkte zu erschließen.



Die parametrische Beschreibung der Prozesse in der Formgebung und Wärmebehandlung ist hoch komplex und nicht immer durchgängig numerisch erfassbar.

Warum es so wichtig ist, sich dieser Herausforderung zu stellen, wie es gelingen kann, gemeinschaftlich Lösungen zu erarbeiten und wie die Keramikindustrie gestärkt aus dem Prozess hervorgehen kann – dazu will das vorliegende Strategiepapier einen Beitrag leisten. Das Papier wurde vom Gemeinschaftsausschuss ‚Hochleistungskeramik‘ der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde e. V. und der Deutschen Keramischen Gesellschaft e. V. erarbeitet. Es soll den Unternehmen der keramischen Industrie, den bezugnehmenden Verbänden und Gesellschaften, universitären und industriellen Forschungsvereinigungen sowie der Forschungsförderung von Bund und Ländern eine Orientierungshilfe bieten, die den aktuellen Status, nötige Entwicklungen und den zukünftigen Forschungsbedarf für die Keramikfertigung aufzeigt.

Digitale Technologien sind aus unserem Arbeits- und Alltagsleben nicht mehr wegzudenken. Im industriellen Bereich ist die Digitalisierung das Rückgrat einer vernetzten und damit effizienten Fertigung immer komplexer werdender Produkte – einer Industrie 4.0. Während neuere Technologien bereits in ihrem Kern das Potenzial von Digitalisierungselementen beinhalten, müssen Akteure in eher klassischen Technologiebereichen umdenken. Dies führt vielfach zu einem verhaltenen Vorgehen und lässt wertvolle technologische Veränderungen nur zögerlich in die Umsetzung kommen. Dies gilt in zahlreichen Feldern auch für den Industriebereich Keramik. Ursächlich hier-

für sind aber keineswegs Technologiefeindlichkeit oder Veränderungsresistenz – es ist der keramische Fertigungsprozess an sich, der durch seine besonderen Merkmale eine umfassende Digitalisierung bisher erschwert hat. Hierin liegen jedoch die größten Chancen für eine verbesserte Wettbewerbsfähigkeit durch höhere Produktivität, da ausgewählte Prozessschritte der keramischen Fertigungskette bereits heute intensiven Gebrauch von datengestützten Tools und Methoden machen.

In der keramischen Werkstoffentwicklung werden digitale Ansätze bereits verfolgt. Hier besteht ein tiefes Verständnis von datengetriebenen Ansätzen zur Werkstoffsynthese und -optimierung. Auch die der Fertigung vorgelagerten Entwurfswerkzeuge (z. B. CAD, FEM) für Bauteil- und Komponentenauslegung sind in der Keramik schon weit digitalisiert. Während der Keramikprozessierung an sich, das heißt in der Formgebung und Wärmebehandlung, finden außerordentlich vielfältige, teils stoffwandelnde, physikalische und chemische Prozesse statt. Es werden in aller Regel sehr große mechanische Kräfte und hohe Temperaturen angewendet, so dass vollkommen neue Materialien und Gefüge entstehen. Die parametrische Beschreibung dieser Prozesse ist hoch komplex und nicht immer durchgängig numerisch erfassbar.

In der Produktion Technischer Keramik dominieren Hochleistungswerkstoffe mit vielfältigen Materialien und Fertigungstechnologien sowie kleinen Losgrößen.



Expertengespräche legen nahe, dass hierzu grundlegende Betrachtungen entlang der gesamten Prozesskette von der Erfassung der Daten, über ihre Nutzung bis zur Speicherung notwendig sind. Die aktuellen Herausforderungen für die digitale Beschreibung eines keramischen Prozesses beginnen mit der Datenerhebung und Datenerfassung, und zwar vor, während und nach dem Produktionsprozess. Vorrangig werden diese Daten durch Sensoren gewonnen. Diese erheben nicht nur die Materialdaten, sondern beziehen auch den Produktionsprozess mit seinen Randbedingungen und den Spezifika der eingesetzten Produktionsmaschinen ein.

In Teilbereichen der keramischen Industrie, beispielsweise in der Silikatkeramik, sind die Produktionslinien bereits hochgradig automatisiert. Dies ist ein großer Vorteil, denn damit steht zumindest ein wesentlicher Teil des Instrumentariums für die technische Datenerfassung bereit – faktisch auf dem Niveau von Industrie 3.0. Dennoch sind in der Silikatkeramik Ergänzungen und Weiterentwicklungen im Bereich Inline-Qualitätskontrolle wünschenswert.

Technische Lösungen für die Geometrieerfassung der Werkstücke und Bauteile sowie die Oberflächen- und Gefügediagnostik existieren in vielen Fällen bereits bzw. können aus anderen Produktionsbranchen übernommen und relativ leicht adaptiert werden. Deutlich schwieriger stellen sich die Verhältnisse in der Produktion der Technischen Keramik dar. Hier dominieren Hochleistungswerkstoffe mit vielfältigen Materialien und Fertigungstechnologien sowie kleinen Losgrößen. Die damit verbundenen kurz-

fristigen Änderungen der Randbedingungen bei der Prozessüberwachung erfordern universell nutzbare Messtechnologien und durch den Nutzer möglichst einfach justierbare und adaptierbare Messroutinen.

Die Datennutzung erfolgt in der keramischen Industrie derzeit vorrangig zur Qualitätskontrolle. Diese Limitierung muss aufgebrochen werden, indem Rückkopplungsschleifen in die Prozesslinien, die Rohstoffzusammenstellung und -aufbereitung oder in die Recyclingrouten implementiert werden. Damit sind neue oder zusätzliche Geschäftsmodelle möglich. In jedem Falle ist die komplexe Datennutzung über die gesamte Wertschöpfungskette eine Voraussetzung für weitere Innovationen.

Blickt man auf bestehende Ansätze in Forschung und Industrie zur Digitalisierung von Werkstoffentwicklung und -verarbeitung, so lassen sich bereits nutzbringende Bezüge zur Keramikindustrie herstellen. In der allgemeinen Materialforschung gibt es mit der Plattform MaterialDigital des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und der Initiative zur Nationalen Forschungsdateninfrastruktur für Materialwissenschaft & Werkstofftechnik (NFDI-MatWerk) gleich zwei Initiativen, die in Verbundprojekten insbesondere die Potenziale von Materialdaten und Eigenschaftsprofilen in einem digitalen Datenraum als Basis für neue Werkstoffe weiterentwickeln. Ein wesentliches Element dieses „Materials Data Space“-Konzepts ist dabei die Kopplung von Struktur-Eigenschaftsbeziehungen mit dem Herstellprozess. Ideen wie zum Beispiel das sogenannte „virtuelle Labor“, in dem mittels einer Computersimulation von Fertigungsverfahren und Materialien virtuell Produkte hergestellt werden können, liefern hier einen Schlüssel zum Erfolg. Generell lässt sich jedoch feststellen, dass dieser Ansatz gegenwärtig vorrangig auf die datengestützte Beschreibung von Werkstoffen wie Kupfer oder Verbundwerkstoffen zielt, die einerseits von ganz anderen Herstellungsmengen geprägt sind und andererseits in der Vergangenheit stärker im Fokus der öffentlichen Förderung standen. Die kleinteilige traditionelle Keramikindustrie hatte hier nur geringfügige Relevanz.

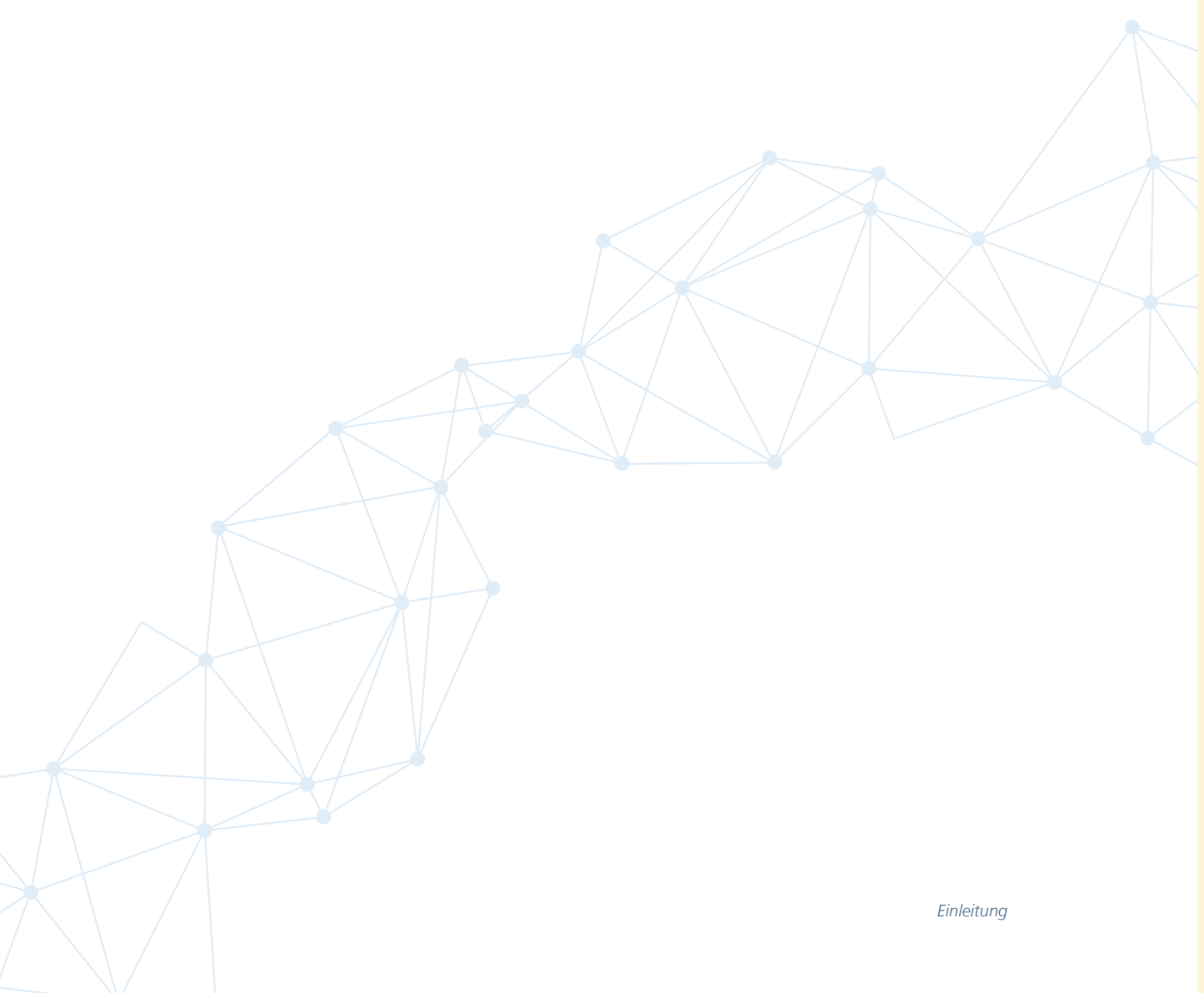
In allgemeinen Digitalisierungsstudien wird überblicksweise die Digitalisierung einzelner Gesellschafts- oder Wirtschaftsakteure mittels eines Digital-Indexes untersucht. IW Consult beschreibt beispielsweise den aktuellen Stand der Digitalisierung bei KMUs und identifiziert Merkmale von Vorreitern. Andere Studien, wie die des Fraunhofer IPA, betrachten geographische Räume und analysieren die Chancen von Industrie 4.0 für Unternehmen in der Rhein-Neckar Region oder die Verbreitung von künstlicher Intelligenz in Unternehmen in Baden-Württemberg. Beratungsunternehmen wie Deloitte untersuchen Kenntnisse und Entscheidungen im Bereich Manufacturing 4.0, aber nehmen dabei eher volkswirtschaftliche Aspekte in den Fokus. Die konkrete



Digitalisierung von Fertigungsprozessen bzw. Industrie 4.0. in spezifischen Branchen wird zwar häufig betrachtet, wurde aber für die Keramikindustrie bis dato nicht vorgenommen.

Kernpunkt dieses Strategiepapiers ist deshalb der digitalisierte keramische Fertigungsprozess als Innovationstreiber für eine effiziente und ressourcenschonende Fertigung wirtschaftsstrategischer Hochleistungskomponenten.

Dieses Strategiepapier zielt darauf ab, Akteuren und Entscheidungsträgern den Status, erfolgreiche Best-Practice-Beispiele aber auch die Herausforderungen nahezubringen, die es nun anzugehen gilt. Es ist die Vision, die Keramikfertigung durchgehend zu digitalisieren und alle Schritte des Produktkreislaufs lückenlos über die gesamte Wertschöpfungs- und Nutzungskette zu vernetzen: also eine Keramikindustrie 4.0 zu etablieren. Das Strategiepapier erfasst zunächst die Spezifität der keramischen Fertigung und nimmt eine Analyse des gegenwärtigen Standes der Digitalisierung in der keramischen Industrie vor, auch anhand einiger ausgewählter Beispiele aus der industriellen Praxis. Auf Basis der wesentlichen Bausteine für eine Fertigungsdigitalisierung werden schließlich die Chancen für Keramikproduzenten sowie der erforderliche Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufgezeigt.



