



Zwei Karat roh für ein Karat fertig

Wie ein Edelsteinproduzent durch geschickt eingesetzte Mathematik mehr aus Rohsteinen herausholt

von Wolfgang Hess

Diamonds are a girl's best friend", hauchte Marilyn Monroe 1953 erstmals ins Mikro. Doch auch Smaragd, Rubin, Saphir oder Tansanit – von Fachleuten lapidar Buntsteine genannt – machen etwas her. Auch damit lässt sich ordentlich Geld verdienen. Das größte Handelsunternehmen in Europa für Buntsteine ist die Paul Wild OHG mit Sitz in Kirschweiler bei Idar-Oberstein.

Früh hat das Unternehmen eigene Minen in Brasilien gekauft. In den letzten Jahren erweiterte die Firma ihre Minenbeteiligungen in allen wichtigen Buntsteinregionen der Welt. Und sie beschäftigt eine Handvoll der besten Edelsteinschleifer in Deutschland, die besonders anspruchsvolle Kunden wie Bulgari oder Tiffany mit ihrem Handwerk beglücken. Doch die Edelsteinproduktion in Deutschland

ist seit Jahren rückläufig. Produziert wird aus Kostengründen überwiegend in Asien. Auch Paul Wild besitzt Produktionsstätten in Thailand.

Eine clevere Idee

Clever überlegte Unternehmer Markus Paul Wild – Betriebsinhaber in der dritten Generation –, ob die Ausbeute von Schmucksteinen aus Rohedelstein nicht

zu verbessern sei, wenn man den Produktionsprozess automatisieren und mithilfe der Mathematik gute Schliffbilder zur bestmöglichen Verwertung finden könne. Mit diesem Gedanken trat er 2003 an Karl-Heinz Küfer heran, damals Senior Researcher am ITWM, und schilderte seine Ziele: fünf bis zehn Prozent mehr Karat – das Gewichtsmaß für Edelsteine – wolle er durch eine mathematische Optimierung aus den Rohlingen herausholen. Bis dahin galt unter Fachleuten die Faustformel: Für ein Karat geschliffenen und polierten Buntstein sind drei Karat Rohstein erforderlich.

Eine Maschine für die Mathematik

Übereinstimmung bestand darin, dass es dazu nicht nur einer mathematischen Optimierung bedurfte, die sich in der Software zur Bearbeitung von Edelsteinen niederschlagen würde, sondern auch einer Maschine, die die mathematisch ermittelten Daten dreidimensional und punktgenau umsetzen kann. Selbst der beste Edelsteinschleifer wäre dazu nicht in der Lage. Mag seine Kunstfertigkeit auch noch so bewundernswürdig sein, er arbeitet nach seiner Intuition und nicht nach mathematischen Algorithmen. „Das Spannende ist, dass für die Bearbeitung der von Herrn Wild an uns herangetragenen Fragestellungen neue Mathematik gebraucht wurde“, betont Karl-Heinz Küfer. „Dass Mathematik immer noch entsteht, ist vielen nicht klar. Die meisten glauben, sie sei einfach da.“

Mathematisch sind Edelsteinschliffe eine geometrische Aufgabe. Wenn sich Mathematiker damit beschäftigen, müssen sie erst verstehen, welche Regeln einen fertigen Stein ausmachen und auf welche Weise das größtmögliche Volumen aus einem Rohstein herauszubekommen ist. Doch das reicht nicht. „Um Wilds Problem zu lösen, mussten wir wissen, unter welchen technischen Randbedingungen Schleif- und Poliermaschinen arbeiten können und welche mineralogischen Gegebenheiten beim Schliff zu berücksichtigen sind“, sagt Küfer.

