

Typenprüfung von Lichtpolymerisationsgeräten II: Stand 1998

Jörg Thormann und Felix Lutz

Klinik für Präventivzahnmedizin, Parodontologie und Kariologie, Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Universität Zürich

Schlüsselwörter:

Lichtpolymerisationsgeräte, Lichtleiter

Korrespondenzadresse:

Prof. Dr. med., Dr. med. dent. Felix Lutz
Klinik für Präventivzahnmedizin, Parodontologie und Kariologie, Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Universität Zürich, Plattenstr. 11, CH-8028 Zürich
Tel. 01 634 32 71, Fax 01 634 43 08
E-Mail: lutz@zzmk.unizh.ch

In der vorliegenden Arbeit wurden 16 verschiedene, auf dem schweizerischen Markt erhältliche Lichtpolymerisationsgeräte in Bezug auf Ausrüstungsmerkmale, Lichtleistung, deren Verteilung am Lichtleiteraustrittsfenster und Gerätekomponenten wie integrierten Radiometer, Timer und Kühlelement getestet. Als Grundlage diente das im ersten Teil dieser Publikation veröffentlichte Prüfungsprotokoll (11/1999). Die Ausrüstungsmerkmale variierten von Gerätetyp zu Gerätetyp. Das Gerät Optilux 500 bot alle nur erdenklichen Features, sodass es im Bereich Ausrüstung als Massstab dienen könnte. Ob all diese möglichen technischen Optionen notwendig sind, sei dem einzelnen Benutzer überlassen. Als wichtige Komponenten können jedoch Timer, Radiometer und Spannungstabilisator angesehen werden, da sie die Faktoren Bestrahlungszeit und -intensität mit beeinflussen können. Der Strahlungsfluss in Milliwatt bzw. die Strahlungsflussdichte in Milliwatt pro cm^2 wurden in zwei für die

(Texte français voir page 1313)

Polymerisation wichtigen Wellenlängenbereichen gemessen. Die absoluten Werte mit Standardlichtleiter und bei 230 V lagen zwischen 143,4 mW und 389,7 mW im Wellenlängenbereich von 400 bis 520 nm und zwischen 17,7 mW und 41,8 mW im Wellenlängenbereich von 462 bis 472 nm. Die daraus resultierenden spezifischen Leistungen variierten zwischen 268,3 mW/cm^2 und 862,6 mW/cm^2 im breiten Spektrum von 400 bis 520 nm und zwischen 33,5 mW/cm^2 und 95,4 mW/cm^2 im schmalen Spektrum von 462 bis 472 nm. Wurden die Standardlichtleiter durch Lichtleiter mit anderen Durchmessern ersetzt, so zeigten Lichtleiter mit grösserem Eintrittsfenster die grössere absolute Leistung, Lichtleiter mit kleinerem Austrittsfenster die grössere spezifische Leistung. Turbolichtleiter haben grössere Ein- als Austrittsfenster und vereinen somit beide positiven Effekte in sich.

Die Energie verteilte sich nicht gleichmässig über das Lichtleiteraustrittsfenster. Charakteristisch war eine kegelförmige Verteilung mit maximaler Intensität im Zentrum, die mit zunehmendem Radius abnahm. Entsprechend den spezifischen Leistungswerten zeigten Lichtleiter mit abnehmen-

dem Durchmesser auch homogenere Verteilungsmuster. Nur Turbolichtleiter zeigten schlechtere Verteilungsdiagramme. Wurde die Lichtleistung bei einer Primärspannung von 207 V und 244 V gemessen und mit der Lichtleistung bei 230 V verglichen, zeigte sich, dass nicht alle Geräte einen Stabilisator der Sekundärspannung eingebaut hatten.

Nur 9 der 16 getesteten Geräte verfügten über einen integrierten Radiometer. Der Vergleich ihrer spezifischen Messwerte mit den am eigenen Radiometer ermittelten Sollwerten ergab in nur 2 Fällen eine Übereinstimmung. Die durch die Hersteller programmierten Grenzwerte variierten zwischen 70 mW/cm^2 und 300 mW/cm^2 und lagen damit deutlich zu tief.

Einleitung

Die Güte eines Lichtpolymerisationsgerätes wird in Untersuchungen anhand seiner Durchhärtungsleistung gemessen. Diese Leistung kann auf zwei verschiedene Arten beurteilt werden. Auf der einen Seite kann direkt die Leistung des vom Lichtpolymerisationsgerät emittierten Lichtes gemessen werden

(BARGHI et al. 1994, FAN et al. 1987, KULLMANN 1987, LEE et al. 1993, MANGA et al. 1995, McCABE 1989, MOSELEY et al. 1986, NOMOTO et al. 1994, PEUTZFELDT 1994, PIRES et al. 1993, RUEGGERBERG et al. 1994, RUEGGERBERG et al. 1993), auf der anderen Seite kann indirekt die Durchhärtungsleistung anhand von Kompositproben mit Hilfe von Härtemessungen bestimmt werden (ERNST et al. 1996, FOWLER et al. 1994, HOTZ et al. 1989, KULLMANN 1987, MANGA et al. 1995, McCABE 1989, NOMOTO et al. 1994, PEUTZFELDT 1994, PIRES et al. 1993, RUEGGERBERG et al. 1994, RUEGGERBERG et al. 1993, UNTERBRINK & MUESSNER 1995, WOJTEK et al. 1993).