Besonderheiten des keramischen Fertigungsprozesses

Die Herstellung keramischer Produkte unterscheidet sich zum Teil erheblich von der anderer Werkstoffgruppen. Drei Merkmale kennzeichnen die Unterschiede:

- Der keramische Fertigungsprozess besteht aus einer Vielzahl von Einzelprozessen, wie in Abbildung 1 deutlich wird. Dies führt zusammen mit den vielfältigen Prozess- und Maschinenparametern zu einer außerordentlich hohen Komplexität für die Gesamtsteuerung und -optimierung.
- Die Werkstoffeigenschaften von Keramik entstehen erst am Ende der Prozesskette beim Brand bzw. Sintern des vorgefertigten Formkörpers. Damit ist die endgültige Qualitätsbeurteilung des Produktes erst nach einem hohen Werteeintrag in die Produktionskette möglich. Es besteht somit hohes Interesse an einer frühzeitigen Erkennung von Fehlteilen oder einer zielgenauen Steuerung der gesamten Prozesskette.
- Die qualitätsbestimmenden Parameter im keramischen Prozess sind oftmals komplex. Sie sind daher mit herkömmlicher Qualitätssicherungs-Messtechnik, z. B. für geometrische Maß- und Formabweichungen, nicht erfassbar und unterliegen nicht den bekannten statistischen Verteilungen aus der mechanischen Fertigung.

Diese genannten Punkte führen in Summe dazu, dass in der keramischen Fertigung auch heute noch sehr viel mit menschlichem Erfahrungswissen und manuellen Prüfungen gearbeitet wird. Für viele qualitätsbestimmende Parameter in der keramischen Fertigung gibt es Prüfverfahren, die zwar durchaus sehr gut funktionieren, die aber oft spezielle, in keiner anderen Industrie verwendete Messprinzipien nutzen, die nicht automatisiert sind, die lediglich empirisch abgeleitete Summenparameter liefern, die nicht auf physikalische Basisprinzipien zurückführbar sind und die sich oft schlecht oder gar nicht numerisch quantifizieren lassen.

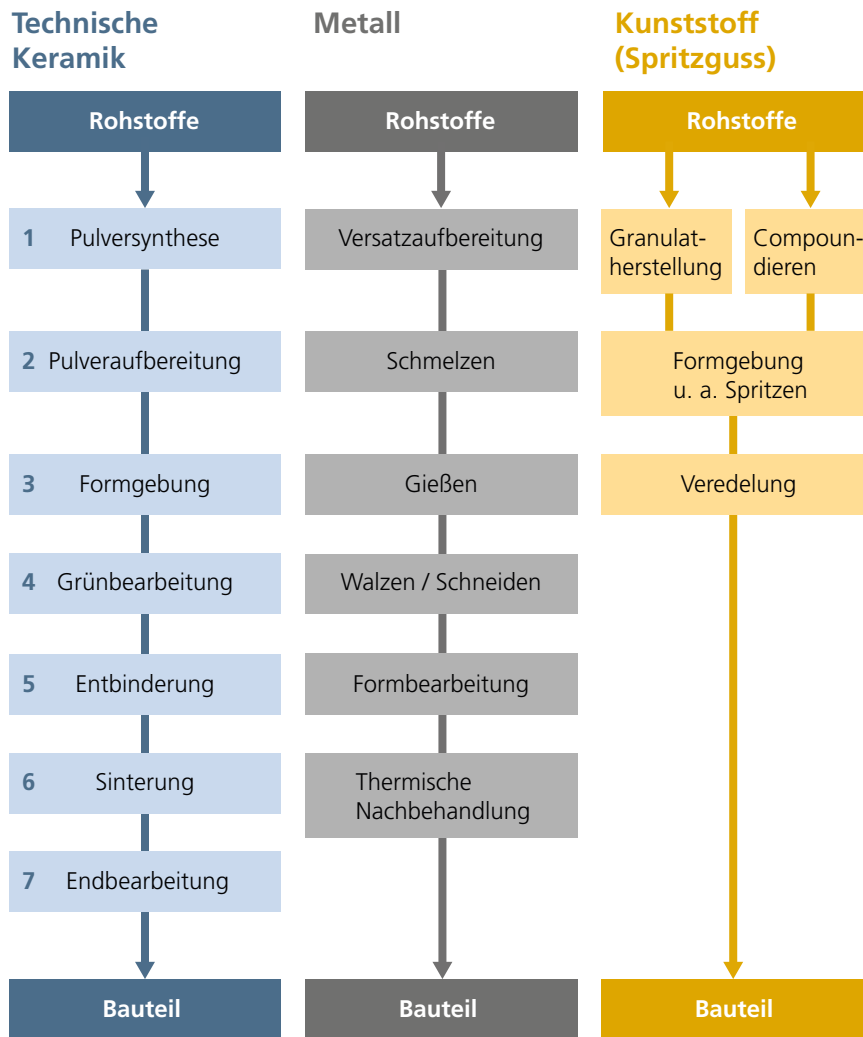


Abbildung 1: Fertigungsketten für Keramik, Metall und Kunststoff. © Fraunhofer IKTS

1 Am Anfang nahezu jeder Keramikfertigung steht die Bereitstellung von sinterfähigen Pulvern. Diese werden aus natürlichen oder synthetischen Pulverrohstoffen oder Chemikalien durch Mischen bzw. Mahlen mit anschließender thermischer Reaktion („Kalzinierung“) und abschließender Nachmahlung so erzeugt, dass sie der gewünschten Zusammensetzung sowie Pulvercharakteristik entsprechen. Vielfach lassen sich Abweichungen vom Sollwert im Pulverstadium in den nachfolgenden Prozessschritten nicht mehr ausgleichen und führen zu Fehlteilen. Typische Qualitätsparameter eines solchen Pulvers sind beispielsweise die chemische Zusammensetzung, einschließlich Homogenität, Sinterfähigkeit, Phasenbestand, Partikelgröße und Partikelgrößenverteilung. Die Partikelgrößen solcher Keramikpulver liegen im Mikrometer- bis Sub-Mikrometer- und mitunter im Nanometer-Bereich. Auch die Verarbeitungseigenschaften für die Formgebung werden durch die Pulveraufbereitung vorgegeben.

2 Diese Pulver werden dann durch Einsatz von meist organischen Fest- und Flüssigadditiven je nach Formgebungsverfahren in verarbeitbare Zwischenprodukte überführt, wie Pressgranulate, plastische Massen oder Schlicker.

» *Die Qualitätsbewertung keramischer Produkte beginnt bereits beim Pulver.*

3 und 4 Bei der Formgebung wird das keramische Bauteil möglichst mit endkonturnaher Form erzeugt, wobei der grundsätzlich während der Sinterung eintretende Sinterschwund vorgehalten werden muss. Somit soll die aufwendige Nachbearbeitung der meist sehr harten Keramiken minimiert werden, um die Herstellkosten nicht unnötig zu erhöhen. Die Formgebungsparameter werden hierbei so gewählt, dass eine ausreichende Dichte des Pulverkörpers, des sogenannten Grünkörpers, und eine homogene Porenverteilung erreicht wird. In diesem Herstellungsschritt werden alle Voraussetzungen geschaffen, um nach der Sinterung die gewünschte Bauteilqualität zu erlangen. Nahezu alle der Sinterung vorausgehenden Fehler, Abweichungen und Inhomogenitäten sind für das Endprodukt nachteilig und durch exakte Prozessführung aller Herstellungsschritte zu vermeiden.

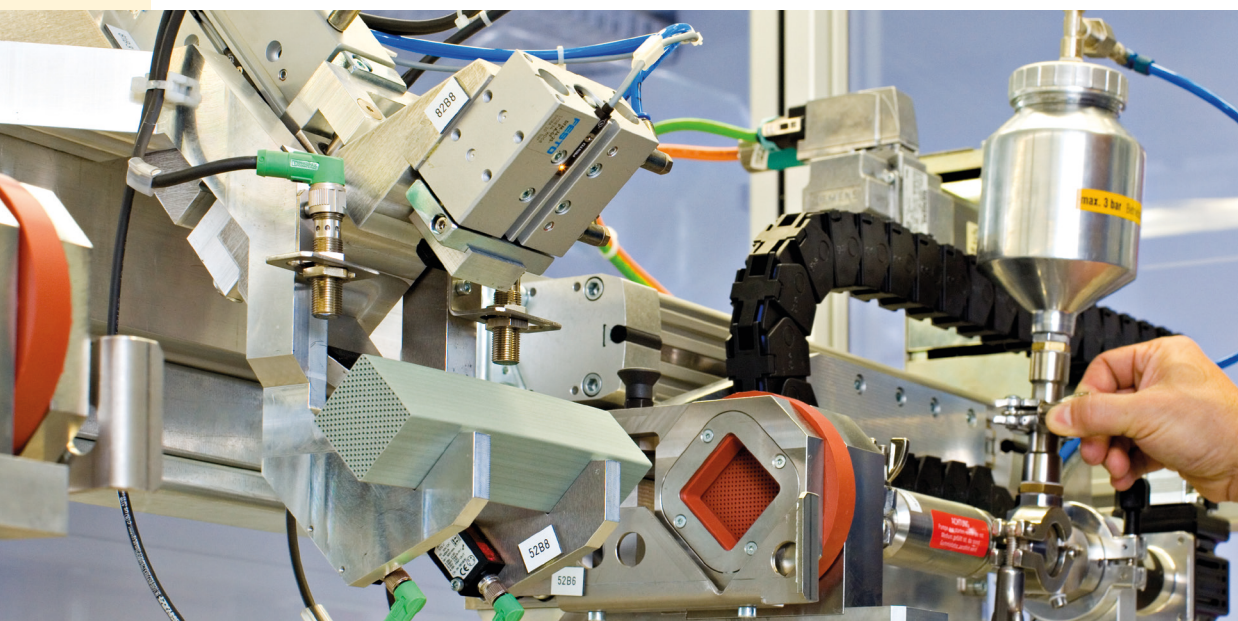


Abbildung 2: Extrudierte Keramikwabe. © Fraunhofer IKTS

5 und 6 Nach der Trocknung werden die Grünkörper dann in einem thermischen Prozess, der sogenannten Entbinderung, bei bis zu 600 °C von den organischen Additiven (Dispergatoren, Bindemittel etc.) befreit und anschließend bei hohen Temperaturen (Oxidkeramik 1200 bis 1800 °C, Nichtoxidkeramik 1600 bis 2500 °C) in Luft, Vakuum, Schutzgas (Stickstoff oder Argon) oder reaktiven Gasen gebrannt.

Dieser Schritt wird Sintern genannt, wobei thermisch induzierte Platzwechsellvorgänge der Atome (Diffusion) zu einer Reduzierung der Ober- und Grenzflächenenergie und somit zur Verdichtung des Grünkörpers führen. Der Formkörper erfährt bei vollständiger Verdichtung einen linearen Schwund von ca. 20 %. Im Sinterschritt entsteht aus dem Pulverhaufwerk das keramische Bauteil. Erst in diesem Schritt stellen sich die finalen Eigenschaften ein. Diese basieren einerseits auf der voreingestellten chemischen Zusammensetzung und andererseits auf dem durch das Sintern erzeugten Phasenbestand und der Mikrostruktur mit ihren Charakteristika aus Korngröße und -formen, Porenvolumen und -größen.



Abbildung 3: Vorbereitung keramischer Nanofiltrationsmembranen für die Sinterung. © Fraunhofer IKTS

7 Alle Abweichungen zur späteren Endform müssen im letzten Schritt, der Hartbearbeitung, korrigiert werden. Aufgrund der werkstoffinhärenten Härte keramischer Komponenten sind dafür kostspielige Werkzeuge auf Hartmetall- oder Diamantbasis notwendig. Auch ohne detaillierte Aufzählung wird bereits deutlich, dass eine außerordentlich hohe Anzahl von Parametern die Eigenschaften des keramischen Endprodukts bestimmt. Nur für einen Teil der Prozessparameter stehen Modelle zur Verfügung, die deren Wirkung auf das Endprodukt quantitativ beschreiben können. Für einen großen Teil der Parameter sind nur qualitative und empirische Zusammenhänge bekannt, deren komplexe Verknüpfung entlang der Prozesskette weitgehend unzureichend analytisch beschreibbar ist. Die Beherrschung des keramischen Fertigungsprozesses beruht in einigen Teilen der Prozessführung bereits auf digitalen Ansätzen zur Erfassung und Steuerung von Daten, zu einem großen Teil jedoch auf der Erfahrung von Keramikexperten. Dieses sogenannte Domänenwissen der Experten ist die Grundlage vieler heutiger Keramikprodukte und damit der Wertschöpfung spezialisierter Keramikhersteller.



Status der Digitalisierung in der Keramikindustrie

Um den Stand der Digitalisierungsaktivitäten in der deutschen keramischen Industrie zu ermitteln, wurde eine Umfrage durchgeführt, an der insgesamt 25 Unternehmen teilnahmen. So wurden die Teilnehmer gebeten, den Grad der Digitalisierung in ihren jeweiligen Unternehmen einzuschätzen. Entsprechend des breiten Spektrums der befragten Unternehmen hinsichtlich Keramikbranchen und Firmengröße findet sich die Digitalisierung in nahezu allen Reifegraden wieder (Abbildung 4). Ein ähnliches Ergebnis zeigt die Einschätzung zum allgemeinen Kenntnisstand hinsichtlich der Digitalisierung. In den Unternehmen bezieht sich die Anwendung digitaler Werkzeuge meist auf einzelne Aufgabenbereiche wie Datenerfassung, Dokumentation und Kundenmanagement. Mit Blick auf den Nutzen erwarten Keramikunternehmen von der Digitalisierung ihrer Fertigung eine Steigerung der Effizienz, gefolgt von Kostensenkung, Wettbewerbsvorteil und Produktindividualität (Abbildung 5).

