

Vergleich zweier Schichtdickenmesssysteme in der praktischen Anwendung

Schichtdickenmessung als relevanter Güteparameter



Bei chirurgischen Instrumenten ist eine präzise Schichtdicke überaus wichtig

Viele Bauteile mit komplexen Geometrien werden mit hochwertigen Materialien beschichtet. Neben den dekorativen und optischen Ansprüchen spielt aber auch die funktionale Veredelung von Oberflächen eine zunehmende Rolle, weil sie technisch messbare Verbesserungen und zusätzliche Produkteigenschaften erzeugt. Diese gewünschten Oberflächeneigenschaften erfordern das präzise Einhalten einer definierten Schichtdicke, die deshalb im Fertigungsprozess permanent überprüft werden muss. Dazu stehen heute verschiedene Messverfahren zur Verfügung, die sowohl in automatisierten als auch in manuellen Beschichtungslinien einsetzbar sind.

Im Folgenden werden zwei typische Vertreter der Schichtdickenmesstechnik unter realen Einsatzbedingungen in einer bestehenden Beschichtungsanlage verglichen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse können anschließend genutzt werden, um den eigentlichen Beschichtungsprozess zu optimieren.

Schichtdicke bei chirurgischen Instrumenten

Bei chirurgischen Instrumenten werden höchste Ansprüche an das Material, die Beschichtung, die Konstruktion und die Fertigung gestellt

(Aufmacherbild). Neben strengen Hygienestandards muss die Oberfläche auch haptischen, ergonomischen und technischen Anforderungen wie Durchschlagsfestigkeit genügen. Deshalb ist eine präzise Schichtdicke überaus wichtig.

Berührende und kontaktfreie Schichtdickenmessverfahren

Die verschiedenen Schichtdickenmesstechniken lassen sich grob in berührende (Bild 1) und berührungslose Verfahren (Bild 2) unterteilen. Berührende Messverfahren sind relativ preiswert, erfordern aber einen intensiven Kontakt zwischen Messkopf und Messobjekt. Das Messsystem unterliegt dadurch einem hohen Verschleiß und das Verfahren eignet sich nur für robuste, harte Oberflächen. Berührungslose, also kontaktfrei Verfahren, arbeiten „auf Distanz“, sind dadurch verschleißfrei und können auch an empfindlichen, noch nicht ausgehärteten Lack- oder Pulverschichten eingesetzt werden. Die Investitionskosten liegen über denen berührender Verfahren, die Systeme sind jedoch

deutlich langlebiger und nahezu wartungsfrei.

Praxisnähe liefert realistische Vergleichsergebnisse

Vergleichstests unter den künstlichen Bedingungen eines Labors lassen sich oft nur schwer in die Praxis übertragen. Um möglichst realistische Vergleichsergebnisse zu erhalten, wird deshalb als Testparcours eine bestehende Beschichtungslinie im laufenden Produktionsbetrieb ausgewählt. Als besondere Herausforderung handelt es sich bei der Beschichtung nicht nur um eine rein dekorative Oberflächenbehandlung, sondern um eine funktionale Veredelung, die neben einer ansprechenden Optik auch anspruchsvolle technologische Anforderungen erfüllen muss.

Anwendung: Funktionale Beschichtungen von Operationsbestecken

Unser Testparcours ist eine Beschichtungsanlage, auf der Operationsbestecke (Bild 3) für die Hochfrequenzchirurgie beschichtet



Bild 1: Berührungsbehafte Messverfahren wie die Wirbelstromtechnik setzen direkt auf dem Werkstoff auf © shutterstock 1693123939



Bild 2: Das kontaktlose und zerstörungsfreie Photothermieverfahren arbeitet aus der Distanz



Bild 3: Die Beschichtung muss zahlreiche Anforderungen erfüllen. Die geforderte Schichtdicke muss genau eingehalten werden. Die unterschiedlichen Farben kennzeichnen die jeweiligen Pinzettentypen

werden. Das betreibende Unternehmen ist Experte für funktionale Beschichtungen in verschiedensten Branchen; dazu zählen Medizintechnik, Automobilbau und der Luftfahrtsektor.

