

Fachartikel – Hintergrundartikel

Testo SuperResolution – die zum Patent angemeldete Technologie für hochauflösende Wärmebilder

Abstract

In vielen industriellen oder handwerklichen Anwendungen müssen auch kleinste oder sehr weit entfernte Messobjekte zuverlässig thermografiert werden. Dabei gilt: Je besser die Bildauflösung und je mehr Messwerte im Wärmebild abgebildet werden, desto detailgetreuer und klarer ist die Darstellung des Messobjekts. Die Testo Super-Resolution-Technologie verbessert die nutzbare, geometrische Auflösung des Wärmebilds um den Faktor 1,6 und liefert vier mal mehr Messwerte – vergleichbar einer höheren Detektorauflösung. Diese bequem in der Analyse-Software am PC verfügbaren Wärmebilder in SuperResolution-Qualität werden durch die Kombination der beiden Technologien Super-Sampling und Dekonvolution erreicht, welche durch einen komplexen Algorithmus für Testo Wärmebildkameras nutzbar gemacht werden. Mit der SuperResolution-Technologie werden echte thermische Messwerte aufgenommen: ohne den Einsatz eines größeren Detektors und einfach nachweisbar – z.B. durch einen Schlitzblenden-Aufbau.

1. Einleitung

Thermografen im Bauhandwerk, in der industriellen Instandhaltung, im Elektrohandwerk oder in Entwicklungsteams stehen immer wieder vor ähnlichen Problemen: Thermische Analysen von kleinsten oder sehr weit entfernten Objekten müssen gemacht werden. Dabei ist bauartbedingt die Bildauflösung von Wärmebildkameras durch die am Markt verfügbare Detektortechnologie limitiert. Die SuperResolution-Technologie stellt eine neue Dimension zur deutlichen Verbesserung der Bildqualität für Wärmebildkameras dar. Mittels SuperResolution aufgenommene Wärmebilder sind deutlich hochauflösender: vier mal mehr Messwerte und eine um den Faktor 1,6 verbesserte geometrische Auflösung bieten auf jedem Wärmebild signifikant mehr Details und somit mehr Sicherheit bei jeder thermografischen Messung.

Die SuperResolution-Technologie nutzt die natürliche Handbewegung, um in einer schnellen Abfolge mehrere leicht versetzte Bilder hintereinander aufzunehmen. Durch die exakte Kenntnis der Objekteigenschaften und des Versatzes der Einzelbilder in der Sequenz werden mit Hilfe eines Algorithmus die Einzelaufnahmen zu einem hochauflösenden Bild zusammengefügt. Wichtig ist hier, dass echte Messwerte aufgenommen werden, die mit dem Ergebnis einer höheren Detektorauflösung verglichen werden können. Dabei handelt es sich nicht um einen Interpolationsprozess.

2. Technologische Herausforderungen der bildlichen Darstellung von Infrarotstrahlung

Im Vergleich zu Digitalkameras haben Infrarot-Detektoren nur eine geringe Auflösung. Dieser Umstand ist physikalisch als auch technologisch begründet und sorgt besonders dann für Probleme, wenn man extrem kleine Objekte erkennen und messen möchte. Diese Messobjekte sind oft sogar kleiner als ein einzelner Pixel. Im schlimmsten Falle trägt das kleine Messobjekt nur einen Bruchteil zu der gesamten gemessenen Strahlung bei, was dazu führt, dass es eventuell im Hintergrund untergeht und nicht mehr erkennbar ist. Sollte es groß genug sein, um einen signifikanten Anteil zur Strahlung beizutragen, wird der Messwert durch den Einfluss aus dem Hintergrund zu einem Wert zwischen der Temperatur des Messobjekts und der des Hintergrunds tendieren. Das bedeutet für die Messung, dass meist nur ein verfälschter Wert ermittelt werden kann. Dieses Problem ist besonders in der Mikroelektronik bekannt, wo Objekte thermografiert werden, die eine besonders kleine und feine Auflösung erfordern. Auch in der Gebäudethermografie kennt man diese Herausforderung, da dort die Objekte zum Teil viele Meter entfernt sind, zum Beispiel Dachfirste oder Obergeschosse.