Der Forscher, seit 2004 Abteilungsleiter Optimierung am ITWM und seit 2010 nebenbei außerplanmäßiger Professor an der TU Kaiserslautern, spricht beim Auftrag der Firma Paul Wild gerne von Inno-

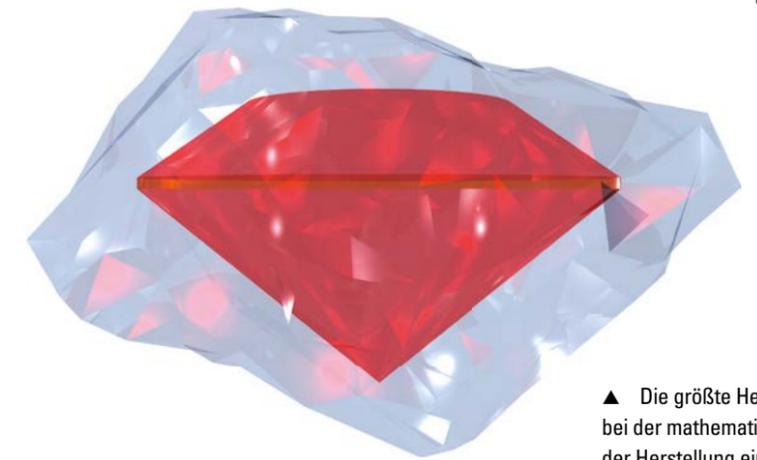
vation durch Mathematik. Denn hier ist durch Mathematik ein völlig neuer Fertigungsprozess entstanden, der eine größere Produktvielfalt ermöglicht. „Unsere Arbeit hat zu einem deutlichen Mehrwert geführt. Durch unsere Methodik lassen sich jetzt aus der Rohware 40 bis 50 Prozent mehr als Edelstein verkaufen als vorher.“ Damit lautet die neue Formel nun: Zwei Karat roh für ein Karat fertig.

Im Ergebnis führt das dazu, dass sich Maschinen und Equipment auf Dauer auch dann rechnen, wenn sie ungleich teurer sind als das Handwerkszeug des Schleifers. Diese Entwicklung könne, meint Karl-Heinz Küfer, sogar dafür sorgen, dass die Produktion hochwertiger Steine aus Asien nach Deutschland zurückgeholt werde.

Trickreiche Inszenierung

Diamanten inszenieren die Edelsteinschleifer durch geschickte Lichtbrechung – fachmännisch ausgedrückt: durch ihr Feuer. Bei Farbsteinen inszeniert man dagegen die Schönheit der Farbe. Der Verarbeitungsprozess untergliedert sich in vier Schritte: Sägen, Vorformen, Facettieren und Polieren. „Wir am ITWM haben uns zunächst mit dem Vorformen und Facettieren mathematisch beschäftigt und inzwischen auch das Polieren in eine Maschine integriert“, sagt Küfer.

Die Facettenstruktur hängt von der Edelsteinart ab, von der Außenkontur und von der Größe. Darüber hinaus gibt es Proportions- und Winkelvorgaben sowie Farbverschiebungsregeln und Regeln, wo Metall- oder Luft einschließen liegen müssen, um die Strahlkraft beim



