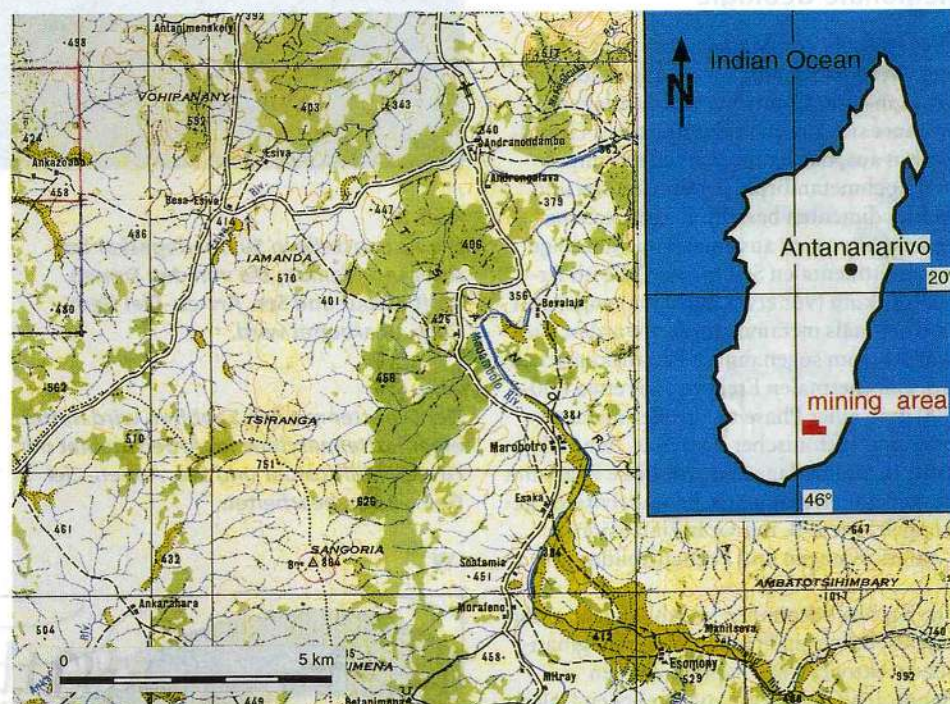


Ein neues Saphirvorkommen im Süden von Madagaskar

Folge 1

Einleitung

Korundvorkommen im Süden von Madagaskar sind seit den 20er Jahren bekannt. Die Förderung von Saphiren von Edelsteinqualität aus der Gegend von Andranondambo, Süd-Madagaskar, durch internationale Minengesellschaften und die einheimische Bevölkerung begann jedoch erst im Jahr 1994. Inzwischen kommt immer mehr Material dieses Vorkommens auf den internationalen Markt (Abb. 1), und erste kurze Berichte über die Saphirvorkommen von Madagaskar wurden inzwischen ebenfalls veröffentlicht. Die erste genauere Beschreibung der Saphirmine im Süden von Madagaskar wurde von einem der Autoren (HAH) 1995 auf der 25. Internationalen Gemmologen-Konferenz in Thailand präsentiert. Der vorliegende Bericht umfasst eine ausführliche Studie der Saphire dieses Vorkommens, er stellt eine Zusammenfassung einer englischsprachigen Arbeit dar, welche in der in London erscheinenden Fachzeitschrift *Journal of Gemmology*, Vol. 25 (1996), S. 185–209, veröffentlicht wurde. Der an weiteren Details, z. B. an ergänzenden chemischen und spektroskopischen Daten, welche über den Rahmen dieser Publikation hinausgehen würden, oder an einer ausführlichen Literaturliste interessierte Leser sei auf diese Arbeit verwiesen.



Abbauebiet

Die Saphirminen befinden sich in der Region um Andranondambo (24°25' S, 45°35' E; Amboasary-Distrikt, SSE-Madagaskar; Abb. 2). Die Förderung der Saphire erfolgt oft mit einfachen Geräten und erstreckt sich über ein relativ großes Gebiet (etwa 200 km²). Das Vorkommen von Korund in Edelsteinqualität ist jedoch auf kleine Bereiche innerhalb dieses Gebietes beschränkt. Verschiedene Minengesellschaften (aus Thailand, der Schweiz, Madagaskar und Israel) sowie die einheimische Bevölkerung arbeiten hier (Abb. 3).

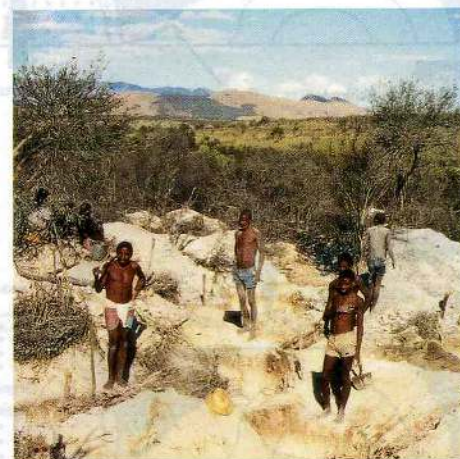


Abb. 1: Facettierte und rohe Saphire aus der Gegend von Andranondambo, SSE Madagaskar. – Das Gewicht des zweiten Steins von links beträgt 1,88 ct.

Abb. 2: Karte des Abbauebiets von Andranondambo im Süden Madagaskars.

Abb. 3: Die einheimische Bevölkerung bei der Suche nach Saphiren in der Region um Andranondambo in SSE Madagaskar.

Einer der Autoren (MSK) hatte kürzlich die Gelegenheit, im Zuge von zwei Prospektionsvorhaben die Geologie des Abbauebietes zu untersuchen (freundlicherweise ermöglicht durch W. Spaltenstein und C. Ravomanana, Firmen Multicolour und Ste. Arc-en-Ciel-Gem Corp., Thailand und Madagaskar). Die Saphire aus der Andranondambo-Region stammen aus Primärlagerstätten in schmalen pegmatit-ähnlichen

Ein neues Saphirvorkommen

Gängen von durchschnittlich 2 bis 20 cm Breite und 5 bis 50 m Länge. Zum Teil werden die Saphire direkt in diesen Gängen gefunden (Abb. 4), zum Teil auch in eluvialen Vorkommen, die eng an erodierte Gänge gebunden sind. Der Abbau der oben genannten Minengesellschaften konzentriert sich hauptsächlich auf die Primärvorkommen, wobei Fördergräben angelegt werden (Abb. 5). Das abgebaute Gestein wird dann mit einer Rüttelmaschine bearbeitet, um die Saphire vom restlichen Gestein zu trennen (Abb. 6).

Die hohe Evaporationsrate im semi-ariden Klima von Südmadagaskar hat die Bildung von massiven Lagen aus Kalkstein auf der Bodenoberfläche begünstigt, welche die Förderung erschweren. Daneben kann die Menge der vorhandenen Saphire innerhalb eines Ganges stark schwanken, so daß eine wirtschaftliche Förderung nicht immer gewährleistet ist.

Regionale Geologie

Die Geologie von Madagaskar zeigt eine enge Verwandtschaft zur geologischen Entwicklung von Ostafrika. Süd-Madagaskar zeichnet sich durch präkambrisches Grundgestein aus, das hauptsächlich aus mittel- und hochmetamorphisierten Gneisen und Metasedimenten besteht. Diese Gesteine entwickelten sich aus einer Schichtenfolge von kontinentalen Sedimenten, die im Archäozoikum (vor etwa 2 600 ma) angehäuften und erstmals metamorphisiert wurden. Sie wurden vom sogenannten Panafrikanischen Tektonothermalen Ereignis (vor etwa 600–500 ma), einer Phase mit großer metamorpher und tektonischer Aktivität, remobilisiert. In Südmadagaskar war diese Phase mit ausgedehnten magmatischen Aktivitäten gekoppelt, wie z. B. mit Granitintrusionen, Granitisierungen und Pegmatitbildungen.