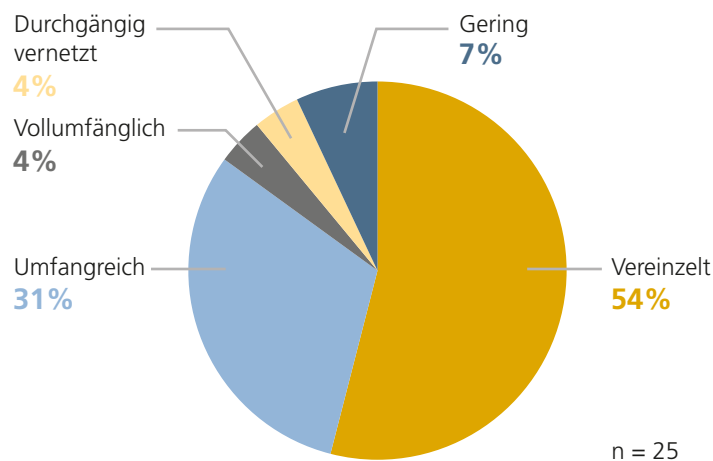


Abbildung 4: Aktueller Grad der Digitalisierung in den befragten Keramikunternehmen.
© DKG / Fraunhofer IKTS

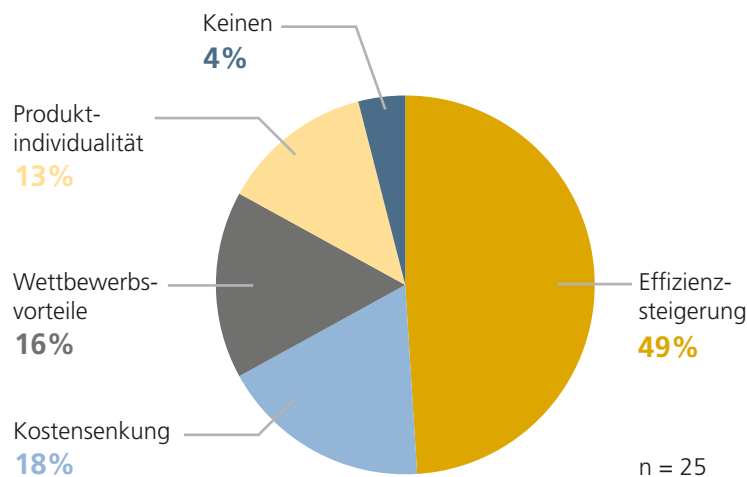


Abbildung 5: Erwarteter Nutzen der Digitalisierung für die befragten Keramikunternehmen.
© DKG / Fraunhofer IKTS

In den Bereichen **Werkstoffentwicklung, Bauteilauslegung und Prozessentwicklung** bezieht sich der heutige Einsatz digitaler Werkzeuge vorwiegend auf konventionelle Berechnungen (z. B. Tabellenkalkulation) und numerische Simulation (FEM) sowie CAD, CAM und CFD. Die Erstellung und Anwendung **digitaler Zwillinge für Komponenten- und Prozessentwicklung** spielt bisher kaum eine Rolle. Für Rohstoffe, Messdaten, Produkte und Fertigungsabläufe ist die Hinterlegung der Begleitdaten in digitaler Form (Tabellen-Tools, Datenbanken) bereits weit verbreitet. Geschlossene digitale Wirkungsketten mit dafür vorgesehenen speziellen Tools sind dagegen bisher kaum realisiert. Der **Automatisierungsgrad in der keramischen Fertigung** ist je nach Branchentyp und dem jeweiligen Anteil von Massenprodukten sehr unterschiedlich, von nahezu Vollautomatisierung in der Silikatkeramik bis zu rein manueller Fertigung bei Sonderwerkstoffen. Die Inline-Überwachung von Fertigungsprozessen und Produkteigenschaften, einschließlich Rückkopplungssystemen, ist insgesamt gering. Digitale Methoden sind insbesondere für Fertigungsplanung und Produktmanagement, teilweise produktspezifisch, im Einsatz. Der 3D-Druck, als neue digitale Herstelltechnik, hat schon in vielen keramischen Unternehmen in den Bereichen FuE, Prototypen- und Musterbau, Werkzeugbau sowie Vor- und Kleinserienfertigung Einzug gehalten und wird in den nächsten drei Jahren breit implementiert.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Digitalisierung in der keramischen Industrie auf einem sehr behutsamen Vormarsch ist und vorwiegend auf schon länger etablierten Werkzeugen basiert. Ihr Einsatz findet eher in einzelnen Bereichen der Wertschöpfungskette statt und weniger in durchgängigen Wirkungsketten. Effizienzsteigerung und Kostenreduktion stehen im Vordergrund, auch für die Zukunft.

Damit das grundlegende Potenzial der Digitalisierung für einen gezielten Einsatz zur Steigerung des Unternehmenserfolges genutzt werden kann, sind von der Toolentwicklung bis zur Digitalisierung von Prozessen und Produkten noch erhebliche Anstrengungen nötig. Entscheidend wird der erfolgreiche Einsatz neuer digitaler Methoden von der adäquaten Ausbildung und von der Beschäftigung von Fachpersonal abhängen. Die nahezu ausschließliche Verortung von qualitätsbestimmendem Prozesswissen in den Köpfen einiger weniger erfahrener Fachleute wird zu einem strategischen Risiko für die gesamte Branche, wenn diese Fachleute aus Altersgründen ausscheiden oder abwandern und nicht adäquat nachbesetzt werden können. Digitale Methoden der Inline-Prozessüberwachung bieten hier eine Lösung. Neben der reinen Anwendung digitaler Methoden muss der Sicherung der digitalen Daten gegenüber unerlaubten Zugriffen hohe Aufmerksamkeit gewidmet werden.



Die Digitalisierung findet eher in einzelnen Bereichen der Wertschöpfungskette statt und weniger in durchgängigen Wirkungsketten.

Die Bestandserhebung macht deutlich, dass bisher nur in den großen Unternehmen eine aktive Nutzung von digitalen Prozessen erfolgt. Die überwiegend klein- und mittelständisch geprägte keramische Industrie steht der Digitalisierung zurückhaltend und abwartend gegenüber. Hier soll das vorliegende Strategiepapier ansetzen und die Chancen für die Branche aufzeigen.

Best-Practice der Digitalisierung in der Keramikfertigung

Auch wenn Digitalisierung punktuell bereits Einzug in die keramische Industrie gehalten hat, findet schlussendlich meist eine Aufwand-Nutzen-Abwägung statt, die primär von den typischen Stückzahl-Szenarien geprägt ist. Sie sind bis dato das entscheidende Kriterium, ob eine Digitalisierung der Fertigungsprozesse als ökonomisch sinnvoll erwogen wird. Anhand einiger Bedarfs- und Anwendungsbeispiele soll im Folgenden gezeigt werden, wie bereits heute in ausgewählten Bereichen digitale Lösungen zur Verbesserung keramischer Prozesse eingesetzt werden.

Anlagensteuerung

Vor allem die intelligente Steuerung von einzelnen Fertigungsanlagen oder Prozessschritten bietet die Chance, mit kalkulierbarem Aufwand rasche Fortschritte zu erreichen, auch ohne eine umfassende Digitalisierung der gesamten Fertigungskette.

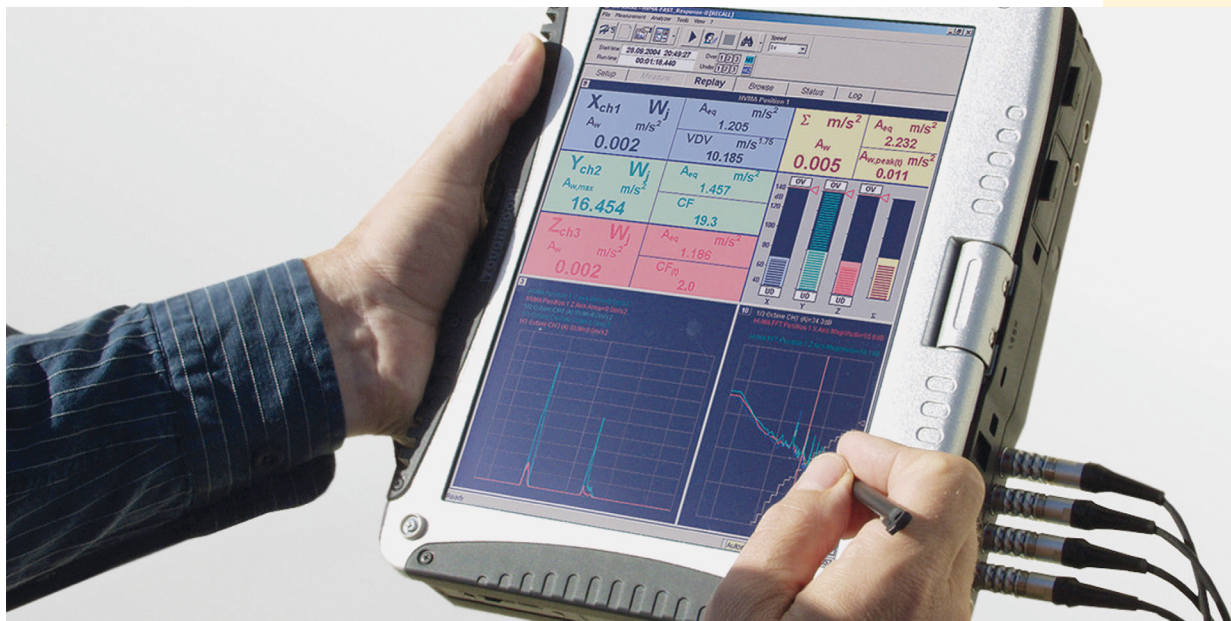


Abbildung 6: System zur Fernwartung von Fertigungsanlagen. © Fraunhofer IKTS

Von den Geräteherstellern werden zunehmend digital ausgestattete Fertigungsanlagen angeboten, die neben verbesserter Sensorik für die erweiterte Datenerfassung auch optional Bausteine für das Streamen von Daten und die Datenverarbeitung sowie leistungsfähige Software für die Darstellung, die Aufbereitung und die Überwa-

chung von Prozess- und Maschinendaten enthalten. Standardisierte Datenschnittstellen erlauben es, die gesammelten Informationen an eine übergeordnete Datenbank oder MES-Systeme (Manufacturing Execution Systems) hochzuladen oder die Daten zur Fernwartung zu nutzen.

Verschiedenste Stellen der keramischen Fertigungstechnologien lassen Möglichkeiten erkennen, um Qualität, Ausbeute, Effizienz und Flexibilität zu steigern. Automatisierte und selbstregulierende Extruder mit dynamischen Sensoren zeigen beispielsweise auf, welches komplexes Zusammenspiel verschiedenster Parameter für die schlussendliche Produktqualität verantwortlich ist. So erfassen eigens für die Herstellung von Batterieelektrolyten instrumentierte Extruder Parameter wie Wärme und Geschwindigkeit inline. Die dafür angewandte Sensorik ist jedoch noch nicht kommerziell erhältlich. Sie wurde im Rahmen von angewandten Forschungsprojekten entwickelt und befindet sich noch in der Qualifizierung.



Abbildung 7: Anlagensteuerung eines Extruders zur Herstellung von Batterieelektrolyten.
© Fraunhofer IKTS

Ein weiteres Beispiel für eine adaptive Anlagensteuerung stellen selbstoptimierende Brennöfen dar, die bereits teilweise umgesetzt wurden. So werden bei der CO/O_2 -Regelung für Industriefeuerungsanlagen von der Lamtec GmbH Abgase und Sauerstoff über Sonden erfasst, an die Steuerung übermittelt und automatisch ausgeglichen.

Um diese bereits vorhandenen Ansätze zu stärken, müssen neben entsprechender Sensorierung vor allem geeignete Algorithmen bis hin zu selbstlernenden Systemen im Sinne künstlicher Intelligenz in Forschungsprojekten erprobt und entwickelt werden. Das Domänenwissen der Fertigungsexperten ist hierbei notwendig, um diejenigen Parameter zu identifizieren, die für eine wirkliche Qualitätsverbesserung entscheidend sind. Dafür müssen im Gegenzug geeignete Sensoren entwickelt, adaptiert und eingesetzt werden.

Entscheidend ist, dass die für eine verbesserte Qualität und Ausbringung wirklich entscheidenden Parameter gefunden und genau für diese Parameter die entsprechenden Sensoren entwickelt oder adaptiert werden.



Prozess- und Qualitätssteuerung

Ein besonders anschauliches Beispiel für den Mehrwert digital unterstützter Prozessketten bietet die Herstellung piezokeramischer Aktoren. Diese funktionskeramischen Bauelemente müssen mit präzisen physikalisch-elektrischen Eigenschaften bei hohen Stückzahlen gefertigt werden. Piezokeramische Multilayeraktoren aus dem Stoffsystem $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ (PZT) bieten aufgrund ihrer hohen Blockierkraft und ihrer sehr schnellen und präzisen Bewegung herausragende Möglichkeiten für den Einsatz in modernen Benzin- und Diesel-Einspritzsystemen. Sie ermöglichen eine deutliche Reduktion des Kraftstoffverbrauches, der Geräuschemission und erlauben eine optimierte Führung der Verbrennungsabläufe. Für piezoelektrische Benzin- und Dieselinjektoren produziert die Robert Bosch GmbH pro Jahr ca. 13 Millionen Multilayeraktoren. Für eine hohe Gutausbringung hat hierbei die Digitalisierung der Fertigungssteuerung bereits eine entscheidende Rolle inne.

