

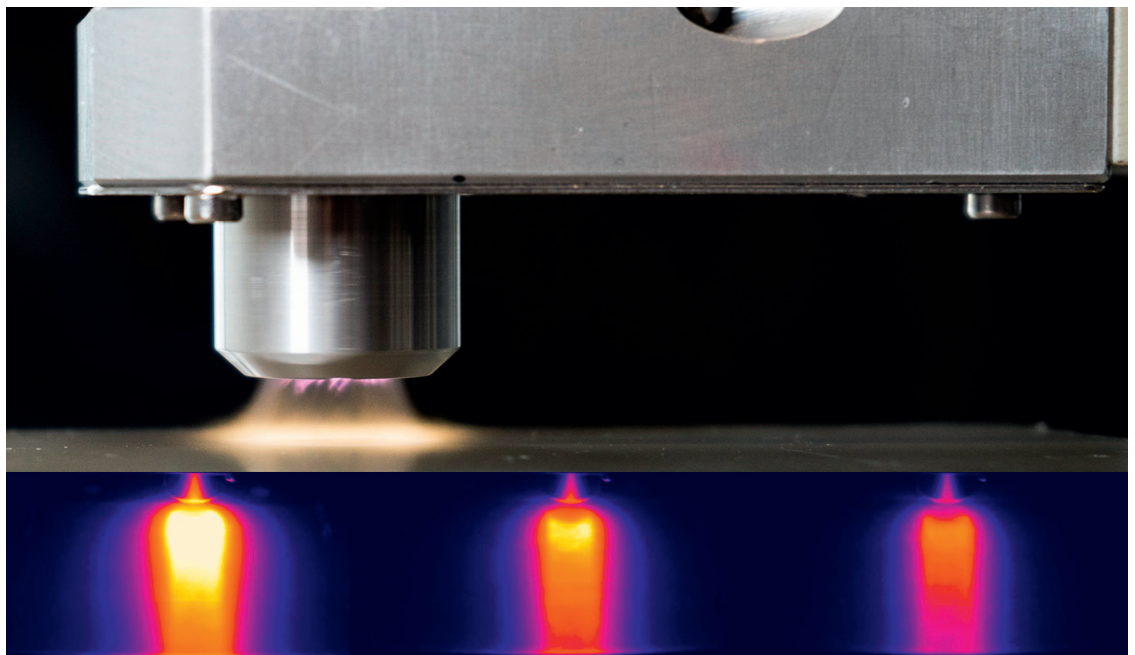
Thermografie zur Qualitätssicherung von behandelten Kunststoffoberflächen

## Aktivierte Oberfläche unter Kontrolle

Die passive Thermografie stellt eine vielversprechende Option zur Inline-Prozessüberwachung von Oberflächenvorbehandlungen an Kunststoffprodukten dar. Am SKZ entwickelte Auswertemethoden ermöglichen dabei einen automatisierten Abgleich mit Referenzdaten und eine Auswertung anhand thermischer Prozessfenster.

Atmosphärendruckplasma-Behandlung mit thermischer Überwachung bei unterschiedlichen Behandlungsgeschwindigkeiten.

© SKZ



Das Bestreben, Prozess- und Produktinformationen reproduzierbar, flächig und zerstörungsfrei zu erfassen, ist in nahezu allen Industriebereichen groß. Gerade bei Oberflächenvorbehandlungen von Kunststoffbauteilen sind die aktivierten nicht von unbehandelten Flächen zu unterscheiden, weswegen eine Qualitätssicherung (QS) essenziell ist.

Für gute Ergebnisse beim Kleben, Bedrucken, Lackieren, Laminieren und Beschichten von Kunststoffbauteilen ist für viele Kunststofftypen eine adäquat vorbereitete und kontaminationsfreie Oberfläche Voraussetzung. Bei niederenergetischen Kunststoffen wie beispielsweise den häufig verwendeten Thermoplasten Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) ist zudem oftmals eine zusätzliche Oberflächenvorbehandlung

notwendig [1], um die Benetzung, unterschiedliche Bestandteile der Adhäsion und die resultierende Haftung, Langzeitstabilität und Reproduzierbarkeit zu steigern [2, 3].