Die Saphirvorkommen im Abbaubereich sind offensichtlich ein Produkt dieser magmatischen Aktivität. Die Saphire werden hauptsächlich in pegmatit-ähnlichen Calcit-Plagioklas-Gängen (Abb. 4) gefunden, die den präkambrischen Sockel durchziehen. Korunde ähnlicher Primärvorkommen in pegmatischen Gesteinen sind relativ ungewöhnlich, obwohl einige der bekanntesten Korundvorkommen einem solchen Lagerstättentyp zugeordnet werden, z. B. die Saphire aus Kaschmir oder die Rubine und Saphire aus dem Umbatal in Tansania. Nach der Feldarbeit eines der Autoren (MSK) konnten verschiedene Typen von pegmatit-ähnlichen Gesteinen von unterschiedlichem Aussehen und unterschiedlicher mineralogischer und chemischer Zusammensetzung im Abbaubereich von Südmadagaskar festgestellt werden. Die Saphirvorkommen beschränken sich jedoch auf einen speziellen miarolithischen Typ.



Abb. 4: Calcit- und Feldspat-haltiges Gestein mit Saphiren aus dem Minengebiet von Andranondambo in SSE Madagaskar. Die Länge des fotografierten Ausschnitts beträgt 4,5 cm.



Abb. 5: Die Abbaustelle in Südmadagaskar bei Andranondambo, die von den Firmen Multicolour und Ste. Arc-en-Ciel Gem.-Corp. bearbeitet wird.

Abb. 6: Der Schotter mit den Saphiren wird mittels einer Rüttelmaschine im Arbeitsgebiet der Firmen Multicolour und Ste. Arc-en-Ciel Gem.-Corp. bearbeitet.

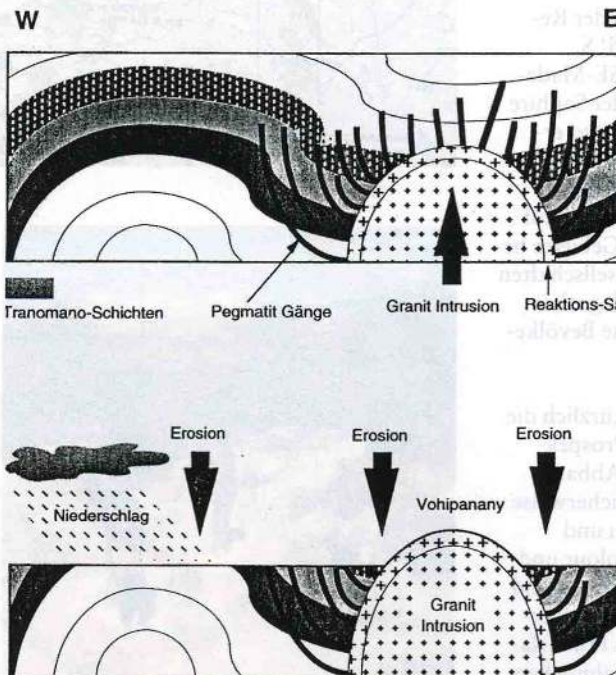
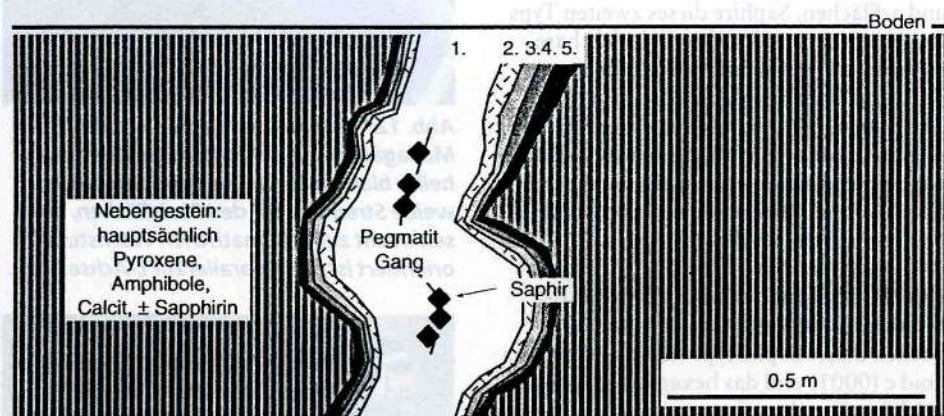


Abb. 7: Schematische Zeichnung der lokalen geologischen Situation im Abbaubereich von Andranondambo. Oben: Gangformation in Begleitung der Granitintrusionen während des Panafrikanischen Tektonometamophen Ereignisses; unten: die Situation heute nach 500 Mio. Jahren Erosion.

Dieser Typ von pegmatit-ähnlichem Gestein bildet ein netzförmiges Muster von relativ schmalen Gängen, die hauptsächlich pyroxenitisches, präkambrisches Grundgestein mit darin vergesellschafteten Marmor-Linsen durchziehen. In den Pyroxeniten und Marmor-Linsen wurden bislang keine Saphire gefunden. Aufgrund von Form und Auftreten der pegmatit-ähnlichen Gesteine, die Saphire enthalten, läßt sich schließen, daß sie Produkte eines relativ späten Stadiums des panafrikanischen Ereignisses sind. Möglicherweise stammen sie aus einem hochdifferenzierten granitoiden Magma mit hohem Wassergehalt. Die Mehrzahl der Petrologen sind sich einig, daß die wäßrig-fluide Phase eine wichtige Rolle in der Entstehung von Ganggesteinen spielt. Die Gänge im präkambrischen Grundgestein befinden sich in unmittelbarer Umgebung von größeren Granitintrusionen, zum Beispiel dem Granit von Vohipanany, der 1,5 km



Abb. 8:
Pegmatit-ähnlicher Gang mit Saphiren mit randlicher Zonierung im Abbaugebiet von Andranondambo, SSE Madagaskar. Der Gang durchzieht einen Pyroxeniten. Die starke Verwitterung der gesamten Sequenz nahe der Erdoberfläche ist deutlich sichtbar.



Miarolitischer Pegmatitgang in pyroxenitischem Nebengestein.

Abb. 9:
Schematische Zeichnung eines Saphir-führenden Gangs in einem pyroxenitischen Gestein von Südmadagaskar. Zonierung vom Zentrum zum Rand:

1. Tonminerale (± Feldspat und Calcit) mit Korund im zentralen Teil des Ganges;
2. Glimmer mit Tonmineralen und Feldspat;
3. Eisenhydroxide, Epidot und Tonmineralien;
4. Epidot, geringe Mengen von Glimmer und Tonmineralien (± Feldspat);
5. Amphibole.

vom Abbaugebiet entfernt liegt (siehe Abb. 7). Die mehr sauren präkambrischen Gneise und Metasedimente im Abbaugebiet besitzen vergleichbare pegmatische Gänge, die jedoch keine Saphire enthalten. Die enge Vergesellschaftung von Korund-führenden, pegmatit-ähnlichen Gängen mit basischem bis ultrabasischem Wirtsgestein scheint für die Genese eines solchen Vorkommens üblich zu sein und geochemische Relevanz zu besitzen.

Das Saphir-führende pegmatit-ähnliche Gestein besteht hauptsächlich aus einem Calcium-reichen Plagioklas und Calcit. Nahe der Bodenoberfläche (bis zu mehreren Metern Tiefe) ist der Plagioklas häufig zu einem feinkörnigen weißen Pulver aus Tonmineralien wie Kaolinit, Saponit und Montmorillonit umgewandelt.

Am Rand der pegmatit-ähnlichen Gänge konnte eine deutliche Zonierung beobachtet werden, die aus einer Abfolge von hauptsächlich Glimmer, Eisenhydroxid, Epidot und Amphibol besteht (Abb. 8 und 9). Diese Zonierung deutet auf extensive metasomatische Prozesse zwischen einem intrudierenden wäßrigen, Aluminium-reichen pegmatit-ähnlichen Gang und dem umgebenden Gestein (Pyroxenit) hin. Die Bildung von Aluminium-reichen Mineralien wie Korund in Nestern im zentralen Teil der Gänge entsteht entweder durch ein großes Wasser/Gestein-Verhältnis oder durch extensive flüssige Rezirkulation während der Bildung der Nester im Gang. Die Bildung von Calcit im pegmatit-ähnlichen Gestein und als Einschuß in den Saphiren ist ein Resultat der mit Calcium und CO_2 angereicherten metasomatischen flüssigen Phase, die aus dem basischen Ganggestein stammt.