3. Testo SuperResolution – die Lösung für hochauflösende Wärmebilder

Die Testo SuperResolution-Technologie bietet die Möglichkeit - ohne den Einsatz eines größeren Detektors - mehr echte Temperaturmesswerte abzubilden und somit kleinere Messobjekte korrekt zu messen. Dabei handelt es sich nicht um ein einfaches Interpolationsverfahren, wie bilineare oder bikubische Interpolation, bei dem künstliche Zwischenwerte ohne zusätzlichen Informationsgewinn erzeugt werden. Solche künstlich neu erzeugten Werte können niemals die Nachbarwerte übersteigen – was insbesondere bei kleinen Objekten aber notwendig wäre, um z.B. Hot-Spots zu erkennen. Im Gegensatz dazu erhöht SuperResolution die Messauflösung und

die Detailtreue – der originale Signalverlauf kann rekonstruiert werden (vgl. Abbildung 1).

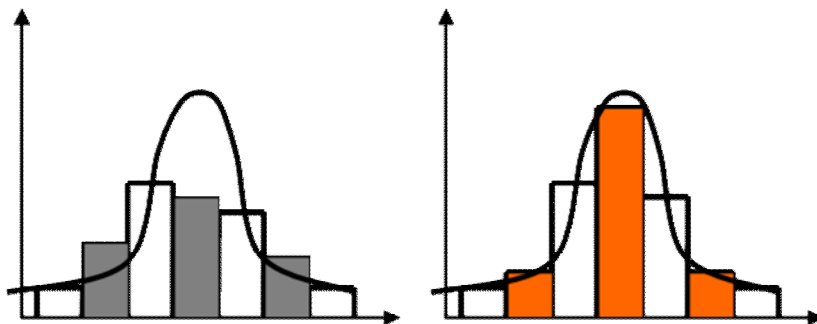


Abbildung 1: Die schwarze Linie entspricht jeweils dem Original-Signal. Die weißen Balken sind Original-Pixelwerte. Die grauen Balken links sind künstlich erzeugte Interpolationswerte – diese können das Original-Signal nicht rekonstruieren. Die orangefarbene Balken rechts sind SuperResolution-Werte – diese können das Original-Signal rekonstruieren.

Es werden also echte Messwerte berechnet, die vergleichbar mit der Aufnahme einer Kamera mit höherer Detektorauflösung sind. Die geometrische Auflösung des SuperResolution-Wärmebildes wird deutlich verbessert. Das bedeutet in der Praxis, dass auch das sogenannte „kleinste messbare Objekt“ bei gleicher Distanz zwischen Thermograf und Messobjekt deutlich kleiner wird. Das heißt, der Thermograf muss nicht näher an sein Messobjekt heran gehen und kann dennoch bei der Analyse des Wärmebilds am PC deutlich mehr Details erkennen (vgl. Abbildungen 2 und 3).

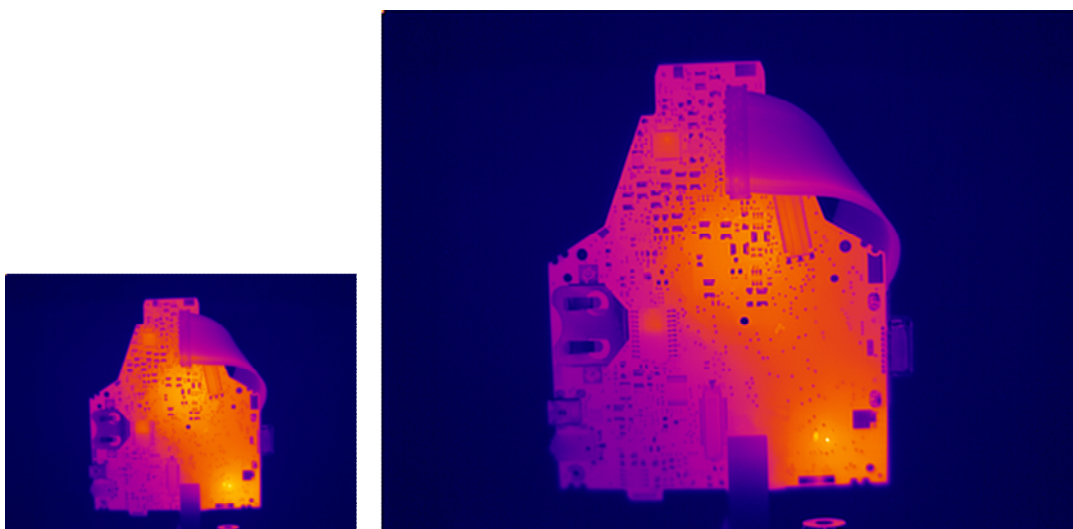


Abbildung 2: Auf der linken Seite eine Wärmebildaufnahme mit 320 x 240 Pixeln; auf der rechten Seite eine SuperResolution-Wärmebildaufnahme mit 320 x 240 Pixeln (entspricht 640 x 480 Pixeln).