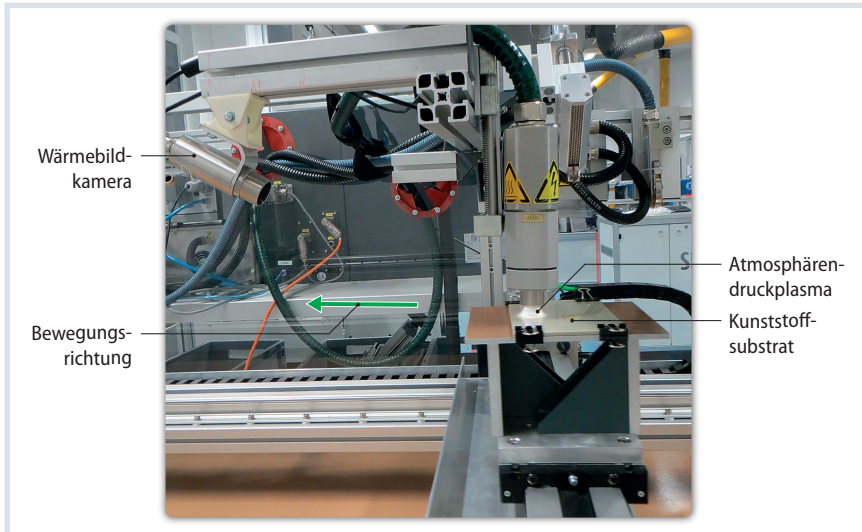
Heutige Verfahren zur Oberflächenbehandlung sind so vielfältig wie die Kunststoffsubstrate und entsprechende Anwendungen, weswegen auch zahlreiche Charakterisierungsmöglichkeiten existieren. Derzeitige Verfahren sind in der Regel Offline-Methoden wie beispielsweise Testtinten und Kontaktwinkelmessungen, Aerosol-Benetzungstests [4], Plasmaetiketten [5], Farbreaktionen [6] oder chemische Analytik wie etwa die Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) [7]. Ergänzend kommen topografische Untersuchungen mit optischen Verfahren oder der Rasterkraftmikroskopie hinzu [8, 9]. Nachteilig an den ge-

nannten Verfahren ist, dass oftmals nicht die eigentliche Verarbeitungsfläche charakterisiert werden kann, sondern nur kleine Stellen exemplarisch gemessen werden, und dass die chemische Analytik kosten- und zeitintensiv ist.

### *Einzige Bedingung: Platz für die Thermokamera*

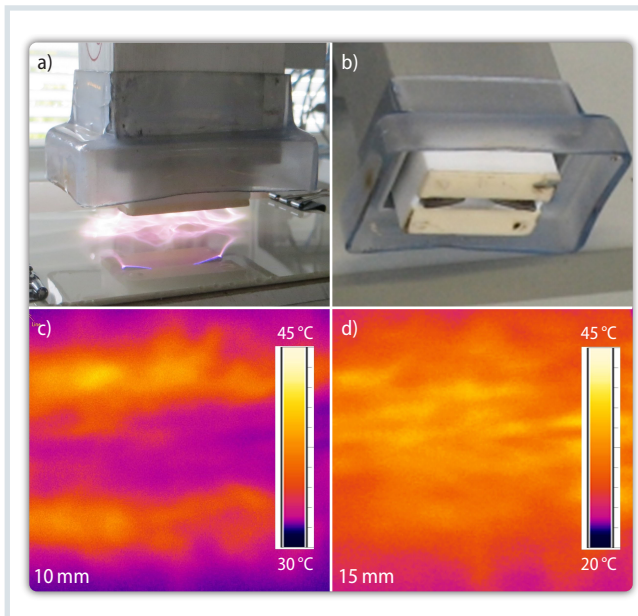
Die passive Thermografie liefert einen alternativen wirtschaftlichen Ansatz für die berührungslose und flächige Charakterisierung von Vorbehandlungszuständen auf Kunststoffoberflächen direkt nach den Vorbehandlungsprozessen. Einzige Bedingung ist, dass die Messfläche nach der Oberflächenbehandlung für die Thermokamera zugänglich ist.