Hochfrequenzchirurgie als state-of-the-art Operationstechnik

Die Operationsbestecke werden in der Hochfrequenzchirurgie (Bild 4) verwendet. Bei dieser speziellen Operationstechnik wird hochfrequenter Wechselstrom zum Schneiden von Gewebe und Verschießen von Blutgefäßen angewendet. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber herkömmlicher Schneidetechnik mit dem Skalpell ist, dass gleichzeitig mit dem Schnitt eine Blutungsstillung erfolgt und das Operationsfeld gut einsehbar bleibt. Die Hochfrequenzchirurgie ist heute weit verbreitet und wird bei praktisch allen Routineoperationen eingesetzt. Bei der Blutstillung verwendet man Pinzet-

ten als Elektroden. Die Blutgefäße werden mit den Spitzen des Werkzeugs gefasst und durch die Stromeinwirkung verschweißt (koaguliert).

Um mit den Pinzetten zu agieren, nutzt der Chirurg oftmals nur einfache OP-Gummihandschuhe. Das Gummimaterial hat zwar gute Isolationseigenschaften, ist aber primär auf den Infektionsschutz ausgelegt. Durch Abnutzung oder Gewebeflüssigkeiten können die OP-Handschuhe leicht ihre isolierende Wirkung verlieren, was einen elektrischen Durchschlag mit Verbrennungen der Hand des Operateurs zur Folge hätte oder eine Verletzungsgefahr des Patienten bedeuten könnte. Das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte fordert deshalb den Einsatz von isolierten Pinzetten in der Hochfrequenzchirurgie.

Hohe Qualitätsansprüche an elektrisch isolierte Pinzetten

Diese Pinzetten bestehen aus Aluminium, das mit einer mehrschich-

tigen Fluorpolymer-Oberflächenbeschichtung versehen wird. Vor der Beschichtung werden die Pinzetten gereinigt und sandgestrahlt. Anschließend wird das Beschichtungsmaterial durch elektrostatische Zerstäubung aufgetragen und in einem Ofen vernetzt. Die auffällige Farbe vermeidet Verwechslungen mit unbeschichtetem Operationsbesteck und hilft, Beschädigungen an der Beschichtung frühzeitig erkennen.

An die Beschichtung werden zahlreiche Anforderungen gestellt. Sie muss einerseits sehr dicht, hohlraumfrei und schmutzabweisend sein, um Verkeimungen zuverlässig zu verhindern. Andererseits ist aber auch Elastizität und exzellente Substrathaftung gefordert, damit keine Lacksplitter in die Operationswunde gelangen. Und nicht zuletzt muss die elektrische Isolationsfunkt-

tion über die gesamte Lebensdauer der Pinzette (Bild 5) sicher gewährleistet bleiben.

Diese Anforderungen lassen sich nur mit einer genau bemessenen Schichtdicke erfüllen. Ist sie beispielsweise zu dünn, sind Haltbarkeit und elektrische Isolation nicht mehr gewährleistet. Ist die Schicht zu dick, können Risse, Bläschen oder Wellen entstehen. Kleinste Fehler im Produktionsprozess können schwerwiegende Folgen für Patient und Operateur haben. Die Schichtdicke ist also funktionsrelevant und muss entsprechend überwacht werden.

Berührende und kontaktfreie Schichtdickenmessverfahren

Von den zahlreichen am Markt verfügbaren Schichtdickenprüfmethoden werden zwei repräsentative Verfahren verglichen: das

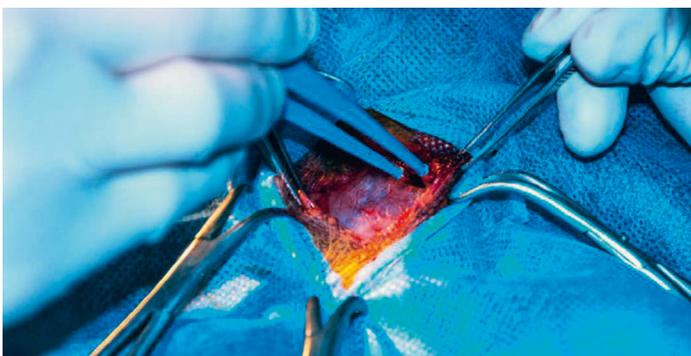


Bild 4: Bei der Hochfrequenz-Chirurgie werden die Blutgefäße durch die Einwirkung von elektrischem Strom verschlossen. Dabei kommen Spannungen von über 1.000 Volt zu Einsatz, die die Instrumentenbeschichtung zuverlässig isolieren muss