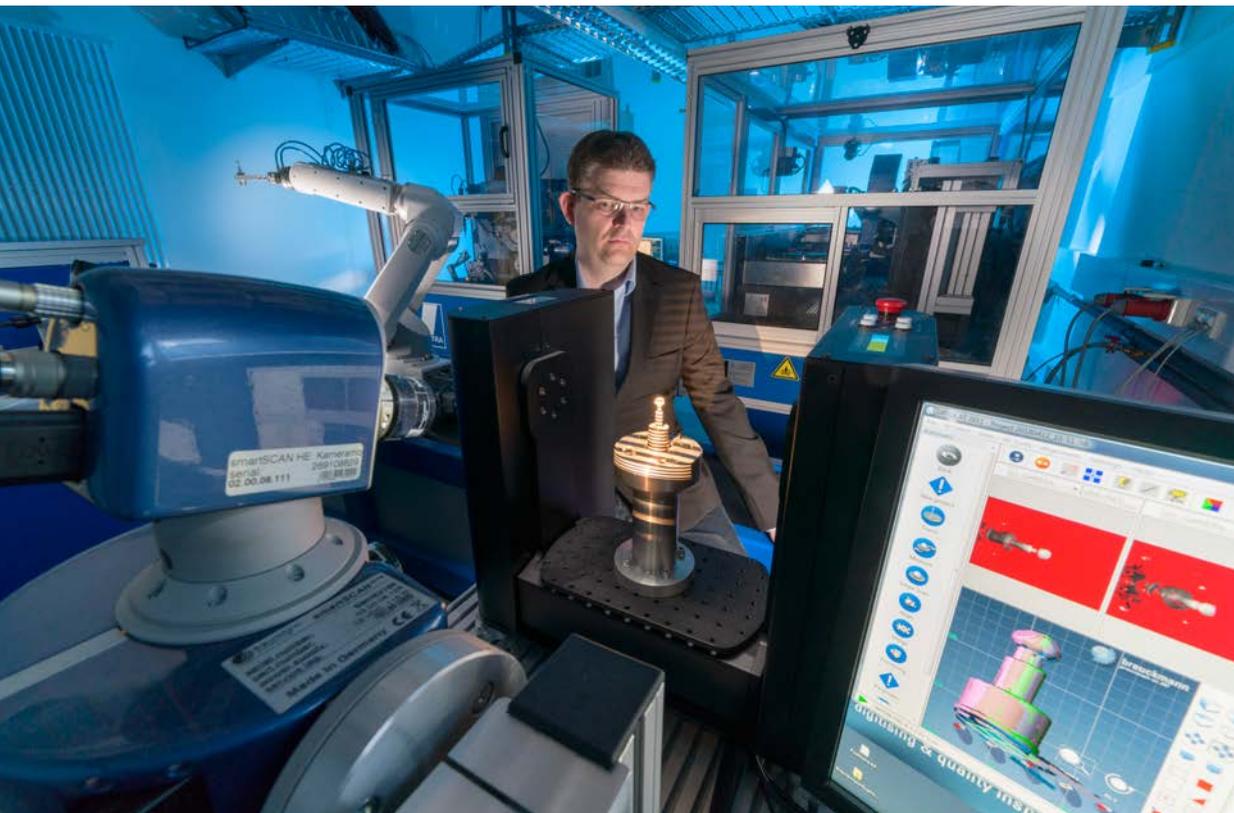
▲ Die größte Herausforderung bei der mathematischen Planung der Herstellung eines Schmuckedelsteins ist die virtuelle Einbettung seiner Gestalt in den Rohling.

Facettieren nicht zu reduzieren. Diese Vorgaben skizzierte Markus Paul Wild auf einem Blatt Papier. Und damit ging es dann los mit der Forschung.

Die Suche nach dem Top-Modell

Die ITWM-Wissenschaftler suchten sich ein mathematisches Modell, in das die Frage nach einer optimalen Edelstein- ausbeute hineinpasst. „Wir wählten den sogenannten Bi-Level-Ansatz zur Lösung von semiinfiniten Optimierungsaufgaben“, sagt Küfer. Und fügt ähnlich kryptisch hinzu: „Die Frage nach dem optimalen Volumen eines Steins, dessen Rand durch Funktionen beschrieben werden kann, lässt sich als parametrische Design-Centering-Aufgabe formulieren.“ Weniger akademisch ausgedrückt heißt das: In einer ersten Stufe muss algorithmisch geprüft werden, ob ein Designvorschlag in den vorhandenen Rohstein passt. In einer zweiten Stufe macht das Verfahren dann Vorschläge für diese Lageparameter.

Ein grundsätzliches Problem war, dass für jeden Facettierungsvorschlag eine Bi-Level-Aufgabe gelöst werden muss. Das zweite Problem war die Größe jeder Bi-Level-Aufgabe, die wesentlich durch die Oberflächendarstellung des Rohsteins bestimmt wird. Küfer: „Einen mittelgroßen Stein konnten wir mathematisch durch etwa 400 000 Dreiecke beschreiben.“ Man hätte also im schlimmsten Fall Bi-Level-Aufgaben mit 400 000 Gleichungen für Millionen von Facettierungsvorschlägen rechnen müssen. „Wir hätten Wochen gerechnet für jeden Stein – selbst bei unserer Rechnerkapazität.“



◀ Einblick ins Edelsteinlabor: ITWM-Forscher Andreas Dinges prüft die Prozesssteuerung. Die Anlage läuft automatisch. Sie vermisst zuerst den Stein, danach berechnet der Computer optimale Einbettungen, Proportionen und Facettenmuster.