Das Messprinzip der Thermografie erlaubt eine eindeutige Temperaturbe-



**Bild 1.** Labor-Messaufbau bei einer Atmosphärendruckplasma-Behandlung mit Rotationsdüse und Prozessüberwachung mittels thermischer Kamera. © SKZ

**Bild 2.** Coronajet-Behandlung (a) mit Blick auf die Elektroden (b); darunter thermografische Aufnahmen bei 50 mm/s Behandlungsgeschwindigkeit und 10 mm Behandlungsabstand (c) sowie 15 mm Behandlungsabstand (d). Die Farbverteilung kann Oberflächentemperaturen zugeordnet werden. © SKZ



stimmung aus einem Strahlungssignal [10]. Reproduzierbare und berührungslose Temperaturmessungen werden in der Anwendung im Wesentlichen durch verschiedene Faktoren wie beispielweise Reflexionen, die Transmission der Luft und den Substratemissionsgrad beeinflusst [11]. Der hohe Emissionsgrad der Kunststoffe (zwischen 0,90 und 0,95) erlaubt es erfreulicherweise, die Temperatur auf dem Messobjekt auch bei kleinen Temperaturdifferenzen exakt zu bestimmen, und ermöglicht somit prinzipiell eine präzise berührungslose Messung der Oberflächentemperatur auf dem Kunststoffteil [12]. Obwohl die Oberfläche per se nicht genau definiert ist, wird nachfolgend von einer Oberflä-

chentemperatur gesprochen, wohlwissend, dass das Strahlungssignal sich nicht nur aus der obersten Atomlage, sondern auch aus oberflächennahen Schichten zusammensetzen kann.

**Versuche mit verschiedenen Behandlungsverfahren**

In den am SKZ durchgeführten Untersuchungen wurde eine Thermografiekamera Xi400 (Hersteller: Optris GmbH) verwendet, um die Behandlungsverfahren Beflammen, Coronajet, kaltaktives Plasma sowie Atmosphärendruckplasma sowohl mit statischer als auch rotierender Düse thermografisch zu charakterisieren (Bild 1). Ergänzend dazu wurden

Kontaktwinkelmessungen durchgeführt sowie Klebungen mit Bestimmung der Haftzugfestigkeiten mithilfe der Zentrifugal-Festigkeits-Prüftechnik [13] (Centrifugal Adhesion Testing Technology, CAT-Technologie), um verschiedene Behandlungsintensitäten zu referenzieren.

Zu Beginn der Untersuchungen wurden geeignete Kamerapositionen erprobt. So gilt es beispielsweise Umgebungsreflexionen oder die Eigenreflexion der thermischen Kamera zu vermeiden. Zudem entwickelte die Arbeitsgruppe am SKZ verschiedene Auswertemethodiken auf Basis von Auswertegeometrien sowie Positionierungen im Thermogramm. Die verwendeten Kunststoffe wurden hinsichtlich ihres Emissionsgrads durch eine Referenzmethode im Temperaturbereich zwischen 30 und 100°C charakterisiert. Für die thermografischen Aufnahmen wurde nachfolgend ein gemittelter Emissionsgrad von 0,95 verwendet. »

**Info**

**Text**

**Michael Heilig, M.Sc.**, ist seit 2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter im Bereich „Fügen und Oberflächentechnik“ am SKZ; m.heilig@skz.de

**Dr. Eduard Kraus** ist seit 2007 am SKZ und dort seit 2021 als Bereichsleiter „Fügen und Oberflächentechnik“ tätig; e.kraus@skz.de

**Dr. rer. nat. Thomas Hochrein** ist seit 2007 am SKZ und seit 2017 Geschäftsführer der SKZ – KFE gGmbH; t.hochrein@skz.de