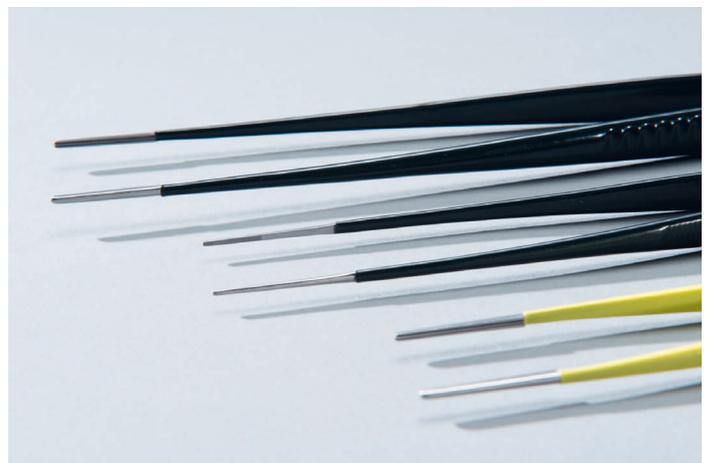


Bild 5: An die Beschichtung dieser OP-Pinzetten werden zahlreiche Anforderungen gestellt: Sie sollen elastisch, gut haftend, hohlraumfrei und schmutzabweisend sein. Diese Anforderungen lassen sich nur mit einer genau bemessenen Schichtdicke erfüllen

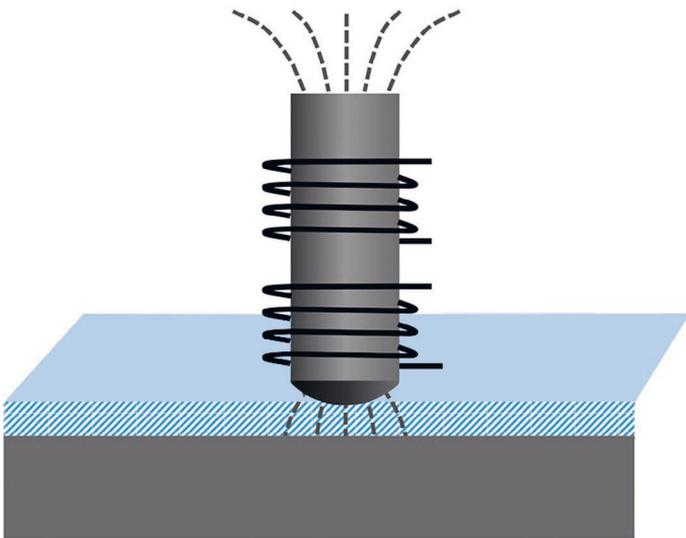


Bild 6: Funktionsweise des Wirbelstromsensors

Wirbelstromprinzip als berührende Messung und die Photothermie als kontaktloses Messprinzip. Ziel der Untersuchung ist, herauszufinden, welches Verfahren sich wie gut für die Überwachung eines anspruchsvollen Beschichtungsprozesses in der Praxis eignet.

Das Wirbelstromverfahren

Das Wirbelstromverfahren (Bild 6) eignet sich für die Messung elektrisch isolierender Beschichtungen auf metallischem Grundwerkstoff. Der Wirbelstromsensor enthält eine Spule, in der ein elektrischer Wechselstrom ein magnetisches Wechselfeld erzeugt. Wird dieser Sensor auf einen beschichteten metallischen Grundwerkstoff aufgesetzt, so induziert das Magnetfeld im Metall einen Wirbelstrom, der auf das vom Sensor erzeugte Magnetfeld zurückwirkt. Diese Rückwirkung ist umso stärker, je kleiner der Abstand zwischen Sensor und Metall ist. Bei plan aufgesetztem Sensor entspricht der Abstand genau der gesuchten Schichtdicke, so dass die Rückwirkung ein Maß für die Dicke der Beschichtung ist.

Sie wird vom Messgerät ausgewertet und als Schichtdicke angezeigt.