SuperResolution bietet folgende Vorteile:

- viermal so viele Messwerte im Wärmebild
- verbesserte geometrische Auflösung (IFOV_{geo}) des Wärmebilds um den Faktor 1,6
- messbare Objekte werden um den Faktor 1,6 kleiner ($\text{IFOV}_{\text{meas}}$)
- deutlich mehr Details für die Analyse am PC und somit qualitativ und quantitativ bessere Auswertungsmöglichkeiten im Thermografie-Bericht

Die zum Patent angemeldete Testo SuperResolution-Technologie kombiniert zwei bekannte und anerkannte Verfahren:

- 1) Super-Sampling bzw. Überabtastung
- 2) Dekonvolution bzw. Entfaltung

Beim sogenannten Super-Sampling wird bei jeder Aufnahme eine Sequenz von mehreren leicht gegeneinander versetzten Bildern abgespeichert. Aus dieser Bildersequenz wird ein höher aufgelöstes Bild berechnet. Hierbei werden die durch den natürlichen Tremor (vom lateinischen: tremere = zittern) bei jedem Menschen vorhandenen minimalen Bewegungen bei der Thermografie-Aufnahme genutzt. Es entsteht so eine Sequenz von zufällig minimal gegeneinander versetzten Bildern. Der spezielle Testo-Algorithmus nutzt diese zusätzlichen Informationen und Messwerte, um ein höher aufgelöstes Bild des thermografierten Objekts zu erzeugen.

Bei der sogenannten Dekonvolution wird durch die genaue Kenntnis der Eigenschaften des Infrarotobjektivs die Bildqualität erhöht. Dies geschieht durch die Verrechnung der Abbildungseigenschaften des Objektivs mit dem Wärmebild.

3.1 Physikalische Grundlagen der SuperResolution-Technologie

3.1.1 Super-Sampling

Bolometer-Detektoren für Infrarotkameras bestehen aus einer Matrixanordnung einzelner Pixel, welche die Strahlung aufnehmen und in ein elektrisch auswertbares Signal umwandeln. Zur thermischen Isolation ist die Pixelmatrix in einem Vakuumgehäuse untergebracht. Jedes Pixel besteht wiederum aus einer dünnen Bolometer-Membran, die an feinen Beinchen über einem

Substrat angebracht ist. Zwischen den einzelnen Pixeln gibt es kleine Abstände – ebenfalls zur thermischen Isolation. Durch diese Isolation soll ein Übersprechen, also der Wärmefluss von einem Pixel auf die Nachbarpixel, verhindert werden. Durch diese Isolation entsteht allerdings auch eine Lücke zwischen den einzelnen Pixeln, in der keine Strahlung detektiert werden kann. Des Weiteren ist nicht die gesamte Pixel-Fläche empfindlich für Strahlung. Die Absorption der Strahlung findet nur im inneren Teil der Pixelmembran statt.

Dies bedeutet, dass es zwischen den Pixeln „blinde Stellen“ gibt, in denen keine Infrarot-Strahlung detektiert wird. Wenn nun ein Objekt sehr klein ist, kann es sein, dass das emittierte Signal direkt in eine solche „blinde Stelle“ fällt und damit praktisch verloren geht. Das klassische Super-Sampling-Prinzip löst dieses Problem, indem die gesamte Detektormatrix um eine halbe Pixelbreite in jede Richtung verschoben und die so entstandene Bildsequenz zu einem Bild zusammengesetzt wird. Die Lücken zwischen den Pixeln werden so mit zusätzlichen Informationen gefüllt und die Grenzfrequenz des Detektors wird verbessert.