Probenmaterial und analytische Methoden

Für die Untersuchung standen mehr als 300 Saphire aus dem Minengebiet im Süden Madagaskars zur Verfügung, welche uns von verschiedenen Händlern überlassen wurden. 34 dieser Steine waren Rohkristalle, die z. T. hitzebehandelt wurden und vor und nach diesem Vorgang zur Verfügung standen. Abb. 10 zeigt einige der Rohkristalle, die für diese Studie untersucht werden konnten. Die Steine wiesen ein Gewicht von bis zu 10 ct auf. Die Saphire sind hellblau bis dunkelblau und zeigen manchmal eine ungleichmäßige Farbverteilung. Daneben wurden trübe hell-blaugraue und, seltener, violette Steine beobachtet.



Abb. 10:
Rohsaphire aus Madagaskar. – Der größte Kristall wiegt ungefähr 10 ct.

Morphologische und kristallographische Eigenschaften der Proben wurden mit Hilfe eines Standardgoniometers sowie durch eine mikroskopische Einmessung von Wachstumsstrukturen bestimmt. Einschlüsse in Rohkristallen und facettierten Proben sowie Bestandteile des umgebenden Gesteins wurden durch Rasterelektronenmikroskopie (JEOL 6300F Electron Microprobe) und Raman-Spektroskopie (Renishaw Raman Mikroskop System 1000) bestimmt. Röntgenographische Untersuchungen wurden an verschiedenen Mineralien durchgeführt, die von den Rohkristallen abgelöst werden konnten. Qualitative chemische Daten wurden mittels eines Phillips PV 9500 Röntgenfluoreszenzspektrometers mit Tracor Northern Spectrace Software ermittelt. Die chemische Zusammensetzung von 13 speziell ausgesuchten Steinen, die Farbzonierungen aufwiesen, wurden quantitativ mit einer Mikrosonde (Cameca Camebax SX 50) bestimmt, indem zwischen 1 und 3 Traversen mit je 50 bis 100 Punktanalysen über vorher mikroskopisch ausgewählte Bereiche gelegt wurden. Spektroskopische Daten wurden mit einem Hitachi U 4001 Spektralphotometer im Bereich zwischen 800 und 290 nm aufgenommen. Dieser Wellenlängenbereich ist charakteristisch für farbgebende Spurenelemente in Saphiren. Infrarotspektroskopische Untersuchungen wurden mit einem Phillips PU 9800 Infrarotspektrometer durchgeführt.

Morphologie und makroskopische Erscheinungsform der Kristalle

Die morphologischen Eigenschaften der Saphire wurden durch die Ermittlung der äußeren Kristallflächen der Rohkristalle und durch die mikroskopische Bestimmung der inneren Wachstumsmerkmale von Rohkristallen und facettierten Steinen in Immersion ermittelt. Aufgrund ihrer Morphologie konnten die Steine in drei Typen unterteilt werden, nämlich in Typ I: dipyramidal bis tönchchenförmig, Typ II: prismatisch, und Typ III: tafelig bis kurzprismatisch-dipyramidal, meist stark verzerrt ausgebildet (siehe Abb. 11). Die Indizierungen der Kristallflächen beruhen auf der Basis einer morphologischen Zelle mit $a : c = 1 : 1,365$.

Typ I (dipyramidaler bis tönchchenförmiger Habitus): Dipyramidale bis tönchchenförmige Kristalle zeigen meist eine mittelblaue Farbe, einige sind auch weißlich oder leicht grau mit einem milchig-gelben Schimmer (Saphire des sogenannten Geuda-Typs, die nach einer Hitzebehandlung ein schönes Blau aufweisen). Violette Steine werden gelegentlich ebenfalls beobachtet. Die Kristallflächen, die in diesem Saphirtyp bestimmt werden konnten, sind das Basispinakoid c (0001), das positive Rhomboeder r ($10\bar{1}1$), sowie die hexagonalen Dipyramiden n ($22\bar{4}3$), w ($11\bar{2}1$), v ($44\bar{8}3$) und z ($22\bar{4}1$). Diese Kristallflächen kommen in verschiedenen Kombinationen vor (Abb. 11 a–c). Eine Farbzonierung parallel zu einer dieser Kristallflächen kann häufig beobachtet werden.

Typ II (prismatischer Habitus): Die Kristalle dieses Typs zeigen das Basispinakoid c (0001), das hexagonale Prisma a ($11\bar{2}0$) und das positive Rhomboeder ($10\bar{1}1$) (Abb. 11d). Ein Teil dieser Kristalle zeigt nur c - und a -Flächen. Saphire dieses zweiten Typs weisen oft eine makroskopisch sichtbare Farbzonierung mit einem dunkelblauen Kern und einer hellblauen Randzone auf. Alle untersuchten Rohsteine dieses Typs zeigten ferner eine auffällige weiße Streifung auf der Randzone der Basisfläche mit einer Orientierung der Streifen senkrecht zu den Prismenflächen a (Abb. 12).

Typ III (tafeliger bis kurzprismatisch-dipyramidaler Habitus): Die Kristallflächen dieses Saphirtyps sind das Basispinakoid c (0001) und das hexagonale Prisma a ($11\bar{2}0$) in Kombination mit verschiedenen hexagonalen Dipyramiden wie z. B. n ($22\bar{4}3$), w ($11\bar{2}1$), v ($44\bar{8}3$) und z ($22\bar{4}1$) (Abb. 11f). Das Wachstum des Prismas a und/oder der hexagonalen Dipyramiden kann in einer oder zwei der sechs symmetrisch äquivalenten Kristallflächen völlig unterdrückt sein. Auf diese Weise entstehen stark verzerrte Saphirkristalle mit einer trapezartigen Form mit nur vier oder fünf Prismenflächen (siehe Abb. 1). Einige Proben

dieses Typs zeigen auch ein ditrigonales Skalenoeeder als zusätzliche Kristallfläche, höchstwahrscheinlich die Fläche $10\bar{2}\bar{1}2\bar{3}$ (Abb. 11e). Diese Kristallfläche kommt in Korunden extrem selten vor, sie kann daher als charakteristisches Merkmal von Saphiren des Typs III aus Madagaskar angesehen werden. Die Kristalle des Typs III sind blau von verschiedener Intensität und weisen eine deutliche Farbzonierung parallel zur Basis auf. Diese Farbzonierung kann aus einem extrem dunkelblauen Streifen durch die Mitte des Steins bestehen, oder aus einem breiten dunkelblauen Band mit hellblauen Rändern (Abb. 13).