Das photothermische Prinzip

Die photothermische Schichtdickenmessung (Bild 7) ist ein kontaktfreies Verfahren für Lacke, Pulverbeschichtungen und Glasuren auf metallischen und nichtmetallischen Untergründen. Dabei werden die unterschiedlichen thermischen Eigenschaften von Beschichtung und Grundwerkstoff ausgewertet, um die Schichtdicke zu bestimmen.

Die Oberfläche der Beschichtung wird mit einem kurzen, intensiven Lichtimpuls um einige Grad erwärmt und kühlt anschließend durch Ableitung der Wärme in den Grundwerkstoff wieder ab. Dabei sinkt die Temperatur umso schneller, je dünner die Beschichtung ist. Der zeitliche Temperaturverlauf wird mit einem hochempfindlichen Infrarotsensor erfasst und in die Schichtdicke umgerechnet. Die Messung erfolgt berührungslos aus mehreren Zentimetern Abstand. Damit lassen sich nasse und klebrige Schichten

ebenso einfach messen wie weiche und empfindliche Oberflächen.

Die Vergleichsmessung: Wirbelstrom versus Photothermie

Für den Vergleichstest werden Pinzetten aus einer laufenden Produktion an mehreren Punkten vermessen. Dabei finden die Wirbelstrom- und die photothermische Messung direkt hintereinander statt.

Der Messaufbau und die Datenaufnahme

Die Messpositionen orientieren sich an der Geometrie der Pinzette. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, müssen beide Verfahren exakt dieselben Positionen der Beschichtung prüfen. Dazu wird der rechte und linke Pinzettenschenkel während der Messung in eine speziell angefertigte Schablone (Bild 8) eingelegt. Diese Schablonen enthalten jeweils drei Bohrungen auf jeder Seite, mit denen die Messköpfe der beiden Messsysteme auf dieselbe Stelle ausgerichtet werden (Bild 9). Zunächst werden die Pinzetten per Wirbelstrom vermessen. Der Wirbelstrommesskopf wird durch die Bohrung direkt auf die Beschichtung aufgesetzt, während der photothermische Sensor durch eine dem Messabstand entsprechende Distanzhülse geführt wird.

Es werden 50 Pinzetten an jeweils 12 Punkten vermessen. Dabei wird die Messung an jedem Messpunkt fünf Mal wiederholt, sodass abschließend mit jedem Messver-



Bild 7: Das photothermische Messprinzip

fahren 3.000 Messwerte ausgewertet werden können.

Kalibrierung der Schichtdickenmesssysteme

Sowohl das Wirbelstromverfahren als auch die photothermische Messung sind indirekte Verfahren, bei denen die Schichtdicke nicht unmittelbar gemessen, sondern anhand von Messsignalen errechnet wird. Vor der Auswertung und Analyse der Messwerte erfolgt daher eine Angleichung der photothermischen Daten an die Werte aus der Wirbelstrommessung.

Dazu werden die Wirbelstromdaten in einem XY-Dia-

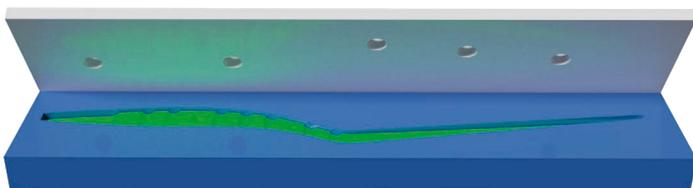


Bild 8: Beide Verfahren sollen exakt dieselben Positionen der Beschichtung prüfen. Dazu dient die speziell angefertigte Schablone mit Messpunkten

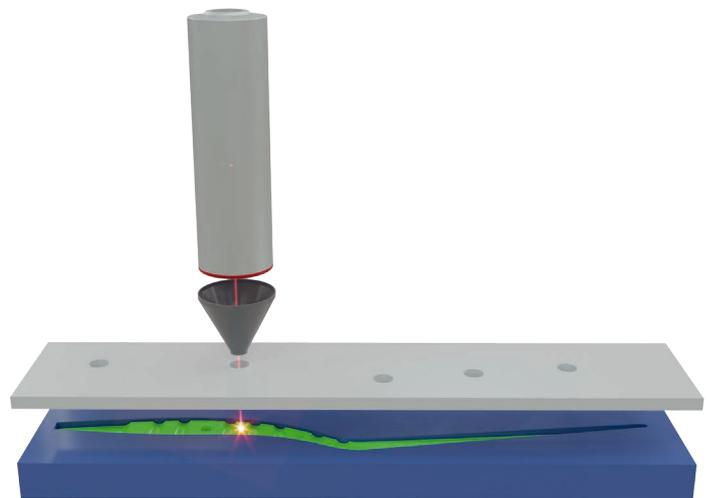


Bild 9: Jeder Pinzettenschenkel muss an den durch die Bohrungen gekennzeichneten sechs Stellen gemessen werden, jeweils drei auf jeder Seite