3.1.2 Dekonvolution

Die Abbildung eines Objektes wird mathematisch beschrieben durch die Konvolution (Faltung) der Objektstrahlung mit der Übertragungsfunktion der Kamera. Als Dekonvolution wird die Umkehrung einer Faltung zweier Funktionen bezeichnet. Man versteht hierunter also einen mathematischen Algorithmus, welcher, aus der Kenntnis von lediglich dem Ergebnis der Faltung – hier also dem Ausgangssignal – und der Übertragungsfunktion, auf das Eingangssignal schließen lässt. In unserem Fall bedeutet dies, dass mit dem Ausgangssignal der Bolometer und der Kenntnis der Objekteigenschaften der Wärmebildkamera das Eingangssignal – also die tatsächliche Strahlung der thermografierten Objekte – rekonstruiert wird. Das Ergebnis ist ein eindeutig schärferes Wärmebild. Dekonvolution funktioniert übrigens auch unabhängig von Super-Sampling. Das bedeutet für den Thermografen, dass seine Wärmebilder sogar ohne Anwendung von Super-Sampling, d.h. ohne Nutzung des natürlichen Tremors, schärfer werden.

3.1.3 SuperResolution: Super-Sampling und Dekonvolution kombiniert

SuperResolution ist die technologische Kombination von Super-Sampling und Dekonvolution in einem Algorithmus und führt zu einer deutlich höheren geometrischen Auflösung des

Wärmebilds. Mit der SuperResolution-Technologie können schärfere Wärmebilder mit mehr Details aufgenommen und bequem am PC mit der Analyse-Software betrachtet werden. Somit können kleinste oder sehr weit entfernte Messobjekte detektiert werden, ohne einen höherwertigen Detektor einsetzen zu müssen.

3.2 Nachweis der SuperResolution-Technologie

In der Thermografie gibt es mehrere Faktoren, die bezüglich der Qualität des Wärmebildes eine wichtige Rolle spielen. Besonders wichtig sind dabei unter anderem die geometrische Auflösung und Schärfe des Objekts. Die verbesserte Auflösung und Schärfe lässt sich durch Betrachtung von verschiedenen schmalen Schlitzblenden nachweisen. Dabei stellt man eine Schlitzblendenmaske mit vertikalen Öffnungen, die immer feiner werden und einen geringeren Abstand zueinander haben, vor einen schwarzen Flächenstrahler mit konstanter Temperatur.

Aufnahme ohne SuperResolution-Technologie



Aufnahme mit SuperResolution-Technologie



Abbildung 3: Versuchsaufbau mit Schlitzblende

Ohne SuperResolution-Technologie sieht man, mit zunehmender Dichte der Schlitze und abnehmendem Abstand, ein verschwommenes Bild. Der gleiche Vorgang mit SuperResolution-Technologie resultiert in einem gesamtheitlich schärferen Bild, welches trotz der Verkleinerung

der Schlitze und der engeren Abstände noch deutlich mehr Details gut erkennen lässt.

Die genauere Analyse zeigt, wie problematisch eine zu geringe Detektorauflösung ist: Es entstehen Artefakte durch Aliasing und die gemessene Temperatur weicht stark ab.