Abbildung 8 zeigt die wichtigsten Prozessschritte der Fertigung piezokeramischer Multilayeraktoren bei der Robert Bosch GmbH. Nachdem auf PZT-Grünfolien über ein Siebdruckverfahren das Design der Innenelektroden aufgedruckt wurde, werden diese zu einem Block bzw. Stack gestapelt. Je nach Produkt werden nun Riegel oder einzelne „grüne“ Aktoren aus diesen Blöcken gesägt. Im Anschluss daran erfolgen thermische Prozesse bzw. das Sintern der Aktoren. Die gesinterten Aktoren werden nun geschliffen, mit einer Metallisierung versehen und polarisiert. Die finalen Fertigungsschritte bestehen aus dem Aufbringen einer Außenelektrode, dem Lackieren des Aktors und einer Endprüfung.

Signifikante Änderungen in der Stöchiometrie und keramischen Mikrostruktur wirken sich auf die Zieleigenschaft der Piezoaktoren, die makroskopische Dehnung, gravierend aus. Deshalb liegt bei der Herstellung der keramischen Multilayeraktoren ein besonderes Augenmerk auf diesen Attributen, welche miteinander in komplexer Wechselwirkung stehen und durch den gesamten Herstellungsprozesses beeinflusst werden. Auf der Basis erkannter Wirkzusammenhänge und durch Kenntnisse der Beiträge einzelner Einflussgrößen ist es möglich, ein entsprechendes Steuerungskonzept

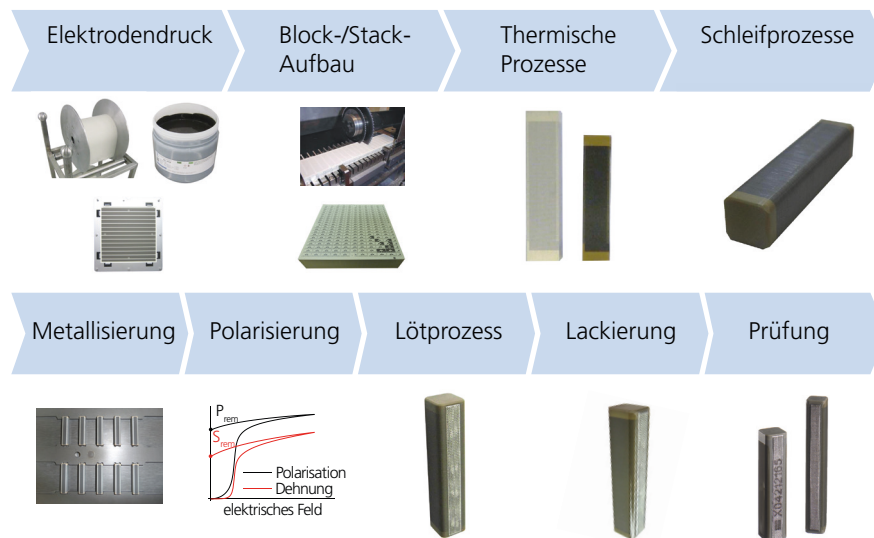


Abbildung 8: Fertigungsprozess eines Multilayeraktors. Quelle: Robert Bosch GmbH

des Fertigungsprozesses zu entwerfen. Dafür ist die Aufnahme einer großen Zahl von Daten bzw. Parametern aus den Teilprozessen und Zwischenprodukten nötig. Diese müssen dann durch effizientes Datenmanagement in möglichst einfach auswertbare Strukturen überführt werden, vor allem durch Einsatz von Algorithmen und Prinzipien des Maschinellen Lernens zur schnellen System- und Software-Anpassung.



Als Erfolgsfaktoren haben sich drei wesentliche Aspekte herauskristallisiert: Ein gutes Prozess-Know-how, eine entsprechende Datenbank und ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess in der Methodik.

In der täglichen Fertigungspraxis werden für jeden Aktor mehrere hundert Parameter bzw. Datenpunkte ermittelt. Dies beginnt mit der Eingangskontrolle der PZT-Grünfolie, bei der Kennwerte wie Flächengewicht und Schwindung ermittelt werden, und endet mit der elektrischen Prüfung der Multilayeraktoren, bei der Parameter wie Kapazität, Isolationswiderstand und der piezoelektrische Ladungsparameter d_{33} aufgenommen werden. Für einen einzelnen Aktor werden allein in der elektrischen Endprüfung somit ca. 200 Messparameter erfasst. Das Ziel der digitalen Prozesssteuerung bzw. frühzeitigen Qualitätskontrolle ist es, eine Gutausbringung von nahezu 100 % zu erreichen. Um dies zu bewerkstelligen, müssen selbst kleinste Abweichungen bzw. Schwankungen in den Rohstoffen und im Fertigungsprozess kontrolliert und kompensiert werden. Durch die sehr komplexen Wechselwirkungen ist die alleinige Steuerung des Prozesses aus der Eingangskontrolle nicht möglich. Die hohe Gutausbringung kann jedoch über eine Teilung einer Produktionscharge in ein Vorlos und Hauptlos erreicht werden. Über ein kleines Fertigungsvorlos von 5 % einer Grünfoliencharge wird eine bestimmte Anzahl an Aktoren gefertigt. Trotz der Steuerung der Prozessführung anhand bekannter Wirkzusammenhänge ergibt sich eine entsprechende Streuung der Aktoreigenschaften. Aufgrund des Ergebnisses des Vorloses kann nun durch eine präzise Chargensteuerung das Hauptlos in einem Zielkorridor von ± 1 % bezogen auf

die Zieleigenschaft, der Dehnung des Aktors, gefertigt werden, was eine signifikante Verbesserung der Gutausbringung zur Folge hat. Der gesamte Steuerungsablauf ist in Abbildung 9 schematisch dargestellt.

Sämtliche Daten aus der Eingangskontrolle, dem Prozess, der Endprüfung (Gutausbringung, Aktoreigenschaften) werden dabei in einer zentralen Datencloud abgelegt. Die Daten werden kontinuierlich über ausgewählte Algorithmen des Maschinellen Lernens analysiert und entsprechende Änderungen für den Fertigungsprozess abgeleitet. Wichtig hierbei ist ebenfalls die Möglichkeit, schnell Systeme und Software entsprechend anpassen bzw. erweitern zu können.

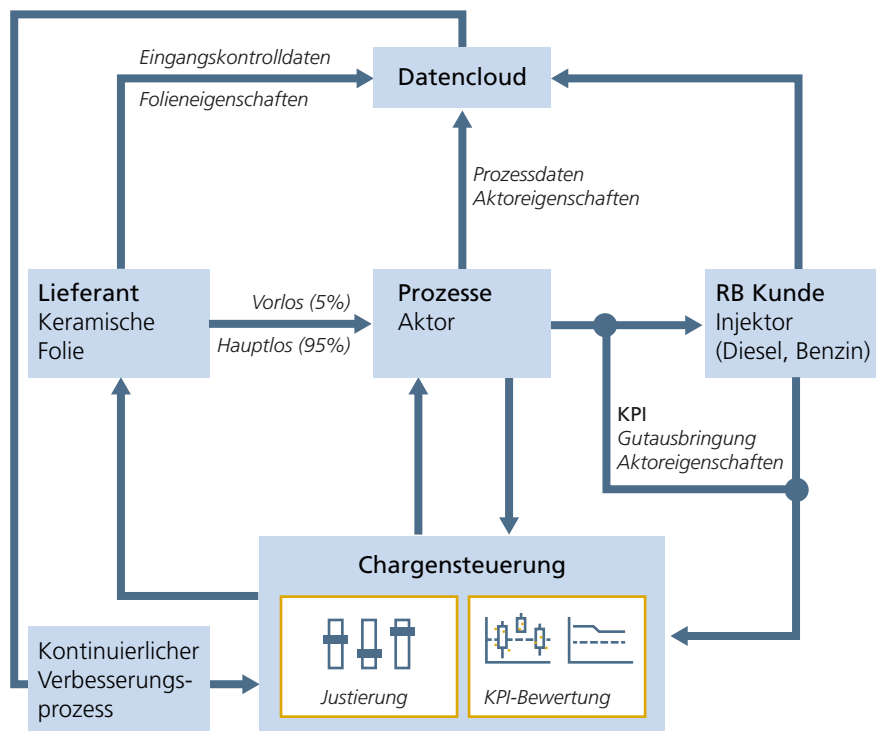


Abbildung 9: Digitale Prozesssteuerung für die Fertigung von Multilayeraktoren. Quelle: Robert Bosch GmbH

Das Beispiel zeigt sehr deutlich die überaus große Komplexität und Parametervielfalt bei keramischen Prozessen. Es belegt aber auch, dass diese Herausforderung mit einem guten digitalen Datenmanagement und digitaler Vernetzung des gesamten Prozesses gemeistert werden kann, so dass eine Produktqualität erreicht wird, die mit herkömmlichen keramischen Verfahren völlig undenkbar ist. Es wird zusätzlicher Anstrengungen bedürfen, diese digitalen Systeme so zu gestalten, dass sie hinsichtlich der nötigen Investitionen und der Bedienbarkeit auch von kleinen und mittleren Unternehmen beherrschbar werden.

Additive Fertigung

Additive Fertigungsverfahren sind ein spezielles Beispiel für die Digitalisierung der Herstellung kompletter Bauteile. Dabei wird ein virtuelles Bauteil (CAD-Modell) an einen 3D-Drucker übertragen, in maschinenlesbare Steuersignale transformiert und in einem additiven Aufbau aus inkrementellen Volumeneinheiten direkt erzeugt. Vielfach schließen sich noch Nachbehandlungen und -bearbeitungen an – eine Sinterung der Bauteile ist obligatorisch. Im Kunststoff- und Metallbereich sind 3D-Druck-Verfahren bereits als Standard in der industriellen Fertigung vor allem für Kleinserien und komplexere Bauteile etabliert. In der Keramikindustrie punkten additive Fertigungsverfahren unter anderem mit den Vorteilen Formfreiheit und Schnelligkeit sowie einer schnellen Umsetzbarkeit ohne zusätzliche Zeit und Kosten für die Entwicklung und den Bau von Werkzeugen.

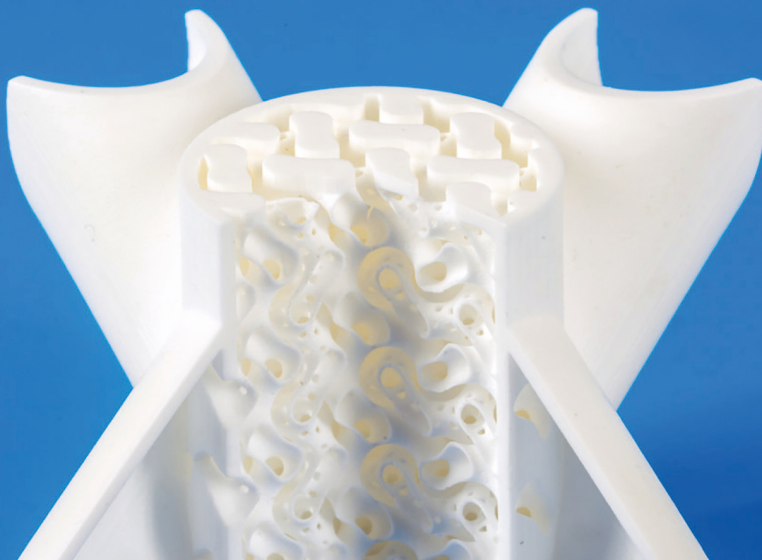


Abbildung 10: Additiv gefertigtes Keramikbauteil mit inneren Strömungskanälen und Kavitäten.
© Fraunhofer IKTS

Die direkte Herstellung eines keramischen Bauteils aus einem keramischen Pulver oder Feedstock ist bisher noch nicht erfolgreich gezeigt worden, da das Bauteil immer noch gesintert werden muss und dabei eine Volumenschwindung erfährt. Somit wird bei Keramik durch additive Fertigungsverfahren lediglich der Teilschritt Formgebung, also die Umsetzung eines CAD-Modells in einen keramischen Grünkörper, digitalisiert, während der verbleibende Teil des Fertigungsprozesses den herkömmlichen Routinen unterliegt. Es stehen bereits unterschiedliche additive Verfahren zur Verfügung, wie Stereolithographie, Binder-Jetting, Laminated Object Manufacturing, Direktes Tintenstahldrucken, Strangauftragsverfahren, die an die keramischen Erfordernisse angepasst wurden.