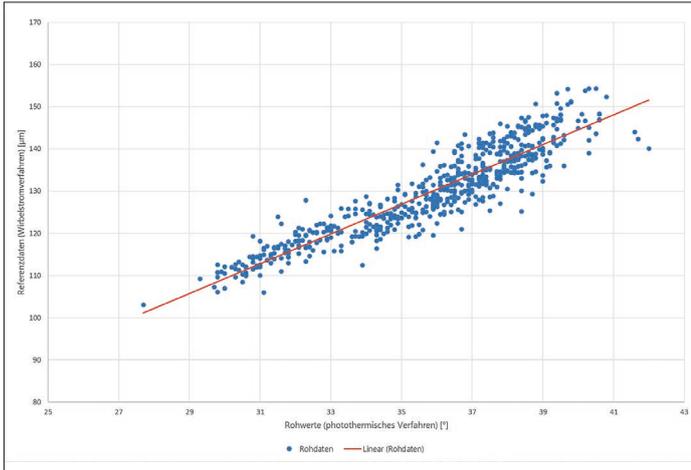


Bild 10: Diese vergrößerte Darstellung zeigt die ausgezeichnete Korrelation der photothermisch gemessenen Daten (X-Achse) mit den Wirbelstrommessungen (Y-Achse)

gramm über den photothermischen Daten abgetragen und daraus eine Ausgleichsgerade berechnet, die als Kalibrierung für die photothermische Messung dient. Die Korrelation belegt mit einem Wert von 0,8476 die gute lineare Abhängigkeit der beiden Messreihen, sodass diese Kalibrierung im Anschluss als Basis für den Messmittel-Vergleich des photothermischen Verfahrens verwendet werden kann.

Vergleich der Prüfverfahren via Messsystemanalyse

Wirbelstromverfahren und photothermische Messung können nun über eine Messsystemanalyse miteinander verglichen werden. Die Messsystemanalyse (MSA) ist ein statistisches Verfahren aus der Prozessoptimierung, mit dem sich beurteilen lässt, wie gut ein bestimmtes Messsystem für die vorgesehene Messaufgabe geeignet ist.

Die MSA liefert für jedes Messsystem zwei Kenngrößen: die Messmittelfähigkeit C_g , die die Streuung der Messwerte beschreibt und den Messmittelfähigkeitsindex C_{gk} , der den systematischen Messfehler angibt. Als Minimum für beide Kenngrößen gilt ein Wert von 1,33. Je höher die Kenngrößen über die

sem Minimalwert liegen, umso besser ist das Messsystem für die jeweilige Aufgabe geeignet (Bild 10).

Für die Berechnung der beiden Kenngrößen ist es erforderlich, die tatsächliche Schichtdicke an den Messpositionen zu kennen. Da diese jedoch bei den gemessenen Pinzetten nicht erfasst ist, wird stattdessen die mit dem Wirbelstromverfahren ermittelte Schichtdicke als Referenz verwendet.

Ergebnisse der Messsystemanalyse

Alle Werte in Tabelle 1 liegen deutlich über dem Minimum von 1,33 und belegen die gute Eignung beider Verfahren für die Schichtdickenmessung in der Pinzettenfertigung. Dabei ist die Messmittelfähigkeit C_g des photothermischen Verfahrens mehr als doppelt so groß wie die der Wirbelstrommessung und beweist eindrucksvoll die Überlegenheit dieses Messprinzips.