Gemmologische Eigenschaften

Die Dichten und die Brechungsindizes der Saphire aus Madagaskar unterscheiden sich nicht von jenen von Saphiren aus anderen Vorkommen. Gemessene Dichten variieren zwischen 3,99 und 4,01 g/cm³. Der Brechungsindex variiert von 1,761 bis 1,763 für n_e und 1,769 bis 1,771 für n_o , mit einer Doppelbrechung von 0,008. Die blauen Saphire sind inert für kurz- und langwelliges UV-Licht, während die wenigen violetten Steine deutlich rot fluoreszieren. Der Pleochroismus der blauen Saphire ist hell grünlich-blau parallel zur optischen Achse (e -Schwingung) und dunkel blau-violett senkrecht zur optischen Achse (o -Schwingung).

wird fortgesetzt

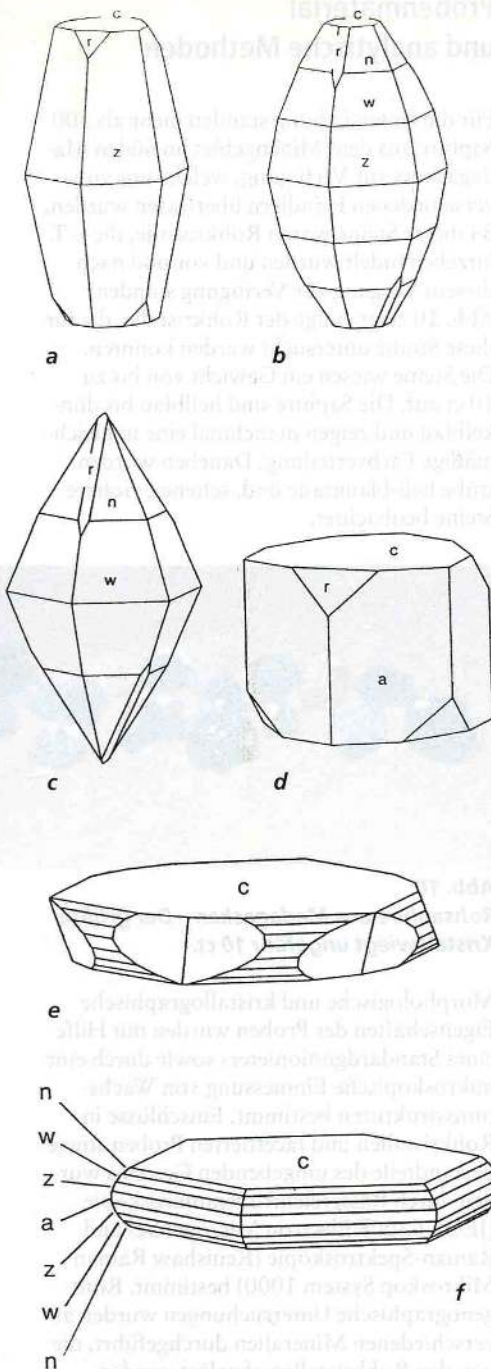


Abb. 11: Die in Saphiren aus SSE Madagaskar auftretenden Kristallformen. a–c: dipyramidaler bis tönchchenförmiger Habitus; d: prismatischer Habitus; e: tafeliger bis kurzprismatisch-dipyramidaler Habitus mit Skalenoeederfläche; f: tafeliger bis kurzprismatisch-dipyramidaler Habitus.



Abb. 12: Prismatischer Saphir aus SSE Madagaskar mit dunkelblauem Kern und heller blauem Rand. Der Rand zeigt eine weiße Streifung auf den Basisflächen, die senkrecht zum prismatischen Wachstum orientiert ist. Blick parallel zur c -Achse. – 4×.



Abb. 13: Tafelige bis kurzprismatisch-dipyramidale Rohkristalle mit unterschiedlicher Farbzonierung. – 2×.

Ein neues Saphirvorkommen im Süden von Madagaskar

Folge 2

Mikroskopische Eigenschaften

Mikroskopische Eigenschaften können unter verschiedenen Arbeits- und Lichtbedingungen beschrieben werden, z. B. in Luft oder in Immersion. Deshalb zeigen bestimmte mikroskopische Merkmale in Abhängigkeit von der jeweils angewandten Untersuchungsmethode ein unterschiedliches Erscheinungsbild. An dieser Stelle erscheint es somit wichtig darauf hinzuweisen, daß Mineralstaub im Mikroskop einen unterschiedlichen Eindruck hervorruft, je nachdem, ob in Dunkelfeldbeleuchtung oder im Durchlicht gearbeitet wird. Was als weißliche Zone im Dunkelfeld beschrieben werden kann, erscheint als bräunliche Zone im Durchlicht in Immersion (vgl. Abb. 21a und b).

Da die Untersuchung und Bestimmung der Wachstumsmerkmale der Steine an sich nur in Immersion stattfand, werden im folgenden Zonen mit Mineralstaub (Rutil?), die in einem Gemolite Binokular mit Dunkelfeldbeleuchtung weißlich erscheinen, als braune oder bräunliche Zonen beschrieben, wie sie im Durchlicht in Immersion in Erscheinung treten.

Saphire vom Typ I (dipyramidaler bis tönchenförmiger Habitus)

Wachstumsstrukturen und Farbzonierung: Die dipyramidal bis tönchenförmig ausgebildeten Saphire weisen in den Kern- und Randbereichen oft unterschiedliche Färbungen auf. Drei unterschiedliche Arten von Farbzonierungen konnten beobachtet werden, nämlich 1. Saphire mit einem farblosen Kern und einem blauen Rand (Abb. 14); 2. Steine mit einem dunkelblauen, zonierten Kern und hellblauem Rand (Abb. 15) und 3. Steine mit einem braunen (in Reflexion weißlichen) Kern und einem blauen Rand (Abb. 16). Die Kerne werden von verschiedenen inneren kristallographischen Flächen begrenzt, die parallel zu den makroskopisch sichtbaren äußeren Kristallflächen orientiert sind. Die braunen Kerne besitzen meist eine homogene, nicht zonierte braune Färbung, aber in einigen Fällen waren auch einzelne sehr kleine braune Partikel in diesen Kernbereichen sichtbar.

Die Zonen um die Kerne und die Proben ohne Farbzonierung zwischen Rand und Kern zeigen starke hell- und dunkelblaue, manchmal extrem komplexe Farbzonierungen parallel zu allen makroskopisch sichtbaren



Abb. 14:
Saphir vom Typ I aus Madagaskar mit beinahe farblosem Kern und blauem Rand. Blick fast parallel zur c-Achse. Immersion, 30×.



Abb. 15:
Saphir vom Typ I aus Madagaskar mit dunkelblauem Kern und beinahe farblosem Rand. Die Zonierung des blauen Bereichs verläuft parallel zur Basis. Blick senkrecht zur c-Achse, die c-Achse verläuft vertikal. – Immersion, 40×.

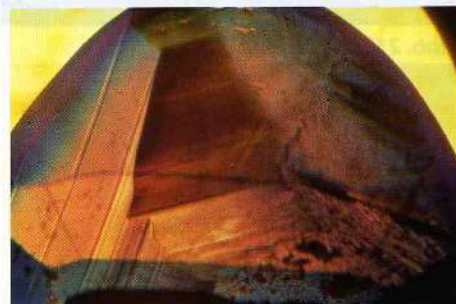


Abb. 16:
Saphir vom Typ I aus Madagaskar mit braunem Kern und hellblauem Rand. Blick senkrecht zur c-Achse, die c-Achse verläuft nahezu vertikal, der dunkelbraune Kern wird durch eine c- und eine r-Fläche begrenzt. – Immersion, 50×.

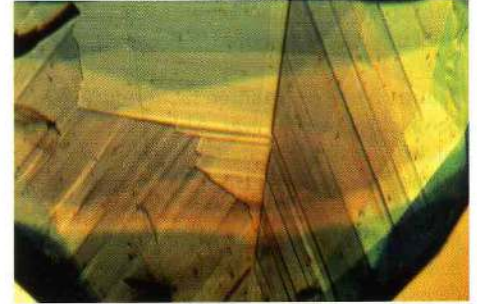


Abb. 17:
Saphir vom Typ I aus Madagaskar mit hell- und dunkelblauer Zonierung. Blick nahezu senkrecht zur c-Achse. Der hellblaue Bereich ist Wachstumsebenen parallel zur Basisfläche zugeordnet, die dunkler blauen Bereiche (links und rechts) sind Wachstumszonen parallel zu zwei hexagonalen Dipyramiden n zuzuordnen. – Immersion, 32×.



Abb. 18:
Saphir vom Typ I aus Madagaskar mit Farbzonierung parallel zum Rhomboeder r und zur Dipyramide n. Blickrichtung etwa 30° zur c-Achse geneigt. – Immersion, 30×.