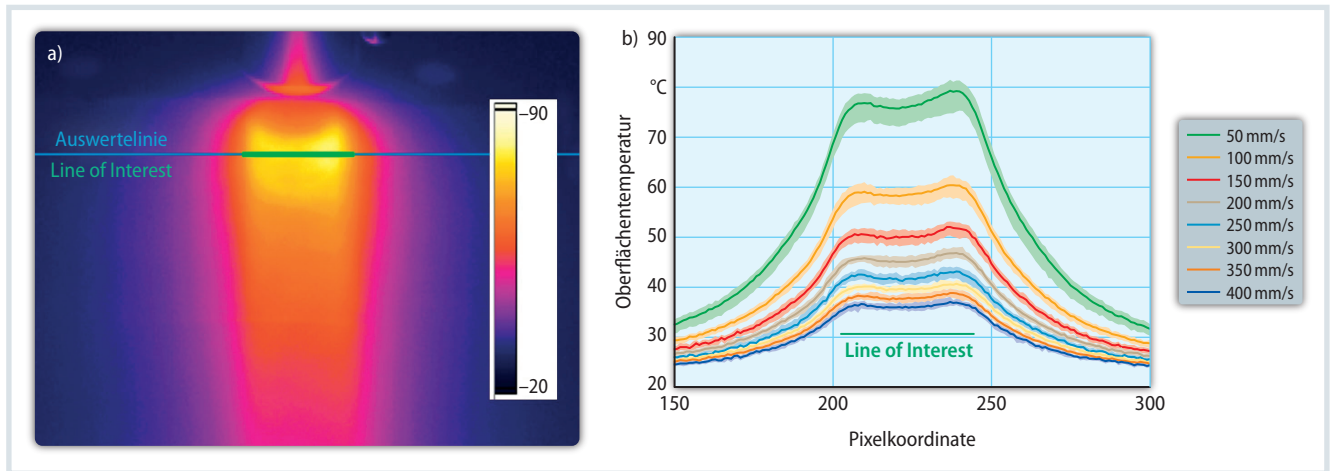
**Prof. Dr.-Ing. Martin Bastian** ist seit 2006 Institutsdirektor des Kunststoff-Zentrums SKZ.

**Dank**

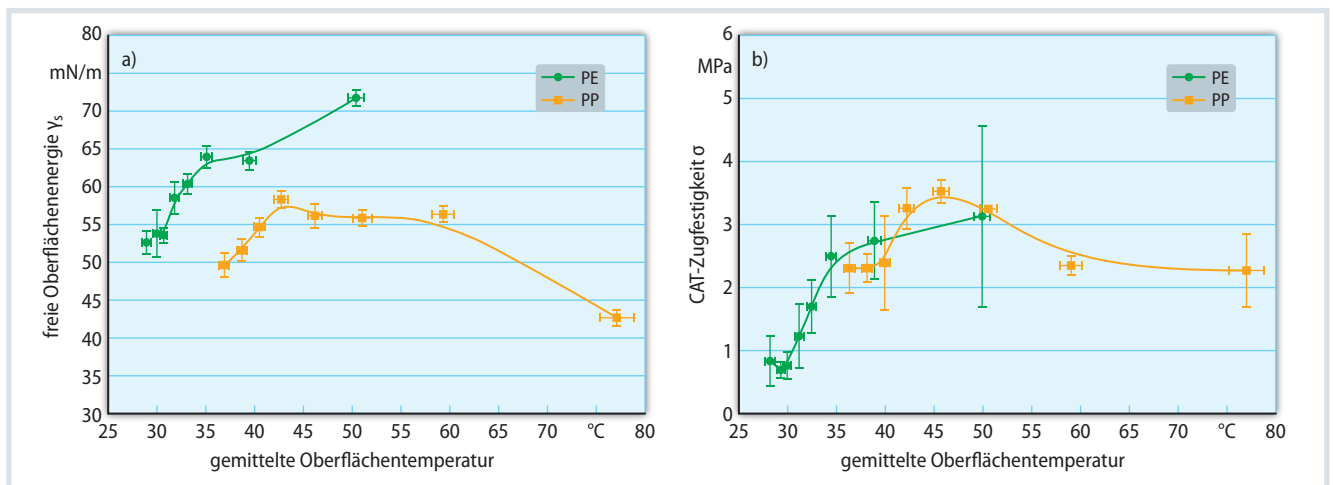
Das IGF-Vorhaben 20320 N der Forschungsvereinigung des Kunststoffzentrums SKZ wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

**Literatur & Digitalversion**

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/onlinearchiv](http://www.kunststoffe.de/onlinearchiv)



**Bild 3.** Thermografische Aufnahme mit Auswertelinie und Line of Interest einer Atmosphärendruckplasma-Behandlung mit Rotationsdüse auf PP (a) sowie Temperaturmittelwerte und Minimum-Maximum-Werte der Auswertelinie über 10 cm Messstrecke bei verschiedenen Behandlungsgeschwindigkeiten (b). Quelle: SKZ; Grafik: © Hanser



**Bild 4.** Korrelation der Oberflächentemperaturmittelwerte in der Line of Interest mit der freien Gesamtflächenenergie (a) und CAT-Zugfestigkeit von 2K-Epoxidklebungen (b). Quelle: SKZ; Grafik: © Hanser

### So findet man die richtigen Prozessparameter

Es zeigte sich, dass die Thermografie zur Findung der Prozessparameter bei Oberflächenvorbehandlungen herangezogen werden kann. Bei Corona-Behandlungen sind beispielsweise Unterschiede im Behandlungsabstand zu erkennen (Bild 2). Im Falle eines 10-mm-Abstands konzentrieren sich bei verschiedenen Behandlungsgeschwindigkeiten die elektrischen Einschläge im Bereich der Elektroden. Dies führt zu höheren bahnförmigen Oberflächentemperaturen. Dagegen sind bei Behandlungen mit 15 mm Abstand die Oberflächentemperaturen deutlich homogener.