Die Forscher haben die Oberfläche vereinfacht, indem sie den Stein als glatten Eichkörper mit nur vier bis sechs Funktionen beschrieben haben. Dann haben sie mit diesem stark vereinfachten Stein, welcher Form und Proportion, nicht aber das Facettenbild wiedergibt, optimiert. Beim folgenden Facettieren achteten Küfer und sein Team darauf, dass wenig Volumen verlorengeht. „Typischerweise ist es möglich, sehr nahe am Volumen des Eichkörpers zu bleiben“, erklärt der Forscher. „Mit dieser Maßnahme haben wir die eigentliche Volumoptimierung von der Festlegung eines regelgerechten Facettierungsmusters abgetrennt und so sehr viele Vergleichsrechnungen eingespart.“

Der Rohling auf der Kimme

Der zweite Ansatz nahm den Rohstein auf die Kimme: „Wir starteten zunächst mit einer groben Beschreibung des Rohsteins und brauchten dazu nur wenige Gleichungen“, berichtet Küfer. „Dann bestimmten wir für diesen sehr groben Stein einen größtmöglichen einbeschriebenen Schmuckstein. Passt dieser in den Originalstein – was wir leicht überprüfen

konnten – haben wir die beste Lösung gefunden.“ Verfeinert wird die Berechnung nur dann, wenn es nicht passt. Im Ergebnis heißt das: Die Optimierer benötigen für einen formvollendeten Buntstein statt der ursprünglich 400 000 Gleichungen nur noch 25 bis 30.

Jahrelanges Kopfzerbrechen am Institut war nötig, um ein gutes Zusammenspiel zwischen dem glatten Eichkörper und der anschließenden Facettierung zu finden. „Mathematisch braucht man zwar nur die Facetten fein genug zu machen, um das Problem zu lösen“, sagt Küfer. Doch in der Realität müssen die Facetten eine gewisse Größe haben, damit der Kunde den Edelstein als formvollendet wahrnimmt. Diese Mindestgröße erfordert möglicherweise zu tiefe Schnitte in den Eichkörper, die das Volumen und damit den Preis reduzieren.

Inzwischen haben die Mathematiker am ITWM das Problem weitgehend gelöst. Allerdings funktioniert bei Edelsteinen in Tropfen- oder Kissenform die optimale Annäherung nicht immer befriedigend, weshalb das Team für diese Formen einen aus der Welt der Computerspiele stammenden Kollisionsalgorithmus nutzt. Er

prüft für das Paar von facettiertem Stein und Container, ob sie sich durchdringen. „Diese Notwendigkeit stört mich bis zum heutigen Tag“, meint Küfer und skizziert so, wie anspruchsvoll Mathematiker sind.

Verbesserte Maschinengeneration

Im zweiten Teil des Auftrags von Paul Wild wurden Produktionsmaschinen entwickelt, die die in der Optimierungssoftware berechneten Schlibfbilder umsetzen. Die erste Maschine steht bei der Firma, eine zweite, neuere im Untergeschoss des ITWM. Diese verbesserte Maschinengeneration wurde teilweise durch strategische Mittel der Fraunhofer-Gesellschaft finanziert. Der Grund ist die Perspektive, auch bei anderen Edelsteinherstellern Interesse für die Rohsteinoptimierungssoftware und -produktion zu wecken.

An einer dritten Maschinengeneration wird gearbeitet. Sie entsteht wiederum bei Paul Wild und soll deutlich kompakter werden. „Wir hoffen, dass wir Ende 2018 erste Tests machen können“, sagt Karl-Heinz Küfer und offenbart damit, dass die Optimierung der Buntsteinproduktion nicht nur die Mathematik herausfordert, sondern auch den Maschinenbau. ●