Abb. 19:
Saphir vom Typ I aus Madagaskar mit Farbzonierung parallel zu den Flächen n, r und n'. Blickrichtung etwa 30° zur c-Achse geneigt. – Immersion, 50×.

Ein neues Saphirvorkommen

Kristallflächen, wie z. B. c, r, n, w und z (Abb. 17–19). In einigen Fällen bildet ein oszillierendes Wachstum von unterschiedlichen Flächen ein mosaikähnliches Muster, das sich gelegentlich durch den gesamten Stein zieht (Abb. 20). Solche Strukturen bestehen aus den Wachstumsebenen c, r, n, w und z, gelegentlich in Kombination mit Flächen, die makroskopisch in diesem Saphirtyp nicht beobachtet wurden, zum Beispiel mit dem hexagonalen Prisma a.

Braune Bereiche konnten nicht nur im Kern beobachtet werden (vgl. Abb. 16), sondern auch als braune Streifen in den äußeren Bereichen der Saphire. Diese braunen Streifen bestehen gewöhnlich aus sehr dünnen Lagen, sie zeigen gelegentlich auch eine Konzentration von feinen bräunlichen Partikeln. Generell sind die braunen Streifen parallel zu einer einzigen Kristallfläche orientiert (Abb. 21a, b und 22), es konnten aber auch Steine beobachtet werden, in denen die braunen Streifen parallel zu zwei oder drei Kristallflächen angeordnet waren (Abb. 23). Diese dünnen, braunen Streifen entstehen häufig durch das oszillierende Wachstum von einer der dominanten Kristallflächen wie z. B. c, r, n, w und z mit einer untergeordneten Fläche, die makroskopisch in diesem Saphirtyp nicht vorhanden ist.

Gelegentlich entpuppte sich diese untergeordnete Fläche als das hexagonale Prisma a (1120), und in einem Fall wurden braune Streifen parallel zur dominanten Dipyramide n (2243) in Kombination mit der untergeordneten Dipyramide o (2245) geformt. In allen Fällen waren die braunen Streifen Bereichen untergeordneter Wachstumsflächen, z. B. Bereichen mit Wachstum parallel a oder o zuzuordnen.

Zwillingslamellen wurden in diesen Steinen nur äußerst selten beobachtet.

Einschlüsse: Sowohl unbehandelte als auch behandelte Saphire vom Typ I besitzen häufig abgerundete Apatit-Kristalle mit rosettenförmigen Heilungsrissen, bestehend aus einer flüssigen und gasförmigen Phase (Abb. 21a). Die Apatite wurden durch Raman-Spektroskopie identifiziert. Daneben treten in einigen Saphiren noch Calcitkristalle mit Rosetten auf (Abb. 22). Die Identität von vier Calcitkristallen, die von einer gebrochenen Fläche herauspräpariert werden konnten, wurde zusätzlich zur Raman-Spektroskopie durch Röntgenbeugung bestätigt.

Typische Festkörpereinschlüsse in Saphiren des Typ I sind demnach Apatit, Calcit, und kleine braune Partikel in Kernen und Streifen. An der Oberfläche eines Rohkristalls, der hauptsächlich von der Basis c und dem negativen Rhomboeder r begrenzt wird, wurden zusätzlich noch dunkelgrüne Spinelle identifiziert (Abb. 24). Spinelle konnten auch im Muttergestein bestimmt werden.

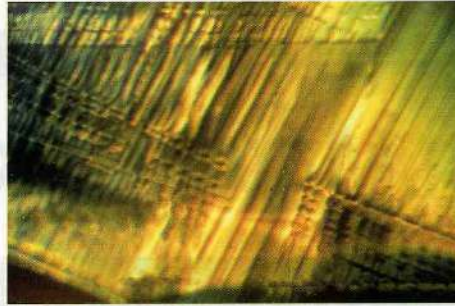


Abb. 20: Mosaikähnliches Wachstumsmuster in einem Saphir vom Typ I aus Madagaskar. – Immersion, 50×.

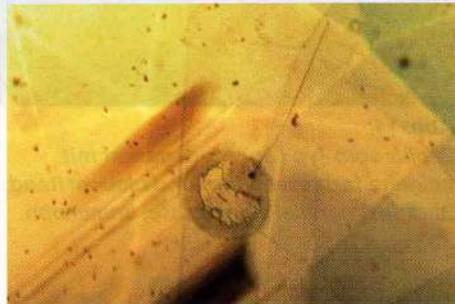


Abb. 21a: a) Parallele braune Streifen in einem Saphir vom Typ I aus Madagaskar. In der Mitte der Aufnahme befindet sich ein kleiner Apatitkristall, der von einer zweiphasigen, aus flüssigen und gasförmigen Bestandteilen gebildeten Rosette umgeben ist; die gasförmige Komponente liegt im Zentrum der Rosette. – Immersion, 60×.
b) Ähnliche, in Reflexion weiß erscheinende Streifen bei Dunkelfeldbeleuchtung. – 30×.

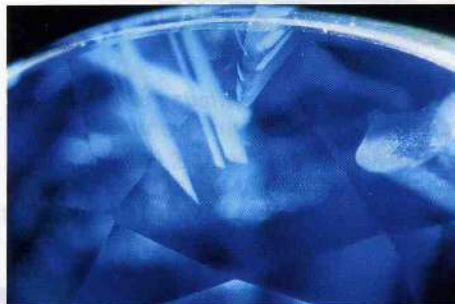


Abb. 21b

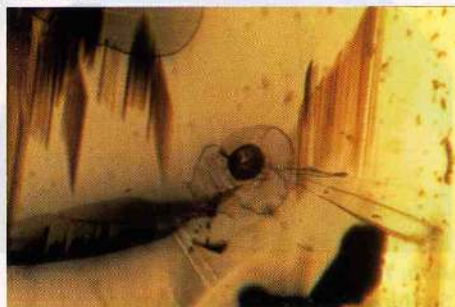


Abb. 22: Parallel angeordnete braune Streifen in einem Saphir vom Typ I aus Madagaskar. Das Zentrum der Abbildung zeigt einen gerundeten Calcitkristall mit einem rosettenähnlichen RiB. – Immersion, 50×.

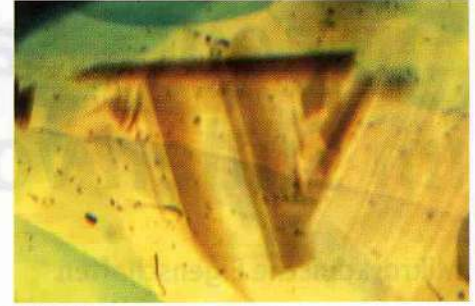


Abb. 23: Braune Streifen parallel zu drei verschiedenen Wachstumsebenen in einem Saphir vom Typ I aus Madagaskar. – Immersion, 50×.



Abb. 24: Spinelleinschlüsse auf einer Oberfläche eines Saphirs vom Typ I aus Madagaskar. – 30×.



Abb. 25: Heilungsriß in einem Saphir aus Madagaskar. – Immersion, 50×.



Abb. 26: Dendritische Substanz auf Heilungsriß in einem hitzebehandelten Saphir aus Madagaskar. – Immersion, 40×.

Heilungsrisse konnten häufig in hitzebehandelten und unbehandelten Steinen beobachtet werden (Abb. 25). Ein Teil der hitzebehandelten Saphire des Handels zeigt daneben Risse mit einer bislang nicht identifizierten Fremdschubstanz, die sich dendritisch in den Riß hineinzieht (Abb. 26). Substanzen in Smaragd, die ähnliche Muster in Rissen erzeugen, wurden mit der Raman-sonde im SSEF-Labor in Basel als organische Füllmittel identifiziert.