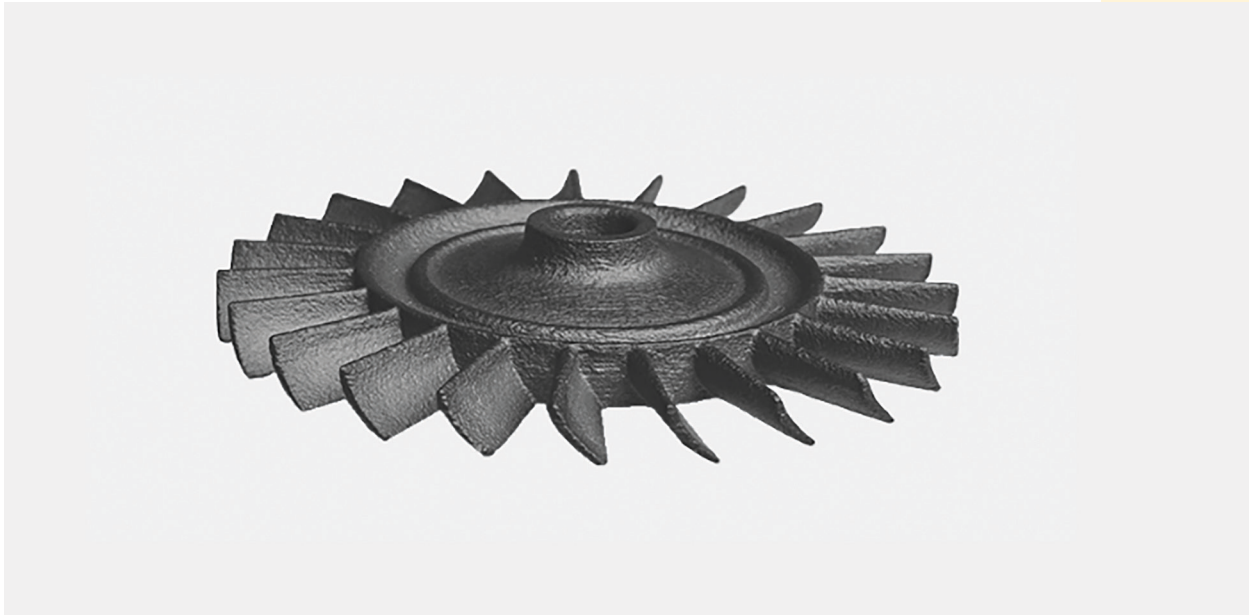


Abbildung 11: Additiv gefertigtes SiC-Turbinenmodell aus Entwicklung der BAM in Kooperation mit KYOCERA Fineceramics Precision GmbH. © KYOCERA Fineceramics Precision GmbH

Aktuelle Anwendungsfelder des 3D-Drucks für Keramik beziehen sich unter anderem auf Musterbau, Design- und Funktionsstrukturen. Dabei handelt es sich oft um komplexe Bauformen, die mit klassischen Formgebungsmethoden nicht erzeugbar sind (z. B. Mischer, Düsen, Kühler, Reaktoren), die aber trotzdem keramikgerecht konstruiert sein müssen oder spezielle Eigenschaften der Keramik ausnutzen, die mit anderen Werkstoffen nicht darstellbar sind. Insbesondere für Kleinserien keramischer Produkte ist ein eigenständiges Geschäftsfeld auf Basis dieser digital gestützten Fertigungsroute entstanden – ein Beispiel, das die Chancen für weitere Anstrengungen offenlegt. Aktuelle Entwicklungsarbeiten zu 3D-Druck in der keramischen Industrie adressieren deshalb derzeit die limitierenden Faktoren des 3D-Drucks, wie große Bauteilabmessungen, das verfügbare Werkstoffspektrum mit den dazugehörigen verarbeitbaren Keramikmassen und die Abhängigkeit von einzelnen Zulieferern.

Wie beim klassischen Herstellungsweg für Keramik stellt sich auch bei der additiven Fertigung die Herausforderung einer Vielzahl an Einflussparametern bis zum finalen Produkt. Die Inline-Prozessüberwachung während des Druckes ist bis dato noch ungeklärt, ist aber besonders bei sicherheitskritischen Bauteilen Pflicht. Ein wirklicher Durchbruch für den 3D-Druck von Keramik ist zu erwarten, wenn es gelingen sollte, nach Entwurf und Formgebung auch noch die Prozesse der Entbinderung und Sinterung in eine geschlossene digital gestützte Kette zu integrieren. Der Vorteil der dezentralen Fertigung, wie er bei Polymeren oder Metallen heute schon realisiert werden kann, wird erst dann möglich sein. Dennoch führt der Einsatz der additiven Herstellungsverfahren in der Keramik bereits zu einem bedeutsamen Fortschritt: CAD-Modelle können direkt in Bauteilformen umgesetzt werden, sodass sich Kosten und Zeit bei der Entwicklung und Einführung neuer Produkte einsparen lassen.

Energiemanagement

Die Keramikfertigung zählt zu den energieintensiven Industrien in Deutschland. Unternehmen in diesem Bereich sind gesetzlich verpflichtet, Energiemanagementsysteme gemäß DIN EN ISO 50001 einzuführen und mittelfristig reale Einsparungen in der Energieintensität nachzuweisen. Somit ist der Einsatz leistungsfähiger Energiemanagementsysteme auch in der Keramikindustrie in den letzten Jahren immer wichtiger geworden. In Zukunft werden die Energiekosten allein durch die gesetzlichen Regelungen der CO₂-Besteuerung von fossilen Energieträgern kontinuierlich steigen. Außerdem unterliegen sie starken marktwirtschaftlichen Preisschwankungen. Für optimale Entscheidungen in diesem höchst dynamischen Umfeld ist eine hohe Transparenz des eigenen Energieverbrauchs die grundlegende Voraussetzung.



Der betriebliche Einsatz dieses Systems am Fertigungsstandort Rauschert-Pressig führte zu einer jährlichen Energieeinsparung von ca. 40 % und einer CO₂-Reduzierung von nahezu 2000 t pro Jahr.

Vor diesem Hintergrund hat Rauschert Heinersdorf-Pressig GmbH ein digitales, integriertes Energie-Management-System für den Einsatz im Bereich der keramischen Fertigung, insbesondere für Ofenanlagen und thermische Prozesse entwickelt. Lokale Leistungsdaten der Energieverbraucher werden über eigens entwickelte Strom-Messsensoren nach dem Hall-Prinzip (Abbildung 12) in Echtzeit erfasst, leitungsgeführt (LAN) oder drahtlos (WLAN) in der heutigen Systemarchitektur an eine Datenbank übermittelt und mit einer eigenen Software verarbeitet.



Abbildung 12: Strom-Mess-Sensor für das Energiemanagement in der Keramikfertigung.
© Rauschert Heinersdorf-Pressig GmbH

Diese erfasst nicht nur die Stromdaten und bereitet diese systematisch auf, sondern erlaubt auch die Verknüpfung mit anderen gemessenen Daten in Echtzeit, wie Verbrauchsdaten (z. B. Gas, Pressluft, Öl, Wasser), Umweltdaten (z. B. Temperatur, Luftfeuchtigkeit) und Prozessparameter der Fertigungsaggregate (vor allem der Brennöfen). Auf diese Weise entstehen komplette Datensätze, die den Fertigungsablauf vollständig abbilden können. So lassen sich die Abläufe in der Fertigung genau analysieren und in Hinblick auf Energieeffizienz, aber auch auf Produktqualität und Durchlaufzeiten optimieren.

Dieses System ermöglicht die digitale Ermittlung der Kennzahlen nach DIN EN ISO 50001 und im Sinne der Digitalisierung des gesamten Produktionsablaufs auch die Grundlagen für weitergehende Optimierungen, wie Lastmanagement, vorausschauende Wartung oder die Absicherung gegen Stromausfälle.

Die Entwicklungsschritte des Energie-Management- und Datenerfassungssystems und der Datenfluss der Leistungs- und Verbrauchssensoren bei der Rauschert Heinersdorf-Pressig GmbH, ist in Abbildung 13 schematisch wiedergegeben. Im Ergebnis konnte damit eine jährliche Energieeinsparung von ca. 40 % und eine CO₂-Reduzierung von nahezu 2000 t erzielt werden. Dies unterstreicht eindrucksvoll, dass bereits digitale Insellösungen, wie hier am Beispiel Energiemanagement gezeigt, nachhaltige wirtschaftliche Vorteile schaffen können.

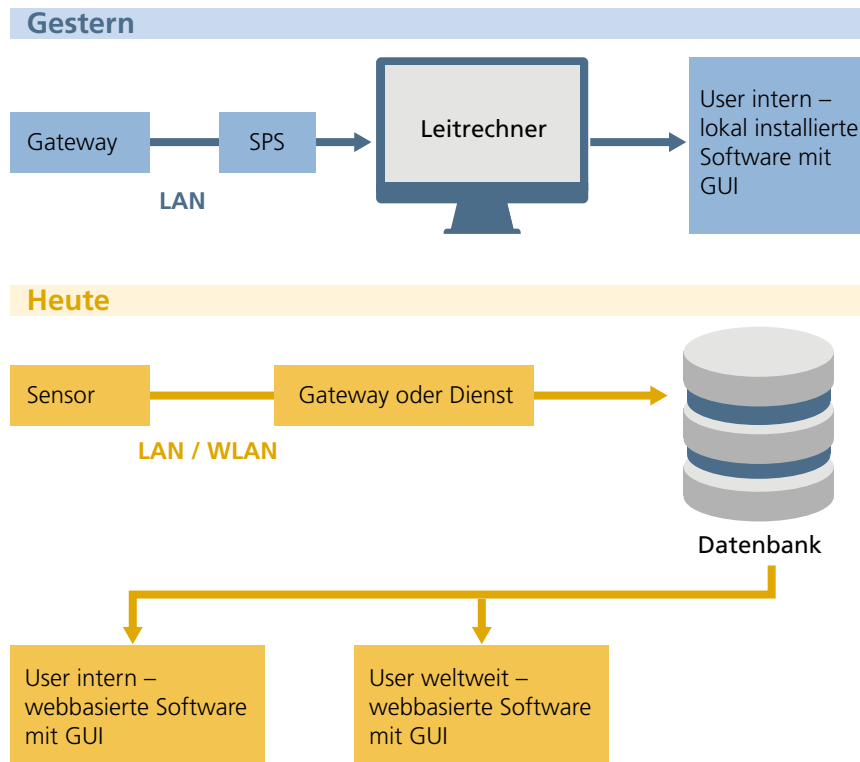


Abbildung 13: Energie-Management- und Daten-Erfassungssystem der Rauschert GmbH mit ca. 500 Sensoren für Strom, Spannung, Leistung, Gasverbrauch, Temperaturen, Drücke etc.
Quelle: Rauschert Heinersdorf-Pressig GmbH

Bausteine zur vollständigen Digitalisierung von Fertigungsprozessen

Wollen Unternehmen die Möglichkeiten und die zahlreichen Vorteile einer digitalisierten Produktion nutzen, müssen sie nicht nur Systeme zur **Datengewinnung** (Sensorisierung) aufbauen, sondern auch schnelle Datentransportwege installieren und in den Bereichen der Datenintegration und Datenanalyse tätig werden. Dabei sind die Methoden und Verfahren zur Datengewinnung mitunter speziell an keramische Prozesse anzupassen. Die Anforderungen an das anschließende **Datenmanagement** (Transport, Integration und Verarbeitung) gelten allgemein für Produktions- bzw. Fertigungsverfahren. Hier kann die keramische Industrie an den vielfältigen Erfahrungen und Entwicklungen in anderen Industriezweigen partizipieren. Dies gilt auch für die **Datensicherheit**, einem weiteren wichtigen Baustein erfolgreicher Digitalisierung.

Notwendig ist ein Digitalisierungskonzept, in dem alle Bausteine aufeinander abgestimmt sind. Die folgenden Erläuterungen stellen die Bausteine mit Bezug zur Keramik überblicksartig dar. Die Nutzung der Daten zur Prozessoptimierung mittels **Maschinellem Lernen** wird in einem separaten Absatz behandelt, da diese Methode der Datenverarbeitung für die Digitalisierung der keramischen Produktion ein hohes Potenzial besitzt.

Datengewinnung – Sensoren und zerstörungsfreie Prüftechnik

Sensoren bilden das Fundament der Digitalisierung von Fertigungsprozessen, denn sie liefern die Ausgangsdaten, auf der die gesamte Industrie 4.0 aufgebaut ist. Sie erfassen Zustände, liefern digitale Kennwerte und erlauben darauf aufbauend Aktionen auszuführen – ohne menschliche Hilfe. Zunächst dienen sie dem Monitoring der Prozesse über den gesamten Fertigungszeitraum sowie der Qualitätskontrolle. Zunehmend werden die erfassten Prozessdaten und Produkteigenschaften aber auch für die Automatisierung genutzt, also die Überwachung und Steuerung von Funktionsabläufen. Prinzipiell kann unterschieden werden zwischen einfachen Sensoren zur Erfassung von Prozessdaten (z. B. Temperatur, Druck, Drehzahl, Durchfluss, Füllstand) und komplexeren Sensoren, die die Eigenschaften von keramischen Zwischen- und Endprodukten inline bzw. online erfassen.

Für die Verbesserung der Reproduzierbarkeit der Prozessparameter werden in immer mehr keramischen Fertigungsanlagen Regelkreise für die entscheidenden Maschinen- und Prozesseinstellgrößen integriert. Allerdings werden viele Schwankungen von Produkteigenschaften, durch weitere nicht erfasste Prozesseinflüsse verursacht, wie durch Versatzveränderungen als Folge von Abrieb, durch Verschleiß von Werkzeugen sowie Einflüsse der Umgebung. Dies bedeutet, dass die Regelung der Prozessparameter häufig nicht ausreicht, um eine fehlerfreie Produktion zu gewährleisten.

Zur Beurteilung von Zwischen- und Endprodukten dienen sensorische Systeme zur Inline- bzw. Online-Erfassung der Eigenschaften. Während bei der Inline-Prozessüberwachung direkt im Probenraum bzw. der Prozessleitung gemessen wird, erfolgt die Messung bei Online-Verfahren in einem prozessnahen Bypass. Inline- bzw. Online-Verfahren ersetzen die manuelle Probenahme und die Analyse und Auswertung im entfernten (offline) Labor (Abbildung 14).