Bei Atmosphärendruckplasma-Behandlungen mit Rotationsdüse kann thermografisch ermittelt werden, bei

welchen Behandlungsgeschwindigkeiten die Rotationsgeschwindigkeit der Düse nicht mehr ausreicht, sodass ungleichmäßig aktivierte Oberflächen auftreten können. Zudem lassen sich auch verkippete Substrate oder inhomogene Behandlungen beim Beflammen mittels Thermografie detektieren.

Zur Auswertung der thermografischen Aufnahmen hat sich für eine Coronajet-Behandlung eine Messfeldauswertung und für alle anderen untersuchten Verfahren eine Linienauswertung bewährt. Dabei sollten definierte Abstände zwischen Linie und Düsenkante oder anderen Referenzpunkten beibehalten werden. Im Falle der ADP-Behandlungen (Atmosphärendruckplasma) mit Kamerapositionierung im 30°-Winkel hinter der Düse und 290 mm Abstand wird ein Linienabstand zur Behandlungsmitte

von ca. 10 mm gewählt, um möglichst wenig Informationen durch eine Abkühlung zu verlieren (Bilder 1 und 3a). Nachfolgend werden die Linien des unter der statischen Düse durchlaufenden Substrats für 10 cm aufgezeichnet und hinsichtlich des Mittelwerts mit Minimum und Maximum ausgewertet sowie grafisch veranschaulicht (Bild 3b).

Dies ist beispielhaft anhand der ADP-Behandlung von PP-Oberflächen gezeigt. Ab 350 mm/s reicht die Behandlungsintensität nicht mehr aus, um die Behandlungsgeschwindigkeiten zu separieren, die Homogenität der Behandlung (aufgrund der Düsenrotation) nimmt ab. Unter 100 mm/s findet zudem bei PP eine adhäsionsmindernde Überbehandlung statt, die sich in geringeren Festigkeiten im Vergleich zum Optimum widerspiegelt und thermogra- »

fisch mit einer Referenztemperatur erfasst werden kann. Im ca. 22 mm breiten Behandlungsbereich der Rotationsdüse wird zusätzlich eine Line of Interest (LoI) definiert, auf der die Messwerte gesondert ohne abfallende Temperaturflanken hinsichtlich der Mittelwerte und Standardabweichungen ausgewertet werden.

### Software für die Auswertung programmiert

Schließlich wird die mittlere Oberflächentemperatur der LoI ausgewertet und mit der freien Oberflächenenergie sowie der CAT-Zugfestigkeit korreliert (Bild 4). Im Falle der Versuche mit PP und PE resultieren Temperaturfenster für eine optimale Behandlungsintensität im Versuchsaufbau von ca. 42 bis 50°C für PP und von ca. 25 bis 50°C für PE. Höhere Behandlungsintensitäten aufgrund sehr geringer Behandlungsgeschwindigkeiten wurden für PE allerdings nicht untersucht. Es zeigt sich allerdings auch,

dass die freie Oberflächenenergie weniger sensitiv für Überbehandlungen im Falle des PP ist.

Versuche mit unterschiedlichen Umgebungs- und Substrattemperaturen haben gezeigt, dass diese Schwankungen die gemessene Oberflächentemperatur sehr wohl beeinflussen. Durch eine Referenzfahrt bzw. Messung der Substrattemperatur vor der Behandlung und indem man die Referenztemperatur von der gemessenen Oberflächentemperatur abzieht, sind vergleichbare Messdaten als Oberflächendifferenztemperatur möglich.