Typ II Saphire (prismatischer Habitus)

Wachstumsstrukturen und Farbzonierung: Kristalle mit prismatischem Habitus, die während der vorliegenden Studie untersucht wurden, besitzen eine intensive Farbzonierung mit einem dunkelblauen Kern und einer hellen blauen äußeren Zone (vgl. Abb. 12). Der dunkelblaue Kern ist deutlich vom hellblauen Rand, der parallel zum hexagonalen Prisma a ($11\bar{2}0$), gelegentlich auch parallel zum positiven Rhomboeder r orientiert ist, abgesetzt. Der Kern weist oft eine enge Bänderung parallel zum Basispinakoid c oder gelegentlich auch dunkelblaue trigonal-pyramidale Bereiche auf, die durch die Basis c und Rhomboederflächen begrenzt werden. Der äußere, hellere Bereich der Kristalle wird durch Basis und Prismenflächen, gelegentlich in Verbindung mit Rhomboederflächen, begrenzt. In der Randzone verläuft die Farbzonierung parallel zur

Basis und zu den Prismenflächen. Es kommen auch komplexere Farbzonierungen vor, die in Dunkelfeldbeleuchtung als schwach reflektierendes Muster sichtbar sind.

Einschlüsse: Saphire vom prismatischen Typ besitzen häufig gut gerundete Apatitkristalle (Identifikation mit Raman-Sonde) als Festkörpereinschlüsse, die von langen Röhren begleitet werden (Abb. 27). Die Orientierung der Röhren verläuft senkrecht zu den prismatischen Wachstumsflächen, d. h. senkrecht zu den äußeren Kristallflächen (Abb. 28). Offensichtlich wurden die Apatitkristalle zuerst eingeschlossen und später, als der Wirtkristall weiterwuchs, bildeten sich die Röhren im Anschluß an den Apatit senkrecht zur Wachstumsrichtung. Die Substanz in den Röhren konnte bislang noch nicht identifiziert werden. Heilungsrisse waren auch in diesem Saphirtyp vorhanden. Die weißliche Substanz, welche die Streifung auf den Basisflächen der Rohrkristalle bildet, konnte im Innern der Steine nicht beobachtet werden.

Typ III Saphire (tafeliger bis kurzprismatisch-dipyramidaler Habitus)

Wachstumsstrukturen und Farbzonierung: Dieser Saphirtyp zeigt deutliche Farb- und Wachstumszonierung parallel zu den äußeren Kristallflächen. Blaue und farblose Zonen alternieren in schmalen Bändern meist parallel zur Basis. Drei verschiedene Fälle wurden beobachtet: a) die Farbzonierung zieht sich durch den gesamten Stein (Abb. 29); b) schmale, alternierende Farbzonierungen hellblau/fast farblos beginnen an den äußeren Basisflächen und ziehen sich ins Innere des Kristalls, während das Zentrum nahezu farblos ist (Abb. 30) und c) das Zentrum des Kristalls zeigt eine alternierende hell- und dunkelblaue Bänderung, während die äußeren Zonen farblos sind.

In etwa der Hälfte der Steine vom Typ III befand sich eine zusätzliche, extrem dunkelblaue Lage parallel zur Basis, die durch die Mitte des Kristalls verlief (Abb. 29). Diese schmale dunkelblaue Zone gibt den Saphiren eine mittelblaue Farbe, wenn man die Steine parallel zur optischen Achse betrachtet. Zusätzlich zu diesen verschiedenen Arten der Farbzonierung parallel zur Basis konnten auch Farbzonierungen mit alternierenden hellblauen bis farblosen Bereichen parallel zum Prisma a und/oder parallel zu den hexagonalen Dipyramiden beobachtet werden.

Einschlüsse: Saphirkristalle vom Typ III besitzen häufig Dreiphasen-Einschlüsse, die parallel zu den Basisflächen orientiert sind (Abb. 31). Durch die nunmehr verfügbare Technologie der Raman-Spektroskopie können solche Dreiphasen-Einschlüsse auch zerstörungsfrei untersucht werden.

Im vorliegenden Fall bestanden die Einschlüsse aus flüssigem und gasförmigem CO_2 , die feste Phase wurde als Diaspor identifiziert. Ähnlich ausgebildete Einschlüsse mit identischer Füllung wurden schon von Saphiren aus Sri Lanka beschrieben. Ebenfalls mit der Ramansonde zerstörungsfrei bestimmt wurden flache Calcitkristalle mit korrodierten Rändern (Abb. 32), die parallel zur Basis der Saphire orientiert waren. Daneben befanden sich häufig doppelbrechende Apatitkristalle (Abb. 33) in diesen Steinen. →

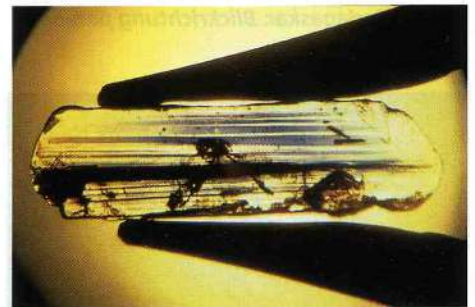


Abb. 29: Farbzonierung parallel zur Basis in einem Saphir vom Typ III aus Madagaskar mit einem dunkelblauen Streifen im Zentrum. Blickrichtung senkrecht zur c -Achse, die c -Achse verläuft vertikal. – Immersion, 20 $\times$.

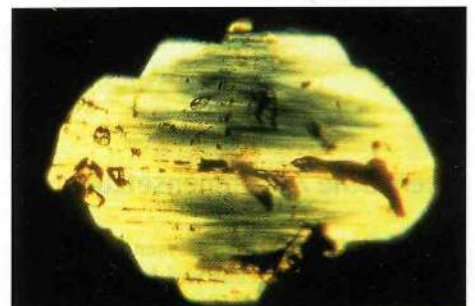


Abb. 30: Farbzonierung parallel zur Basis in einem Saphir vom Typ III aus Madagaskar mit einem dunkelblauen Streifen im Zentrum. Blickrichtung senkrecht zur c -Achse, die c -Achse verläuft vertikal. – Immersion, gekreuzte Polarisatoren, 25 $\times$.



Abb. 31: Drei-Phasen-Einschluß in einem Saphir vom Typ III aus Madagaskar mit einer Orientierung parallel zur Basis. Das Bild zeigt eine flüssige und eine gasförmige CO_2 -Phase sowie Diaspornadeln. Blickrichtung parallel zur c -Achse. – 50 $\times$.



Abb. 27: Gerundete Apatitkristalle mit sich anschließenden Röhren in einem Saphir vom Typ II aus Madagaskar. – 40 $\times$.



Abb. 28: Kleiner gerundeter Apatitkristall mit einer Röhre, die sich senkrecht zu einer prismatischen Wachstumsfläche in einem Saphir vom Typ II aus Madagaskar entwickelt hat. – Immersion, 50 $\times$.

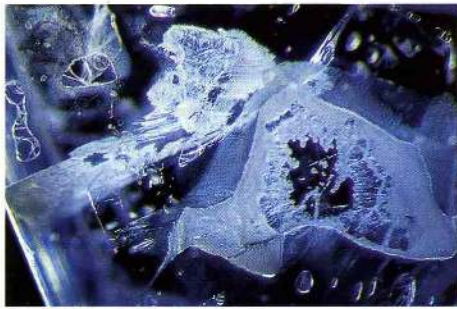


Abb. 32:
Flache Einschlüsse von Calcitkristallen parallel zur Basis in einem Saphir vom Typ III aus Madagaskar. Blickrichtung parallel zur c-Achse. – 40×.

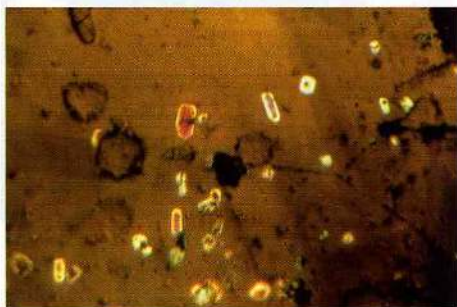


Abb. 33:
Doppelbrechende Apatiteinschlüsse in einem Saphir vom Typ III aus Madagaskar. – Immersion, gekreuzte Polarisatoren, 50×.