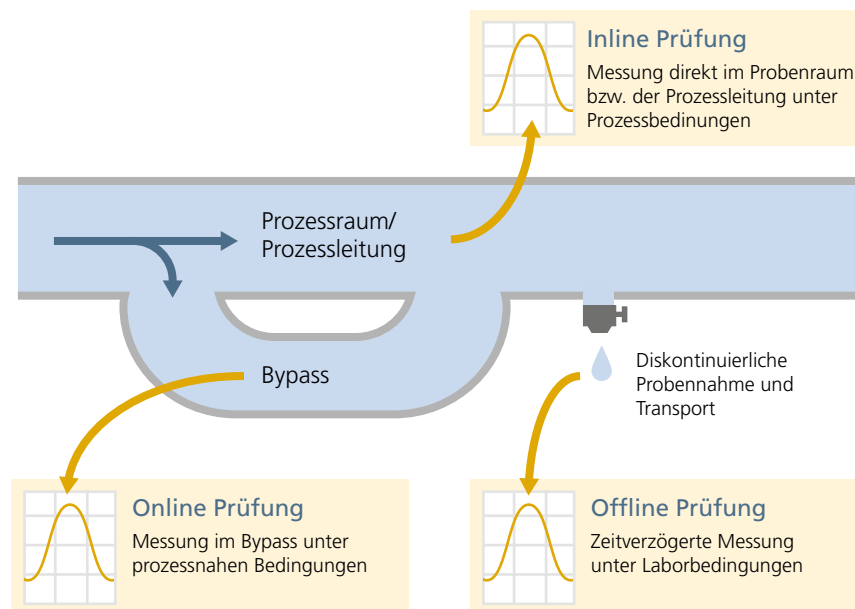


Abbildung 14: Prüfkonzepte zur Überwachung von Fertigungsprozessen. Quelle: BAM

Die Inline-Prozessüberwachung soll Messdaten taktgebunden oder kontinuierlich erfassen und zur Prozesssteuerung und Qualitätssicherung nutzen. Dabei kann sie grundsätzlich auf unterschiedlichen Ebenen mit dem Fertigungsprozess verknüpft sein. Das Spektrum der Inline-Messtechnik reicht von reinen Überwachungsaufgaben, die Trendverläufe in den Fertigungsprozessen anzeigen, bis hin zu prozesssteuernden Systemen. Inline- und online-kompatible Prüfverfahren zur Charakterisierung von keramischen Zwischenprodukten (Pulver, Schlicker, Granulate, Grünkörper) sind generell verfügbar.

Vielfach sind diese für andere Industriezweige entwickelt und müssen für ihre Einsetzbarkeit in der keramischen Fertigung adaptiert werden. Bereits heute können viele Eigenschaften in Echtzeit erfasst werden, wie Partikelgrößenverteilung, Viskosität keramischer Schlicker, Feuchte von Pulvern, Granulaten und Grünkörpern, Granulatgrößenverteilung, Foliendicke im Gieß- und Trockenprozess oder Schwindung im Sinterprozess.

Komplexere Größen, wie Fließverhalten, Mischgüte oder Gründichteverteilungen, erfordern neue Sensorprinzipien. In der Silikatkeramik (Fliesen, Ziegel, Sanitärkeramikprodukte) sind zerstörungsfreie Prüfverfahren, d. h. im Regelfall mit berührungsloser Mess- und Prüftechnik, für die Inline-Qualitätskontrolle bereits Standard. Zur Bewertung von Oberfläche, Geometrie und Gefüge sowie zur Defektoskopie mit volumenorientierten Verfahren dienen akustische Resonanzanalyse, Röntgeninspektion, Ultraschallmikroskopie, Optische Kohärenztomographie (OCT), Wärmefluss-thermografie und HF-Wirbelstromtechnik.

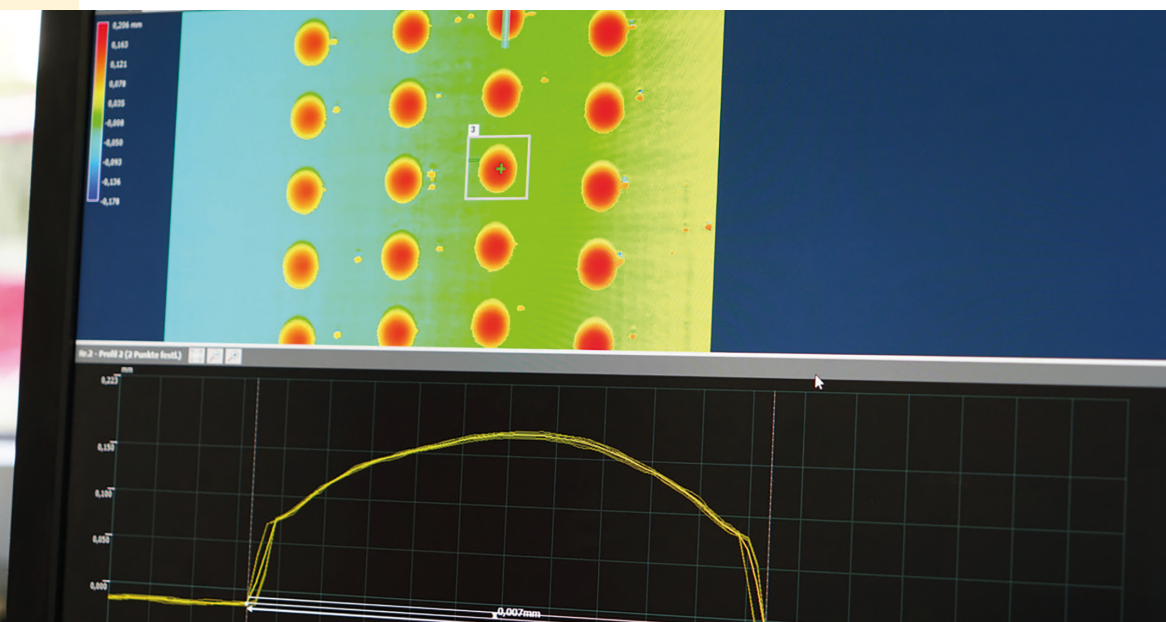


Abbildung 15: Optische Kohärenztomographie für die zerstörungsfreie Prüfung von keramischen Komponenten. © Fraunhofer IKTS

Insbesondere bezüglich Auflösung, Prüfgeschwindigkeit und Flexibilität genügen vorhandene Prüfverfahren häufig noch nicht den spezifischen industriellen Anforderungen. Neue digitale 2D- und 3D-Prüfverfahren erzeugen zudem teils enorme Datenmengen, mit denen mittelständische Unternehmen nicht überfordert werden dürfen.

Datenmanagement – Transport, Integration und Verarbeitung der Daten

Voraussetzung für eine effektive Nutzung der prozessbegleitenden Mess- und Prüfsysteme, vor allem zur Automatisierung und Selbstoptimierung, ist zunächst ein schneller **Datentransport**. Die derzeit in Entwicklung und Standardisierung befindliche Mobilfunktechnologie der 5. Generation (5G) ermöglicht die drahtlose Übertragung großer Datenmengen mit Latenzen von wenigen Millisekunden. Mit der Einführung der 5G-Technologie entsteht gegenwärtig erstmals die Möglichkeit, Prozessabweichungen und Maschinenzustände nahe an der Echtzeit zu erfassen und nach der Datenverarbeitung die Steuerungsbefehle an die Produktionsmaschinen innerhalb kurzer Reaktionszeiten zurückzusenden. Integrierte 5G-fähige Sensorik, drahtlos über 5G-Mobilfunkverbindungen an Analysetools angebunden, wird für produzierende Unternehmen derzeit kommerziell verfügbar und auch erschwinglich, entweder über große Kommunikationsdienstleister oder als 5G-Campusnetz.

Aktuelle Produktionssysteme weisen überwiegend eine starke Fragmentierung in Datensilos auf.



Große Anstrengungen sind im Bereich der Datenintegration erforderlich. Gegenwärtig werden sehr umfangreiche Daten für einzelne Prozessschritte erhoben. Diese sind jedoch kaum vernetzt, sodass keine ganzheitliche Betrachtung von Prozessen möglich ist. Die wahrscheinlich größte Herausforderung liegt in der Vielfalt der Daten. Im Bereich der Sensoren ist die Standardisierung der Schnittstellen noch unzureichend, Daten werden über eine Vielzahl von Formaten und Protokollen geliefert. In jedem Unternehmen sind unterschiedlichste Softwares im Einsatz. Diese sind selten kompatibel, vielfach müssen proprietäre Datenquellen erschlossen werden. In der Industrie 4.0 muss aber jedes System mit jedem anderen System kommunizieren können, d. h. die Daten müssen zentral zusammengebracht werden. Es bedarf daher leistungsstarker und flexibler Datenintegrationswerkzeuge zur Überwindung dieser Hindernisse. Nächster Schritt auf dem Weg zur digitalisierten Produktion ist die Datenverarbeitung, d. h. die intelligente Auswertung und daraus abgeleitete Rückkopplungen in den Fertigungsprozess.

Für eine vollständige Digitalisierung des Fertigungsprozesses oder Teilen davon sind neben Algorithmen vor allem virtuelle Fertigungsmodelle, sogenannte Digitale Zwillinge, notwendig. Diese beschreiben den jeweiligen Prozess vollständig digital, verknüpfen die von den Sensoren gelieferten Daten untereinander und mit Simulationsmodellen, machen Abweichungen zwischen Planung und realer Produktion sichtbar und generieren optimale Steuermaßnahmen. Digitale Zwillinge ermöglichen es auch, Veränderungen in der Produktion oder in der Transportkette virtuell vorzunehmen und dann zu simulieren. So lassen sich Optimierungen schneller überprüfen, Fehler und Fehlplanungen kostengünstig finden und damit Zeit und Geld sparen. Wenn die Kette bzw. Schleife beginnend von der Datengewinnung mit innovativen Sensoren, Datentransport, Datenverarbeitung (Data Analytics) und Rückkopplung in Echtzeit abläuft,

wird es möglich werden, die Fertigungsprozesse flexibler und adaptiver als bisher zu gestalten. Darüber hinaus können Fertigungsprozesse im Voraus geplant, parametrisiert und erprobt werden, einschließlich der Anlagenauslegung. In der Keramikfertigung erfolgt die Speicherung und Analyse der Daten heute vorwiegend dezentral und zeitversetzt. Echtzeitnaher Datentransport und datenbasierte intelligente Algorithmen zur Selbstoptimierung beispielsweise von Ofen- oder Aufbereitungsanlagen oder darüberhinausgehende selbstlernende Regel- und Steuersysteme durch künstliche Intelligenz für gesamte Prozessketten sind noch Zukunftsmusik, wobei allerdings erste ‚Takte‘ schon in der Entwicklung sind. Dies erfordert einen hohen, auch zeitlichen, Aufwand, der durch Einzelunternehmen der keramischen Industrie kaum leistbar ist und eine kollektive Vorgehensweise nahelegt.

Maschinelles Lernen

Ein großer Teil des Prozesswissens der keramischen Industrie steckt in den Köpfen der Mitarbeiter und in der oft über Jahre verfeinerten Methodik der hoch spezifischen Mess- und Prüfeinrichtungen. Für eine Digitalisierung besteht die Herausforderung darin, dieses spezifische, empirische und persönliche Wissen der Produktionsexperten über die komplexen, teils multifaktoriellen Zusammenhänge bei der Keramikherstellung digital abzubilden und nutzbar zu machen. Es ist dabei nicht notwendig, jeden einzelnen Prozess analytisch zu verstehen oder jeden einzelnen Parameter zu messen und zu modellieren. Es genügt, wenn über eine große Zahl von ähnlichen Prozessen empirisch Zusammenhänge gefunden werden, die mit statistischer Signifikanz gültig sind. Dies ist nahezu ein Lehrbuchbeispiel dafür, wie Algorithmen des Maschinellen Lernens eingesetzt werden können. Voraussetzung ist dennoch, dass die Prozessparameter digital messtechnisch erfasst werden. Auch muss die Zahl der untersuchten Prozesse hinreichend groß sein. Denkbar sind an dieser Stelle anonymisierte Datenspenden vieler Unternehmen mit ähnlichen Prozessen – ebenfalls ein Ansatz, der zentral unterstützt werden muss, um insbesondere KMU nicht zu überfordern.

Datensicherheit

Viele kleine und mittelständische Unternehmen sehen die mit der Sensorisierung und Digitalisierung verbundene Speicherung betriebsinterner Daten als großes Sicherheitsrisiko. Verschärft wird die Situation dadurch, dass die genauen Details der Prozessführung, die genauen Zusammensetzungen von Rezepten und Versätzen etc. ein wesentliches, nicht patentierbares und wettbewerbsdifferenzierendes geistiges Eigentum der Keramikhersteller im internationalen Wettbewerb sind, gegen dessen unbefugte Benutzung nur schwer vorgegangen werden kann. Zweifellos steigen mit der zunehmenden Vernetzung und Digitalisierung von Kernprozessen im Unternehmen die Anfälligkeit für Cyberattacken und sonstige IT-Risiken. Zu beachten sind in den Sicherheitsüberlegungen für eine digitalisierte Fertigung z. B. die Vielzahl von offenen Schnittstellen zwischen den Maschinen (Ethernet, Profibus, CC-Link), integrierte Datenbankenfunktionen gepaart mit automatischer Replikation der Daten zu einer Datenbank, inklusive Anbindung an das Internet und die Cloud, sowie Zugriffe über den PC oder mobile Kommunikationsgeräte.