Auf Basis der Versuchsergebnisse wurde eine Software für Oberflächenbehandlungen programmiert, die eine Auswertung insbesondere für eine linienförmige Oberflächenbehandlung ermöglicht. Neben der Auswertung von Einzelmessungen mit verschiedenen Werkzeugen können auch Aufnahmen in der Software mit Triggerungen über Temperaturgrenzen vorgenommen, mit Maskierungen gearbeitet, Substrat-

und Umgebungstemperaturen berücksichtigt sowie Referenzdaten für einen Inline-Abgleich hinterlegt werden. Die Überwachung von Mäanderfahrten und Mehrfachbehandlungen ist Gegenstand zukünftiger Forschungsaktivitäten.

### Fazit

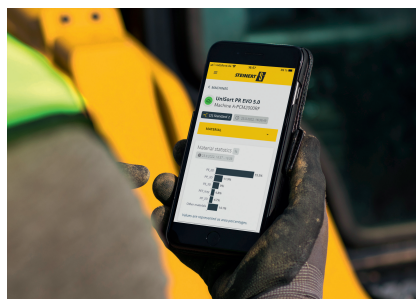
Die passive Thermografie stellt eine vielversprechende Möglichkeit zur Qualitätssicherung bei verschiedenen Verfahren der Oberflächenbehandlung dar und kann die Anwender bei der Findung der Prozessparameter unterstützen. Thermogramme liefern zwar keine direkte Messgröße für die Adhäsion, Vorbehandlungszustände können aber durch weitere Referenzcharakterisierungen abgeglichen und thermische Prozessfenster definiert werden, um sowohl Unter- als auch Überbehandlungen zu vermeiden sowie Auffälligkeiten im Behandlungsprozess zu detektieren. ■

## Daten in Echtzeit visualisieren

# App ermöglicht mobile und flexible Maschinenüberwachung

Steinert.view ermöglicht seinen Usern und Userinnen einen Einblick in Verfügbarkeiten und Leistungen einzelner Maschinen, um so mehr über den Zustand ihrer Anwendungen oder ihrer Sortieranlage zu erfahren. Als Mobile First-App konzipiert, erlaubt Steinert.view einen schnellen Überblick über die wichtigsten Leistungsdaten von unterwegs. Gleichzeitig lassen sich jedoch auch komplexe Verfahrenstechniken visualisieren. Durch Filterfunktionen verliert man dabei nie die Übersicht und kann einfach Bereiche identifizieren, die Probleme aufweisen oder Potenziale bieten.

Durch den schnellen Zugriff auf diverse Metriken hilft die App, eine Vielzahl von Prozessen zu strukturieren und ökonomischer zu arbeiten. Der bisher alternativlose Gang durch die gesamte Anlage kann durch präzise Interventionen und eine bessere Verteilung von Personal überwiegend ersetzt werden. Proaktiv kann Problemen durch Veränderungen bei Metriken wie der Bandbelegung oder dem Druckluftverbrauch entgegengewirkt werden. Schon bevor sie an der Maschine sind, wissen die Servicemitarbeiter und -mitarbeiterinnen, welche Arbeit zu erwarten ist, und können durch den mobilen Zugriff unmittelbar



Steinert.view in mobiler Benutzung: Die App ist für eine Vielzahl von Geräten und Displaygrößen verfügbar. © Steinert

weitere Einsätze starten. Das reduziert Ausfallzeiten und steigert die Schnelligkeit und Mobilität.

Steinert.view ist eine IoT-Plattform auf Basis internationaler Standards, deren App Leistungsdaten visualisiert. So findet die Übermittlung der Daten dabei immer verschlüsselt per TLS über den Protokollstandard MQTT statt und ruhende Daten sind 256-Bit-AES verschlüsselt. Als Cloud-dienstleister kommt dabei Microsoft Azure zum Einsatz. Damit reiht sich Steinert in die umfangreiche Liste von Azure-An-

wendern ein, die 95% der Fortune-500-Unternehmen umfasst. Microsoft investiert Milliarden in die Datensicherheit und verfügt über mehr Zertifizierungen als jeder andere Cloud-Anbieter. Damit soll sichergestellt werden, dass sensible Kundendaten nur so verwendet werden, wie es den Erwartungen entspricht.

Die App ist im Google Play Store und Apple App Store in allen gängigen Bildschirmgrößen für alle neuen Sensorsortierer erhältlich. Für Maschinen ab dem Baujahr 2018 gibt es jedoch eine Upgrademöglichkeit.

[www.steinert.de](http://www.steinert.de)