Chemische Zusammensetzung

Qualitative chemische Analysen von Proben der drei Saphirtypen aus Süd-Madagaskar zeigen, daß die verschiedenen Steine eines Typs unterschiedliche Fe- und Ti-Gehalte besitzen. Verschiedene Fe- und Ti-Gehalte wurden auch zwischen makroskopisch unterscheidbaren heller und dunkler blauen Zonen, zum Beispiel zwischen einem dunkelblauen Kern und einer hellblauen Randzone eines Saphirs des Typs II mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse festgestellt. Um die chemische Zonierung der Saphire quantitativ zu bestimmen, wurden 13 Steine (8 Saphire vom Typ I, 1 Saphir vom Typ II, und 4 Saphire vom Typ III) mikroskopisch so ausgewählt, daß alle verschiedenen makroskopisch und mikroskopisch zu beobachtenden Arten von Farbzonierungen in die Untersuchung einbezogen wurden. Bei jedem Stein wurden über die unterschiedlich gefärbten Bereiche der Proben ein, zwei oder drei Traversen gelegt und je 50 bis 100 Punktanalysen mit der Elektronen-Mikrosonde durchgeführt. Diese Analysen wiesen eine deutliche Zonierung von Eisen und Titan in allen drei Saphirtypen auf, während die anderen gemessenen Elemente, z. B. Chrom, in den verschiedenfarbenen Bereichen relativ konstante Werte zeigten (Tab. 1).

Typ I Saphire (dipyramidaler bis tönchenförmiger Habitus): Die Saphire des Typ I konnten in drei Untergruppen unterteilt werden: vier Steine (Proben S1, S4, S9 und S20) zeigen eine feine und gelegentlich extrem komplexe Farbzonierung, zwei Steine (Proben H1.88 und S27) besitzen dunkelblaue Kerne mit heller blauen Rändern, und zwei Steine (Proben S5 und S7) haben braune Kerne mit blauen Rändern. Einer der letztgenannten Steine weist zusätzlich braune Streifen in der Randzone auf. Einige dieser Streifen waren auf der Tafel des facettierten Steins angeschliffen.

Die Saphire mit der komplexen Farbzonierung zeigen eine große Variationsbreite von Fe_2O_3 - und besonders von TiO_2 -Konzentrationen innerhalb der Steine. Die Fe_2O_3 -Werte variieren zwischen 0,11 Gew.-% in den helleren Zonen der Probe mit den niedrigsten Konzentrationen bis zu 0,62 Gew.-% in den dunkelblauen Zonen der Probe mit dem höchsten Fe_2O_3 -Gehalt. TiO_2 -Werte variieren zwischen 0,03 und 0,25 Gew.-% (Tab. 1).

Die zwei Proben mit dunkelblauen Kernen und heller blauen Rändern (H1.88 und S27) weisen in den dunkleren Kernen höhere Fe_2O_3 - und TiO_2 -Werte auf als in den hellblauen Rändern (Tab. 1). Im Gegensatz zu den dunkelblauen Bereichen, die sowohl höhere Fe_2O_3 - als auch TiO_2 -Gehalte besitzen, zeigen die braunen Bereiche (Kerne und Streifen) der Proben S5 und S7 keine Unterschiede im Fe_2O_3 -Gehalt im Vergleich zu den sie umgebenden blauen Rändern, dafür aber einen markanten Unterschied in ihren TiO_2 -Gehalten (Tab. 1). Der größte Anstieg von TiO_2 wurde in den braunen Streifen außerhalb des Kerns beobachtet (Tab. 1). Diese hohen TiO_2 -Werte sind ein Anzeichen dafür, daß es sich bei den feinen Partikeln in den braunen Zonen um extrem feine Rutilkristalle handelt.

Typ II Saphire (prismatischer Habitus): Nur ein Stein der Saphire vom Typ II stand für eine quantitative chemische Analyse zur Verfügung (Probe H1). Die Probe zeigt im dunkelblauen Kern leicht erhöhte Fe_2O_3 - und TiO_2 -Werte im Vergleich zu den heller blauen Randbereichen (Tab. 1).

Typ III Saphire (tafeliger bis kurzprismatisch-dipyramidaler Habitus): Die Saphire des Typ III zeichnen sich durch mittlere Fe_2O_3 - und sehr niedrige TiO_2 -Konzentrationen in den heller blauen, beinahe farblosen Bereichen aus (Proben H2, H3, H4 und H5). Die sehr intensiv dunkelblauen, extrem dünnen Lagen parallel zum Basispinakoid durch das Zentrum der Kristalle besitzen dagegen extrem hohe Fe_2O_3 -Konzentrationen (bis 0,97 Gew.-%). TiO_2 -Konzentrationen in diesen Streifen sind ebenfalls höher als die dunkelblauen Bereiche der Typen I und II (Tab. 1). In allen drei Saphirtypen waren außerdem deutliche Ga_2O_3 -Gehalte nachweisbar.

Spektroskopische Daten

Sichtbare und UV-Spektroskopie: Im Verlauf der Untersuchung wurden UV-Vis-Spektren von 25 Rohsteinen und drei facettierten Saphiren aufgenommen. Die unbehandelten Rohsteine zeigen einen gemeinsamen Spektrentypus im sichtbaren und UV-Bereich, der als charakteristisch für dieses Vorkommen angesehen werden kann. Die $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ -Absorptionsbanden ähneln denen, die in Saphiren von Burma, Sri Lanka, Umba (Tansania) oder Kaschmir auftreten, also in Saphiren aus Ganggesteinen oder in solchen metamorphen Ursprungs. Die Absorptionskante im Ultraviolett liegt zwischen 340 und 325 nm. Dies ist ungewöhnlich hoch für Saphire aus metamorphen Gesteinen. Violette Steine besitzen eine deutliche Cr^{3+} -Komponente, die dem blauen Saphir-Spektrum überlagert ist.

In den Spektren hitzebehandelter Steine treten Änderungen im Bereich zwischen 500 und 300 nm auf. Die Fe^{3+} -Absorptionsbanden werden deutlich kleiner, und die Absorptionskante liegt bei Werten um 300 nm. Diese Verminderung der Intensität der Fe^{3+} -Absorptionsbanden in den hitzebehandelten Proben kann durch die Umwandlung von dreiwertigem in zweiwertiges Eisen in Verbindung mit dem Auflösen von Rutilpartikeln erklärt werden. Absorptionsspektren dieses Typs wurden bisher als typisch für hitzebehandelte Saphire, z. B. aus Sri Lanka, angesehen.

Infrarotspektroskopie: Die IR-Spektroskopie der Saphire aus Madagaskar zeigt nicht die scharfen OH-Absorptionslinien im Bereich zwischen 3 000 und 3 500 cm^{-1} , die in Korunden anderer Vorkommen, z. B. in Rubinen aus Mong Hsu, Myanmar, beobachtet wurden. Die Proben weisen lediglich die zwei Absorptionslinien bei 2 930 und 2 855 cm^{-1} auf, die typisch für Korund sind.

Zusammenfassung

Saphire von Madagaskar besitzen eine Reihe von Merkmalen, von denen die meisten auch in natürlichen Saphiren anderer Vorkommen auftreten. Einige besondere Charakteristika können jedoch als diagnostisch für Steine des neuen Vorkommens aus dem Minengebiet um Andranondambo, Süd-Madagaskar, angesehen werden, da sie nur in Proben dieser Lokalität beobachtet wurden.

Die Wachstumsstrukturen der Saphire erlauben eine Unterteilung in drei verschiedene Typen von Steinen. Der erste Typ ist dipyramidal bis tönchenförmig. Saphire mit diesem Habitus werden auch an zahlreichen anderen Saphirfundpunkten beobachtet, z. B. in Sri Lanka und Australien, während der zweite Typ mit prismatischem Habitus z. B. in Montana, USA, auftritt. Der dritte Saphirtyp von Süd-Madagaskar besteht

meist aus stark verzerrten Kristallen, die mit einer ausgeprägten Basis und schmalen Di-pyramiden- und Prismenflächen ausgebildet sind. Diese Kristalle besitzen gelegentlich ein zusätzliches Skalenoeeder, das in Saphiren äußerst selten auftritt.