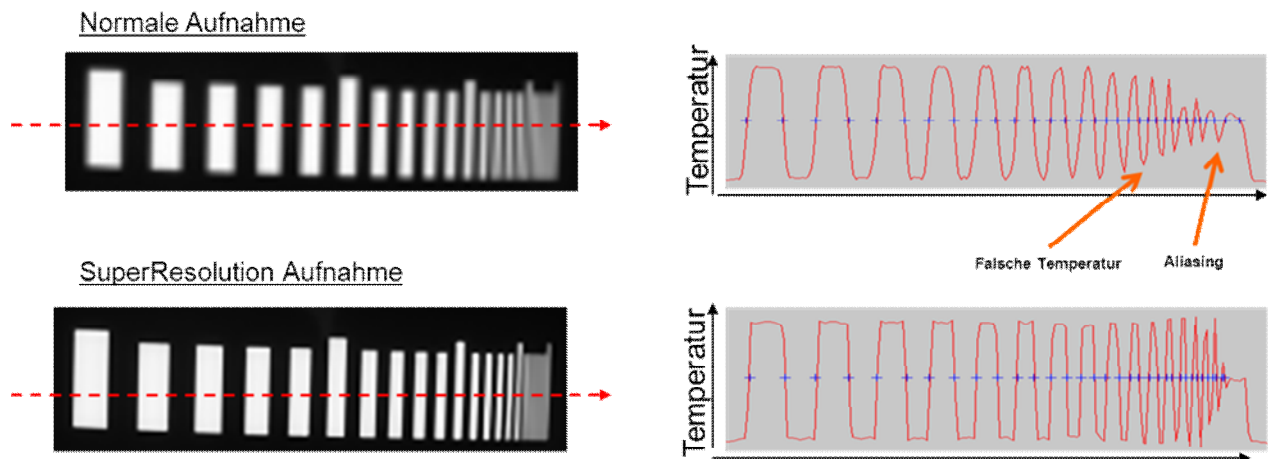


Abbildung 4: Detailanalyse des Versuchsaufbaus mit Schlitzblende

3.3 Verfügbarkeit der SuperResolution-Technologie

Die Testo SuperResolution-Technologie ist in allen Kamera-Modelle der Baureihen testo 875, testo 876, testo 881, testo 882, testo 885 und testo 890 verfügbar. Sogar bereits ausgelieferte Wärmebildkameras dieser Baureihen können mit dieser Technologie durch ein Upgrade der Kamera-Software nachgerüstet werden.

3.4 Anwendungen der SuperResolution-Technologie

3.4.1 Gebäudethermografie

In der Gebäudethermografie eignet sich die SuperResolution-Technologie hervorragend, um schnell und effektiv Bauschäden aufzudecken sowie Energieverluste bei der Beheizung oder Klimatisierung von Gebäuden zu analysieren. Aufgrund des hohen Detaillierungsgrads im Wärmebild werden mangelhafte Isolierungen, Wärmebrücken oder Baufehler deutlich sichtbar.

SuperResolution-Wärmebilder eignen sich somit ideal zur umfassenden Fehlerdiagnose und Wartung von Innenräumen oder Gebäudehüllen – insbesondere zur Energieberatung.

3.4.2 Elektrohandwerk und industrielle Instandhaltung

Die SuperResolution-Technologie erleichtert die detailgenaue Thermografie in Nieder-, Mittel- und Hochspannungsanlagen. Hochauflösende Thermografie-Bilder führen in der Instandhaltung zur Früherkennung fehlerhafter Bauteile oder Anschlüsse, so dass erforderliche Präventivmaßnahmen gezielt eingeleitet werden können. Dies minimiert gefährliche Brandrisiken und vermeidet kostspielige Produktionsstillstände. SuperResolution ermöglicht auch eine detailgetreue Früherkennung von drohenden Schäden in produktionsrelevanten Anlagenkomponenten. Vor allem bei mechanischen Bauteilen können detektierte thermische Auffälligkeiten (z. B. durch Reibung oder fehlerhafte Justage) auf eine überhöhte Beanspruchung hinweisen.

3.4.3 Forschung & Entwicklung

Im Bereich Forschung & Entwicklung sind hochauflösende Wärmebilder für die gezielte Analyse von Wärmeverteilung und Wärmeentwicklung, z. B. auf Leiterplatten, notwendig. Die oft winzigen Bauteile können schnell und berührungslos untersucht und kleinste Details thermografisch dargestellt werden. Am PC können dann alle Temperaturmesswerte analysiert und anschließend die Bauteile thermisch optimiert werden.

4. Zusammenfassung

Die Testo SuperResolution-Technologie sorgt mit viermal mehr Messwerten und einer um den Faktor 1,6 verbesserten geometrischen Auflösung für signifikant mehr Details und somit mehr Sicherheit bei jeder thermografischen Messung. Technisch wird dies durch die Kombination zweier Technologien erreicht: Super-Sampling und Dekonvolution. Durch einen speziellen Algorithmus werden diese Technologien kombiniert und zusätzliche echte Messwerte dargestellt. Der Nachweis der höher aufgelösten Wärmebilder kann mit einem Schlitzblenden-Versuchsaufbau geführt werden. Diese deutlich detaillierteren Wärmebilder führen in vielen

Anwendungen der Bau- und Industriethermografie sowohl zur noch frühzeitigeren Erkennung von Schäden als auch zu noch detaillierteren Analysen von thermischen Auffälligkeiten.

Firmenprofil

Die Testo AG mit Sitz im Hochschwarzwald ist weltweit einer der führenden Hersteller für portable und stationäre Messtechnik. Das High-Tech-Unternehmen bietet Messlösungen unter anderem für die Klima- und Umwelttechnik, Industrieanwendungen, Emissionsmessungen, die Kontrolle von Lebensmittelqualität und das Bauhandwerk. Das Unternehmen investiert jährlich rund 15 Prozent seines Umsatzes in Forschung und Entwicklung und betreibt so einen überdurchschnittlichen Aufwand für zukunftsorientierte Technologien.

Das Unternehmen ist mit 30 Tochterfirmen und über 80 Vertretungen auf der ganzen Welt vertreten und zählt weltweit rund 2200 Mitarbeiter.