Photothermische Messungen optimieren Pinzetten-Produktionsprozess

Nachdem die ausgezeichnete Eignung des photothermischen Verfahrens für die Schichtdickenmessung

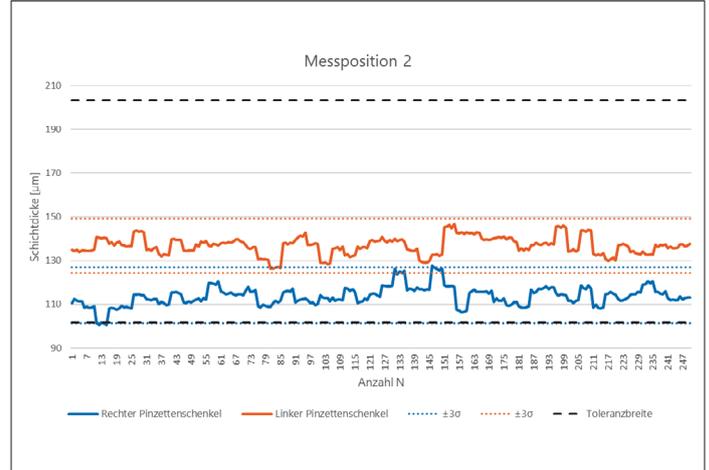


Bild 11: Durch eine gezielte Anhebung der Beschichtungsstärke könnte das Risiko von unnötigem Ausschuss aufgrund zu geringer Schichtdicke reduziert werden

der Oberflächenveredelung in der Pinzettenproduktion belegt ist, können in einem nächsten Schritt aus den Messwerten mit Hilfe einer Prozessfähigkeitsanalyse weitere Ansatzpunkte gewonnen werden, um den Beschichtungsprozess zu optimieren.

Prozessfähigkeitsanalyse ermittelt die Qualität des Beschichtungsprozesses

Mit einer Prozessfähigkeitsanalyse lässt sich ermitteln, wie gut der Beschichtungsprozess die geforderten Toleranzwerte erreicht; oder anders gesagt, mit wie viel Ausschuss zu rechnen ist. Dazu werden, ähnlich der Messsystemanalyse, zwei Kennzahlen berechnet: Der Prozessfähigkeitsindex C_p , der die tatsächliche Prozessstreuung ins Verhältnis zum geforderten Toleranzband setzt und der kleinste Prozessfähigkeitsindex C_{pk} , der die Lage des Mittelwerts im geforderten Toleranzband beschreibt. Auch hier gilt ein Minimalwert von 1,33 für einen gerade noch geeigneten Prozess.

Photothermisches Messverfahren liefert Werte für reduzierten Ausschuss

Mit den Daten aus der photothermischen Messung liegt der Pro-

zessfähigkeitsindex C_p bei allen 12 Messpositionen wesentlich oberhalb von 1,33. Der Beschichtungsprozess variiert also erheblich geringer als es das Toleranzband zulässt. Jedoch liefern die C_{pk} -Werte eindeutige Ansätze für eine Prozessoptimierung: An einigen Positionen gerät die Prozessstreuung sogar sehr nahe an die untere Toleranzgrenze bzw. liegt schon darunter. Dies könnte im Beschichtungsprozess durch eine gezielte Anhebung der Beschichtungsstärke einfach korrigiert werden (Bild 11).

Fazit

Im Vergleich der verschiedenen Schichtdickenmessverfahren in einer realen Anwendung hat die Photothermie eindeutig die Nase vorn. Die Messmittelfähigkeit liegt deutlich über dem Grenzwert, d. h. das Messverfahren wäre auch noch bei erheblich engeren Toleranzgrenzen einsetzbar. Neben dem wesentlich breiteren Anwendungsspektrum auf empfindlichen Oberflächen sowie auf nicht ausgehärteten Schichten und der einfachen Automatisierbarkeit ist das photothermische Prinzip zudem in Punkto Messmittelfähigkeit traditionellen Verfahren weit überlegen.

Auch der Beschichtungsprozess selbst profitiert. Mit guten, praxistauglichen Messmitteln und ein wenig Statistik lassen sich selbst anspruchsvolle Beschichtungsprozesse gezielt optimieren, indem Toleranzfenster optimal genutzt und Ausschuss so minimiert wird. ◀

| | Messmittelfähigkeit C_g | Messmittelfähigkeitsindex C_{gk} |
|----------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Wirbelstromverfahren | 5,16 | —* |
| Photothermie | 11,24 | 7,36 |

*) Berechnung nicht möglich, da die tatsächliche Schichtdicke nicht bekannt ist

Tabelle 1