Die Steine aller drei Typen besitzen eine starke Farbzonierung, die auf Fluktuationen der Wachstumsbedingungen während der Bildung der Kristalle zurückzuführen ist. Diese Farbzonierung kann blockartig sein und farblose Kerne mit dunklem Rand, oder aber dunkler blaue Kerne mit helleren Rändern zeigen. Eine stark variable, manchmal unregelmäßige Farbzonierung wird ebenfalls beobachtet. Einige der Farbzonierungen in ge-

schliffenen Steinen sind ähnlich denjenigen von Saphiren aus Kaschmir, Vietnam oder aus Sri Lanka, so daß allein aufgrund der Farbzonierungen eine Herkunftsbestimmung nicht durchgeführt werden kann.

Steine des Typs I, welcher am häufigsten auftritt, zeigen oft bräunliche Bereiche im Durchlicht, die im reflektierten Licht weißlich erscheinen. In diesen Bereichen lassen sich gelegentlich mit dem Mikroskop feine Ti-Partikel, wahrscheinlich Rutil, nachweisen. Die bräunlichen Bereiche sind entweder im Kern oder entlang von dünnen Wachstumsflächen in den äußeren Bereichen konzentriert. Dieses Merkmal, besonders die Orientierung der braunen Streifen in unter-

geordneten Wachstumszonen, kann als diagnostisch für Saphire aus Süd-Madagaskar angesehen werden, obwohl ähnlich wirkende braune Wachstumszonen auch in Saphiren von Sri Lanka auftreten. Die braunen Zonen in Saphiren von Sri Lanka sind jedoch Wachstumszonen mit Strukturen parallel zu den dominanten Wachstumsflächen zugeordnet.

Als diagnostische Wachstumsstrukturen bei Saphiren des Typs II können dunkelblaue Kerne betrachtet werden, die vom hexagonalen Prisma a und der Basis c, manchmal auch noch vom positiven Rhomboeder r begrenzt werden.

Saphire des Typs III enthalten häufig extrem schmale, dunkelblaue Streifen, die parallel zur Basis c verlaufen.

Festkörpereinschlüsse in Saphiren vom Typ I aus Madagaskar sind hauptsächlich Apatite, die durch die Hitzebehandlung zerstört sein können und dann als weiße Bälle, umgeben von rosettenförmigen Heilungsrissen, auftreten. Die Saphire des prismatischen Typs zeigen häufig gerundete Apatitkristalle mit hohlen Röhren, die senkrecht zu den prismatischen Wachstumsflächen angeordnet sind. Saphire des Typs III besitzen häufig Drei-Phasen-Einschlüsse oder flache Calcitkristalle parallel zur Basis. Ähnliche Drei-Phasen-Einschlüsse mit flüssigem und gasförmigem CO₂ und Diaspor wurden auch schon in Saphiren von Sri Lanka beobachtet. Daneben treten in diesem Saphirtyp noch Apatite auf. Die chemische Zusammensetzung von Madagaskar-Saphiren ist sehr variabel. Diese Variationen werden hauptsächlich von unterschiedlichen Fe₂O₃- und TiO₂-Werten bestimmt, welche die verschiedenen Farbzonierungen widerspiegeln. Hellblaue Bereiche besitzen niedrige Fe₂O₃- und TiO₂-Konzentrationen, dunkelblaue Zonen höhere Fe₂O₃- und TiO₂-Gehalte. Die braunen Kerne und Streifen enthalten Fe₂O₃-Werte, die mit denen der dunkelblauen Bereiche vergleichbar sind, die TiO₂-Gehalte in diesen Bereichen sind dagegen deutlich erhöht.

Tabelle 1: Fe₂O₃- und TiO₂-Konzentrationen in Saphiren aus Madagaskar (in Gew.-%)

Probe	Beschreibung	Anzahl der Analysenpunkte	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
S1 (Typ I)	enge komplexe Farbzonierung, facettiert, Tafel II zur Basis, erhitzt	50	0,18–0,24	0,07–0,20
S4 (Typ I)	enge komplexe Farbzonierung, facettiert, Tafel II zur Basis, erhitzt	50	0,15–0,29	0,05–0,10
S9 (Typ I)	enge komplexe Farbzonierung, facettiert, Tafel II zur Basis, erhitzt	50 + 50	0,11–0,23	0,05–0,25
S20 (Typ I)	enge komplexe Farbzonierung, facettiert, Tafel I zur Basis, erhitzt	50 + 50	0,43–0,62	0,03–0,16
H1.88 (Typ I)	facettiert mit dunkelblauem Kern, heller blauem Rand, Tafel II zur Basis	29 (dunkelblau) 71 (heller blau)	0,22–0,29 0,11–0,15	0,10–0,14 0,02–0,06
S27 (Typ I)	facettiert mit dunkelblauem Kern, heller blauem Rand, Basis, erhitzt	40 (dunkelblau) 10 (heller blau)	0,31–0,40 0,24–0,26	0,05–0,10 0,04–0,06
S5 (Typ I)	facettiert mit braunem Kern und blauem Rand, Tafel II zur Basis, erhitzt	5 (braun) 45 (blau)	0,25–0,28 0,22–0,29	0,10–0,13 0,04–0,09
S7 (Typ I)	facettiert mit braunem Kern und blauem Rand mit braunen Streifen, Tafel II zur Basis, erhitzt	15 + 3 (br. Kern) 1 + 1 + 1 (br. Streifen) 34 + 46 + 49 (blau)	0,29–0,34 0,26–0,29 0,24–0,33	0,09–0,15 0,22–0,27 0,04–0,09
H1 (Typ II)	Rohstein, dunkelblauer Kern und hellblauer Rand, poliert II zur Basis	12 + 20 (dunkelblau) 36 + 80 (hellblau)	0,20–0,23 0,13–0,18	0,06–0,08 0,01–0,06
H3 (Typ III)	Rohkristall, hellblauer Kern und farbloser Rand, poliert II zur Basis	100 + 90	0,30–0,54*	0,00–0,04
H5 (Typ III)	Rohkristall, nahezu farblos	100 + 100	0,22–0,32	0,00–0,03
H2 (Typ III)	Rohkristall, sehr intensive blaue Lage II c und nahezu farbloser Rand, poliert I zur Basis	2 (intensiv blau) 48 + 50 (farblos)	0,77–0,86 0,33–0,45	0,23–0,24 0,01–0,04
H4 (Typ III)	Rohkristall, sehr intensive blaue Lage II c und nahezu farbloser Rand, poliert I zur Basis	2 + 3 (intensiv blau) 47 + 47 (farblos)	0,67–0,97 0,39–0,47	0,13–0,22 0,01–0,03

* Im Vergleich zum nahezu farblosen Rand waren die Fe₂O₃-Werte im hellblauen Kern etwas erhöht.

Danksagung

Die für die vorliegende Untersuchung verwendeten Rohkristalle und facettierten Steine wurden von Herrn W. Spaltenstein, Bangkok, Thailand; Herrn M. Segal, München, und von der Diastar Trading Co., Zürich, Schweiz, zur Verfügung gestellt. Wir danken auch Herrn Dr. O. Medenbach für die Herstellung der Kristallzeichnungen und die Bestimmung einiger Einschlüsse durch Röntgenbeugungsaufnahmen.

Anschriften der Verfasser

Dr. Lore Kiefert, Dr. Henry A. Hänni, SSEF Schweizerisches Gemmologisches Institut, Falknerstrasse 9, CH-4001 Basel, Schweiz;
Dr. Karl Schmetzer, Marbacher Straße 22b, D-85238 Petershausen;
Michael S. Krzemnicki, Mineral.-Petrogr. Institut, Universität Basel, CH-4056 Basel, Schweiz;
Dr. Heinz-Jürgen Bernhardt, Institut für Mineralogie, Ruhr-Universität, D-44780 Bochum.