Geeignete Sicherungsmaßnahmen müssen somit von Anfang an integraler Bestandteil von Digitalisierungskonzepten sein. Das Vertrauen in die Datensicherheit und der Schutz von Rezepturen und Prozessparametern muss in der Design-DNA jeder Digitalisierungslösung angelegt sein. Dann könnten solche Lösungen auch gemeinsam von mehreren Unternehmen getragen werden. Europaweit bieten Initiativen wie GAIA-X eine Möglichkeit, zentrale Plattformen mit hohem Datensicherheits- und Datenschutzniveau bereitzustellen. Weiterhin ermöglichen auch und gerade Cloud-basierte Ansätze der keramischen Industrie, an digitalen Geschäftsmöglichkeiten zu partizipieren, ohne die komplette Hard- und Software selbst beschaffen und betreiben zu müssen.

Datenverlust bis hin zu Datendiebstahl oder Datenmanipulation können die Wettbewerbs- und Handlungsfähigkeit substanziell gefährden.



Keramik-spezifische Anforderungen

Daten und Prozessbeschreibungen in der keramischen Industrie sind im Kontext einer mehr als 300-jährigen industriellen Tradition zu sehen, inklusive einer hoch effizienten, aber sehr spezifischen Fachsprache („Keramikersprache“), die außerhalb der Keramikindustrie faktisch weder verwendet noch verstanden wird. Für eine effiziente Einführung digitaler Prozessregelungen müssen diese Systeme also „die Sprache der Keramiker“ sprechen, nicht umgekehrt. Ebenso ist die automatisierte Auswertung tausender Rezepte, Versätze und Prozessbeschreibungen keramischer Spezialisten nur möglich, wenn das Datenbanksystem in entsprechenden Kategorien strukturiert ist. Daher ist es notwendig, für die Datenextraktion aus Bestandsdaten und für die Programmierung produktionstechnischer Mensch-Maschine-Interfaces auch Methoden der Computerlinguistik einzusetzen. Es müssen die für die keramischen Fachzusammenhänge notwendigen Ontologien erstellt werden und als Grundlage für Datensammlungen, Datenbanken und Bediensysteme der Produktionsprozesse dienen. Auch dies erfordert viel Unterstützung insbesondere der KMU.

In jedem Falle existiert aber in großen Teilen der keramischen Industrie noch eine erhebliche Wissens- und Kompetenzlücke, die geschlossen werden muss. Viele Unternehmen sind zu klein, um den Mehraufwand bei einer zweckdienlichen Einführung der Digitalisierung zu stemmen. Damit reihen sie sich in die Vielzahl anderer KMU ein, die z. B. aus dem Maschinenbau kommen. Allerdings erfordert der keramische Herstellprozess durch seine Komplexität, wie vielfach dargestellt, nochmals erheblich höhere Anstrengungen im Vergleich zu anderen Branchen. Ein Verzicht auf Digitalisierung würde jedoch bedeuten, im internationalen Wettbewerb zurückzufallen und den Zugang zu wichtigen Märkten zu verlieren oder, wie im Bereich der Batterietechnik, gar nicht erst zu erlangen. Damit wären viele Unternehmen mittelfristig in ihrer Existenz bedroht.

Chancen der Digitalisierung für Keramikproduzenten

Grundsätzlich bieten sich für Keramikproduzenten verschiedene Möglichkeiten, die Digitalisierung für ihren Geschäftserfolg zu nutzen. Vier wesentliche Chancen werden in diesem Kapitel kurz erläutert:

Optimierung keramischer Fertigungsprozesse

Durch den Einsatz digitaler Technologien im Bereich der Anlagen- und Prozessführung bieten sich zweifelsfrei große Chancen, z. B. für bessere Qualität, höhere Fertigungsausbeute, reduzierte Kosten, schnellerer Produktwechsel, kürzere Produkteinführung, weit über den klassischen Verbesserungsprozess hinaus. Prozessdaten mit Latenzen von wenigen Millisekunden aufnehmen, in Echtzeit auswerten und so den Prozess der gesamten Fertigungskette optimieren, wird möglich. Dadurch können Prozessabweichungen und kritische Maschinenzustände rechtzeitig erfasst und korrigiert werden.

Durch die Kopplung von Sensoren, superschnellem Datentransport und Data Analytics eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Automatisierung der industriellen Fertigung:

- Die Kombination verschiedener Sensorsysteme (Sensor Fusion) und Maschinellen Lernens ermöglicht einen automatisierten Defektnachweis am Werkstück bereits im Produktionsprozess. Dies ist besonders relevant für die Keramik, da fehlerbehaftete Zwischenprodukte ausgesondert werden können, noch bevor sehr teure oder energieintensive Bearbeitungsschritte durchgeführt werden.
- Keramische Bauteile werden zu Smart Objects durch Integration von Funk- und Sensorplattformen, die das Bauteil über den Herstellprozess begleiten und den Prozess dokumentieren. Stattet ein Unternehmen sowohl Maschinen und Werkzeuge als auch Produkte mit solchen Smart Tags aus, kann es anschließend die gewonnenen Einzeldaten in Kombination miteinander zentral auswerten und nutzen oder z. B. eine lückenlose Einhaltung qualitätsbestimmender Parameter nachweisen.
- Durch Verknüpfung von Maschinen-, Prozess- und Produktdaten mit dem digitalen Zwilling lassen sich Qualitätsabweichungen bereits bei ihrer Entstehung frühzeitig erkennen und damit kostenoptimal für den Gesamtprozess korrigieren.
- Sensoren werden den Zustand von Fertigungsaggregaten während ihrer gesamten Lebensdauer überwachen und den Wartungsbedarf zum optimalen Zeitpunkt melden. Damit wird Predictive Maintenance – die vorausschauende Wartung – möglich.

Vermarktung keramikspezifischer Digitalisierungslösungen

Keramische Unternehmen können in Kooperation mit Digitalisierungsexperten eigene Lösungen entwickeln oder kommerziell verfügbare Systeme spezifisch anpassen. Dies ist zunächst mit erheblichem technischen und finanziellen Aufwand verbunden, der einer Digitalisierungslösung im Wege stehen kann. Abhilfe kann hier ein branchenweites, koordiniertes Vorgehen schaffen, bei dem gemeinsam entwickelte Musterlösungen individualisiert werden. Solche Lösungen könnten auch an andere Unternehmen weiterveräußert werden, innerhalb und außerhalb des Industriebereichs Keramik. Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit zur Etablierung neuer Geschäftsmodelle, die auf Entwicklung und Vertrieb digitaler keramik-spezifischer Lösungen beruhen.

Keramische Komponenten für die Digitalisierung

Keramik kann neben der Nutzung der Digitalisierung auch eigene Beiträge für die Digitalisierung leisten. Keramische Sensoren, die außerordentlich robust, multifunktional und integrierbar sein können, wären das Paradebeispiel. Dies würde sich in den Trend einfügen, dass die Entwicklung neuer Sensorsysteme mit erweitertem Leistungs- und Funktionsspektrum gegenwärtig mit hoher Dynamik erfolgt. Neben der fortlaufenden Verbesserung der Leistungsparameter der Sensoren (z. B. Messbereich, Auflösung, Genauigkeit) durch Optimierung bekannter und Einführung neuer Sensorprinzipien und Prüfverfahren, sind weitere bedarfsgetriebene Schwerpunkte in der Sensorentwicklung zu erkennen:

- Multifunktionale Sensoren, die mehrere Größen gleichzeitig bereitstellen
- Technologiespezifische Sensoren
- Systemintegration und direkte Anbindung an Prozessleitsysteme
- Energieautarke Sensorsysteme durch Energy Harvesting aus der direkten industriellen Umgebung

In all diesen Bereichen können und müssen keramische Lösungen Beiträge leisten – vom Packaging bis zu funktionskeramischen Komponenten. Keramische Komponenten sind Wegbereiter für Sensorik, Datentransport und Datenspeicherung. Mit der rasant voranschreitenden Digitalisierung entsteht ein gewaltiger Wachstumsmarkt für diese Komponenten.

Wissenserhalt durch Digitalisierung

Nicht zuletzt bietet die Digitalisierung der Keramikindustrie die einmalige Chance, den demografischen Wandel zu adressieren, indem das gesamte vorhandene Wissen über Keramiken und ihre Herstellung digital und mit Methoden des Maschinellen Lernens erschlossen und verfügbar gemacht wird. Damit wird die Erfahrung langjähriger Mitarbeiter auch bei deren Ausscheiden gesichert. Das Wissen kann mit Data Mining auf neue, bisher unbekannt gebliebene Zusammenhänge hin durchsucht werden und die Systeme zur Steuerung von keramischen Prozessen können auch für die nächste Generation von Bedienern in „Keramikersprache“ gestaltet werden.

Handlungsempfehlungen

Die keramische Industrie in Deutschland sieht sich hinsichtlich der Digitalisierung einer dreifachen Herausforderung gegenüber:

Erstens operiert sie unter enormem Kosten- und Qualitätsdruck im internationalen Wettbewerb, wodurch nur wenige freie Mittel und Kapazitäten für die Digitalisierung verfügbar sind.

Zweitens werden Kundenerwartungen hinsichtlich digitaler Integration der Lieferketten und Qualitätsthemen wie Bauteil- und Chargenrückverfolgbarkeit bis ins kleinste Detail immer höher, weil Kunden dies aus anderen Branchen zunehmend so gewohnt sind.

Drittens ist der keramische Prozess durch seine Komplexität besonders schwierig zu digitalisieren.

Es wird für einzelne KMU enorm schwierig, diese mehrfachen Herausforderungen im Alleingang zu lösen. Daher ist ein konzertiertes, branchenweites Vorgehen nötig, welches die KMU, ihre Kunden und die in Deutschland sehr gut ausgebaute angewandte Forschungskompetenz bündelt. Da die zu lösenden Probleme vielfach sehr vergleichbar sind, kann mit modellhaften, adaptierbaren Branchenlösungen und gemeinsamen Plattformen sehr viel Positives bewirkt werden. Gelingt das Vorhaben, trägt dies nicht nur zum Erhalt der für Deutschlands technologische Souveränität so wichtigen Keramikindustrie bei. Es kann sogar der Keramik Zugang zu Branchen ermöglichen, die ein enormes Wachstumspotential bieten, die aber aufgrund ihrer riesigen Stückzahlen und hohen Qualitätsanforderungen eine volldigitale Produktionskette schlicht und einfach voraussetzen, wie zum Beispiel die Batterieindustrie. Die Autoren des vorliegenden Strategiepapiers glauben fest daran, dass es möglich ist, diese Herausforderung zu meistern. Sie schlagen daher folgende Handlungsoptionen vor:



Know-how zu den Möglichkeiten der Digitalisierung aufbauen und ständig aktualisieren

Es müssen branchenweit Formate entwickelt werden, die das Wissen um die Möglichkeiten der Digitalisierung in die Unternehmen tragen, in denen die Bedarfe und der aktuelle Stand der Unternehmen ermittelt werden, in denen Austausch unter Gleichgesinnten stattfindet und in denen auch der Blick über den Tellerrand hinaus in andere Branchen und zu den Kunden erfolgt. Aktuell werden beispielsweise für die Automatisierung von keramischen Fertigungslinien weder durchgängige Prozesssteuerungen noch eine gesamtheitliche Inline-Prozessüberwachung mittels Sensoren eingesetzt, da noch keine überzeugenden Sensorkonzepte angeboten werden und zumindest in der technischen Keramik kleine Losgrößen den Einsatz unrentabel erscheinen lassen. Insbesondere sind die Möglichkeiten der fertigungsbegleitenden Sensorik vermutlich nicht immer bekannt.



Digitalisierungsstrategie erarbeiten

Die Digitalisierung muss in jedem Unternehmen einem klaren Ziel dienen und damit einer klaren Strategie und Kosten-Nutzen-Abwägung folgen. Sie ist kein Selbstzweck. Dennoch sind die Abläufe und Probleme in vielen Unternehmen der keramischen Industrie sehr vergleichbar. Es bietet sich daher an, auch und gerade um die Lasten für das einzelne Unternehmen zu verringern, dass gemeinschaftlich Musterlösungen, Strategiebausteine und andere Hilfen erarbeitet werden, die in konkreten Unternehmen gut genutzt und aus denen eine Digitalisierungsstrategie und konkrete Ziele der Digitalisierung erarbeitet werden können.



Digitalisierungslösungen entwickeln und umsetzen

Es ist wichtig, schnell konkrete Lösungen zu erarbeiten, die mit Leuchtturmcharakter den Nutzen der Digitalisierung in der Keramik demonstrieren. Es müssen auf Basis konkreter, nachvollziehbarer Kosten-Nutzen-Analysen mehrere Anwendungsszenarien erschlossen werden, die den Dialog zwischen Keramik- und Digitalunternehmen einerseits und zwischen Forschungseinrichtungen und Industrie andererseits nutzen und darlegen. Die Vorteile solcher Lösungen müssen nachvollziehbar und ersichtlich sein. Nur so kann es gelingen, Motivation und Aufbruchstimmung in einer zuweilen zögerlichen und konservativen Branche zu erzeugen. Das dafür geeignete Instrumentarium ist reichlich vorhanden und reicht von fertigungsrelevanter Inline-Prozessüberwachung über abgestimmte Schnittstellen für die Anlagenverknüpfung, neuartige Echtzeit-Steuerkonzepte bis zur Selbstoptimierung mittels selbstlernender Systeme und künstlicher Intelligenz.



Kenntnisse der Beschäftigten erhöhen

Die Steigerung des Kenntnisstandes zu den Möglichkeiten der Digitalisierung ist eine wichtige und nützliche Maßnahme. Der Einsatz digitaler Methoden im industriellen Fertigungsbereich der Keramik, über den heutigen Stand hinaus, erfordert sehr oft ein Umdenken bezüglich der Abläufe, Fertigungsorganisation und Personalqualifikation. Auch drängen mehr und mehr junge Absolventen auf den Markt, die mit den Möglichkeiten der Digitalisierung groß geworden sind. Soll die Keramikindustrie ein attraktiver Arbeitgeber bleiben, muss diesen Menschen ein entsprechend kompetentes Umfeld geboten werden. Dann bringen diese auch ihre Kenntnisse und ihre Kreativität ein. Weiterhin werden interne oder externe Software- und IT-Experten zum unverzichtbaren Teil der keramischen Wertschöpfung. Kooperationen mit Dienstleistern im Software- und IT-Bereich werden zur täglichen Routine. Auch im Bereich der Ausbildung von Keramikfachleuten selbst müssen Kenntnisse und Fähigkeiten der digitalen Technologien integriert werden.



Fördermöglichkeiten nutzen

In der Vergangenheit haben sich einige Förderprogramme bewährt, um Digitalisierungsprozesse zu unterstützen. Beispielsweise förderte das Programm KMU-innovativ spezifisch die Digitalisierung und Virtualisierung von Produktion und Produktionssystemen. Außerdem konnten digitale Technologien auch über weitere Programme wie go-digital, das „Netzwerk Mittelstand-Digital“ oder EU-Forschungsprogramme gefördert werden. Digitalisierung und Wirtschaft 4.0 sollte – wie auch in der Hightech-Strategie des Bundes – ein Fokus der Förderprogramme für wettbewerbsfähige Wirtschaft bleiben, sodass Keramikunternehmen auf ihrem Digitalisierungspfad unterstützt werden können. Die oben bereits dargelegten Defizite bezüglich geeigneter Sensorik sowie die KMU-spezifischen Prozesse führten in der Vergangenheit jedoch vielfach dazu, dass diese Programme nicht in Anspruch genommen werden konnten.

Fazit

Die Keramikindustrie ist mit ihren Produkten in beinahe allen Bereichen des Arbeits- und Alltagslebens vertreten. Vielfach sind Produkte und Prozesse der Keramik „Schrittmacher“ für die Bewältigung gesamtgesellschaftlicher Herausforderungen in Mobilität, Energie und Gesundheitswesen.

Die Heterogenität der Branche hat jedoch auch dazu geführt, dass eine branchen-umfassende Einführung der wertschöpfungssteigernden digital gestützten Prozesse nicht im notwendigen Maße stattgefunden hat. Erfolgreiche Beispiele ausgewählter Segmente wie der funktionskeramischen Piezoaktoren verdeutlichen, wie Produktivität und damit Wettbewerbsfähigkeit gesteigert werden können. Für Deutschland systemrelevante Technologien und Arbeitsplätze können somit erhalten und sogar ausgebaut werden.

Das vorliegende Strategiepapier zeigt auf, dass nur eine konzertierte Anstrengung der gesamten Keramikbranche die notwendigen keramikspezifischen Standards für eine umfassende Digitalisierung erzielen kann. Eine begleitende politische Unterstützung kann diesen Prozess initiieren, beschleunigen und zum Erfolg führen. Die Autoren dieses Strategiepapiers sind sich sicher, dass das große Potenzial der Keramik erst noch erschlossen wird – mit einer jahrtausendealten Tradition im Herzen und modernster Technologie in der Hand.

Glossar

Begriff	Erläuterung
Algorithmus	Verfahren zur Lösung eines mathematischen Problems. Werden Algorithmen in Programmcodes implementiert, können Computer Lösungen für bestimmte Problemstellungen berechnen. ^[7]
Big Data	Datenmengen, die so groß sind, dass ihre Verarbeitung spezielle Hard- und Software benötigt. Für Unternehmen geht es bei Big Data häufig darum, diese Informationen vorteilhaft zu verarbeiten (siehe Maschinelles Lernen). ^{[8][9]}
Data Analytics	Data Analytics ist ein Ansatz, bei dem Daten analysiert werden, insbesondere Big Data, um daraus Schlussfolgerungen für strategische Entscheidungen in Unternehmen zu ziehen und Umsätze zu steigern. ^[10]
Data Mining	Analyse von großen Datenmengen durch Algorithmen, um Muster zu erkennen und für einen bestimmten Zweck zu nutzen. ^[11]
Digitale Werkzeuge	Werkzeuge, die Nutzern auf dem Rechner oder Laptop, Smartphone oder Tablet als App oder Programm zur Verfügung stehen und helfen, eine bestimmte Tätigkeit auszuüben. ^[12]
Echtzeit	Vorgegebenes Zeitfenster, in dem ein IT-System reagieren muss. Die Reaktionszeit kann zwischen einigen Mikrosekunden und Sekunden liegen. ^[13]
Finite Element Methode (FEM)	Numerisches Verfahren, das unter anderem im Rahmen von Simulationen zur gezielten Strukturanalyse und -optimierung eingesetzt wird. ^[14]
Graphical User Interface (GUI)	Die Graphische Benutzeroberfläche ist eine grafische Schnittstelle zur Bedienung von Programmen und Maschinen. ^[15]
Internet der Dinge (Internet of Things, IoT)	Vision einer globalen Vernetzung physischer Gegenstände und deren Zusammenarbeit durch Informations- und Kommunikationstechniken.
Latenz (Latenzzeit)	Zeitraum zwischen einem Ereignis und dem Eintreten einer sichtbaren Reaktion darauf. ^[16]



Maschinelles Lernen (Machine Learning)	Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz. Algorithmen, die selbstständig Muster in Datenbeständen erkennen und durch die Analyse von Daten Lösungen für gestellte Probleme entwickeln.
Manufacturing Execution System (MES)	Teil eines Fertigungsmanagementsystems, das als prozessnahe Ebene operiert und für die Produktionssteuerung verantwortlich ist. Direkt an die Betriebsprozesse angebunden ermöglicht es eine Fertigungskontrolle in Echtzeit. ^[17]
Predictive Maintenance	Durch die Auswertung von Maschinendaten werden notwendige Wartungsarbeiten oder der Ausfall eines Bauteils, einer Maschine oder Anlage vorhergesagt. Ziel ist es, Ausfallszeiten von Maschinen und Anlagen möglichst niedrig zu halten bzw. ganz zu verhindern. ^[18]
Schnittstelle, auch Datenschnittstelle	Übergangsstelle zwischen verschiedenen Komponenten eines IT-Systems, über die ein Datenaustausch oder Datenverarbeitung realisiert wird. Dies können Mensch-Computer-Schnittstellen oder Computer-Computer-Schnittstellen sein. ^[19]
Sensor Fusion	Intelligente Kombination von Messwerten von verschiedenen, meist untereinander abhängigen Sensoren, um Zusammenhänge und Parameter für die Anwendungsteuerung abzuleiten. ^[20]
Smart Object	Intelligente Objekte, die mit Ortungs- und Kommunikationstechnologien ausgestattet werden und in ein Kommunikationsnetz, dem Internet der Dinge, eingebunden sind. ^[21]
Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)	Komponente, die programmiert und eingesetzt wird, um eine Anlage oder Maschine zu regeln bzw. zu steuern. ^[22]
5G	Mobilfunktechnologie der 5. Generation. Nachfolgestandard von Long Term Evolution (LTE). 5G nutzt ein breites Frequenzspektrum, hat Datenraten von 10 GB pro Sekunde und eine Latenzzeit von unter einer Millisekunde. ^[23]

Quellenverzeichnis

- [1] Initiative D21 e. V. (2020), Wie digital ist Deutschland? D21-Digital-Index 2019 / 2020, abgerufen am 01.02.2021 von <https://initiated21.de/d21-digital-index/>
- [2] Dr. Karl Lichtblau, Dr. Thomas Schleiermacher, Dr. Henry Goecke, Peter-Schützdeller, IW Consult (2018), Digitalisierung der KMU in Deutschland, abgerufen am 01.02.2021 von https://www.iwconsult.de/fileadmin/user_upload/projekte/2018/Digital_Atlas/Digitalisierung_von_KMU.pdf
- [3] Jens M. Jäger, David Görzig, WDominik Paulus-Rohmer, Heike Schatton, Sina Baku, Markus Weskamp, Dr. Dominik Lucke (2015), abgerufen am 01.02.2021 von <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Publikationen/studien/studie-industrie40-chancen-perspektiven.html>
- [4] Deloitte (2016), Manufacturing 4.0: Meilenstein, Must-Have oder Millionengrab? Warum bei Manufacturing 4.0 die Integration den entscheidenden Unterschied macht, abgerufen am 08.02.2021 von <https://www2.deloitte.com/de/de/pages/operations/articles/manufacturing-4-0-meilenstein-must-have-oder-millionengrab.html>
- [5] Bundesministerium für Forschung und Bildung (BMBF) (2019), Richtlinie zur Förderung von Projekten im Programm „KMU-innovativ: Produktionsforschung“, Bundesanzeiger vom 02.12.2019, abgerufen am 29. Januar 2021 von <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-2740.html>
- [6] Förderberatung des Bundes Forschung und Innovation (o. J.), Digitale Technologien, abgerufen am 29. Januar 2021 von <https://www.foerderinfo.bund.de/de/digitale-technologien-193.php>
- [7] Wissenschaftsjahr (2018), Algorithmus, abgerufen am 22. Januar 2021 von https://www.wissenschaftsjahr.de/2018/footer-meta/glossar/glossar-detailansicht/?tx_dpnglossary_glossarydetail%5Bterm%5D=12&tx_dpnglossary_glossarydetail%5Baction%5D=show&tx_dpnglossary_glossarydetail%5Bcontroller%5D=Term&cHash=54c2fa69103d775598637571985e2c90
- [8] Radtke, Michael; Litzel, Nico (2019), Was ist Big Data?, abgerufen am 22. Januar 2021 von <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-big-data-a-562440/>
- [9] Wuttke, Laurenz (o. J.), Was ist Big Data? Definition, 4 V's und Technologie, abgerufen am 22. Januar 2021 von <https://datasolut.com/was-ist-big-data/#big-data-Definition>
- [10] AT Internet (o. J.), Glossar Data Analytics, abgerufen am 22. Januar 2021 von <https://www.atinternet.com/de/glossar/data-analytics/>

- [11] Forum Verlag Herkert GmbH (o. J. b), Glossar Digitalisierung – Data Mining, abgerufen am 22. Januar 2021 von <https://www.akademie-herkert.de/digitalisierung-glossar/D>
- [12] Plattner, Katharina (2020), Digitale Tools: Werkzeuge zur Prozessoptimierung, abgerufen am 22. Januar 2021 von <https://www.digital-minds.agency/digitale-tools/>
- [13] Rüdiger, Ariane; Ostler, Ulrike (2019), Was ist Echtzeit und wo braucht man sie?, abgerufen am 22. Januar 2021 von <https://www.datacenter-insider.de/was-ist-echtzeit-und-wo-braucht-man-sie-a-845434/>
- [14] Zwettler, Monika (2020), Was ist eigentlich FEM?, abgerufen am 22. Januar 2021 von <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/was-ist-eigentlich-fem-a-969326/>
- [15] Rauch, Gedeon; Augsten, Stephan (2017), Was ist eine GUI?, abgerufen am 01.03.2021 von <https://www.dev-insider.de/was-ist-eine-gui-a-651868/>
- [16] Deutsche Telekom AG (2016), Was ist Latenz? In Echtzeit durchs Netz, abgerufen am 22. Januar 2021 von <https://www.telekom.com/de/konzern/details/was-ist-latenz-in-echtzeit-durchs-netz-435638>
- [17] SoftSelect GmbH (o. J. a), Definition MES - Manufacturing Execution System abgerufen am 22. Januar 2021 von <http://www.softselect.de/business-software-glossar/mes-manufacturing-execution-system>
- [18] Forum Verlag Herkert GmbH (o. J. c), Glossar Digitalisierung – Predictive Maintenance, abgerufen am 22. Januar 2021 von <https://www.akademie-herkert.de/digitalisierung-glossar/P>
- [19] SoftSelect GmbH (o. J. b), Definition Interface, abgerufen am 22. Januar 2021 von <http://www.softselect.de/business-software-glossar/interface>
- [20] DATACOM Buchverlag GmbH (2008), Sensorfusion, abgerufen am 22. Januar 2021 von <https://www.itwissen.info/Sensorfusion-sensor-fusion.html>
- [21] Fraunhofer IIS (2021), Smart objects, abgerufen am 22. Januar 2021 von <https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/lv/dataanalytics/smart-object.html>
- [22] Juschkat, Katharina (2019), Was ist eine SPS? Definition, Grundlagen und Funktion, abgerufen am 01.03.2021 von <https://www.elektrotechnik.vogel.de/was-ist-eine-sps-definition-grundlagen-und-funktion-a-773404/>
- [23] Luber, Stefan; Litzel Nico (2019), Was ist 5G?, abgerufen am 22. Januar 2021 von <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-5g-a-885929/>