Beim Prozess der Lichtpolymerisation ist eigentlich nur die Strahlungsenergie, die auf das Kompositmaterial übertragen wird, entscheidend. Sie ist das Produkt aus Strahlungsfluss am Objekt und der Bestrahlungszeit. Der Strahlungsfluss am Objekt hängt vom Strahlungsfluss am Lichtleiter und den ihn beeinflussenden Faktoren auf dem Weg zum Objekt ab. Diese Faktoren sind der Abstand zwischen Objekt und Lichtleiter, dessen Durchmesser und das Medium zwischen Lichtleiter und Objekt. Der Strahlungsfluss am Objekt variiert aus diesem Grund mit der Art der Aushärtungstechnik (direkt, transdental oder durch ein Werkstück) und mit der Art der Präparation (Kavitätenklasse I bis V, Veneer-, Inlay- oder Kronenpräparation). Diese Ausführungen machen deutlich, dass je nach Präparation und Aushärtungstechnik die Grössen Strahlungsfluss am Lichtleiter und/oder Bestrahlungszeit angepasst werden müssen, um eine ausreichende Strahlungsenergie am Objekt zu erreichen. Eine Auswahl an Belichtungsprogrammen, die die verschiedenen Präparationsformen bei definierter Aushärtungstechnik umfassen und dementsprechend die Grössen Strahlungsfluss

am Lichtleiter und Bestrahlungszeit regulieren, würde den Prozess der Lichtpolymerisation für den Anwender vereinfachen und die Qualität der Härtung sicherstellen.

Lichtpolymerisationsgeräte mit verschiedenen Belichtungsmodi sind zur Zeit nicht verfügbar, sieht man einmal vom Soft-Start-Modus ab. Dieser hatte bei Versuchen im Vergleich zum konventionellen Belichtungsmodus initial nach der Belichtung eine bessere marginale Adaptation (MEHL et al. 1997). Dieser Vorteil geht aber in Langzeitversuchen unter physiologischer Belastung wieder verloren (TSCHUPP 1996), sodass der Nachteil einer längeren Belichtungszeit überwiegt. In Untersuchungen wird zurzeit festgestellt, wie der Strahlungsfluss am Lichtleiter und die Bestrahlungszeit bei den verschiedenen Präparations- und Belichtungs-techniken variiert werden müssen, um ein Optimum bei der Durchhärtung zu erzielen. Die in dieser Studie evaluierten Leistungspotentiale dienen dabei als Ausgangsbasis.

Mit dieser Untersuchung soll das im ersten Teil dieser Publikation veröffentlichte Prüfungsprotokoll (11/1999) (THORMANN et al. 1999), eine Typenprüfung von Lichtpolymerisationsgeräten, umgesetzt werden. Neben den physikalischen Leistungswerten des Strahlungsfeldes, die in erster Linie zur Beurteilung der Qualität der Lichthärtung dienen, wurden auch einzelne wichtige Gerätebauteile untersucht.

Die getesteten Lichtpolymerisationsgeräte

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden je 3 Einheiten von 16 verschiedenen, auf dem schweizerischen Markt erhältlichen Lichtpolymerisationsgeräten (Tab. I) getestet. Um nicht nur den mitgelieferten Standardlichtleiter zu berücksichtigen, wurden

Tab. I Ausstattungsm Merkmale

Gerätetyp	Herstellera-dresse	Halogen-reflektorlampe	Timersignal		Timermodus		Radio-meter
			akustisch	optisch	Kont. Betrieb	Intervallbetrieb	
Helioflux DLX (A)	Vivadent Ets. FL - 9494 Schaan	12V, 75W	X		X		analog
Coltolux 4 (B)	Coltène AG CH-9450 Altstätten	12V, 75W				X	digital
Optilux 500 (C)	Kerr GmbH D - 76185 Karlsruhe	12V, 80W	X	X	X	X	digital
Elipar Highlight (D)	Espe Dental-Medizin D - 82229 Seefeld	12.5V, 75W	X			X	analog
XL 3000 (E)	3M Schweiz AG CH - 8803 Rüschlikon	12V, 75W	X		X	X	analog
Acta (F)	Satelec GmbH D - 40822 Mettmann	15.7V, 44W	X	X		X	digital
Polofil Lux (G)	Voco GmbH D - 27457 Cuxhaven	12V, 75W	X		X	X	-
Spectrum Plus (H)	Dentsply DeTrey GmbH CH - 6300 Zug	9.8V, 49W				X	analog
ProLite (I)		14V, 35W		X	X	X	analog
Translux EC/ECS (K)	Heraeus AG CH - 8045 Zürich	15V, 150W	X		X		-
Translux CL (L)		12V, 100W	X		X		-
Degulux (M)	ADS Dentaltechnologie AG CH - 6331 Hünenberg	12V, 75W	X		X	X	-
CU - 100 RLC (Q)	Jovident International BV NL-5628 TC Eindhoven	12V, 75W	X	X	X	X	analog
PolyLUX 2 (R)	KaVo Dental AG CH - 5200 Brugg	12V, 75W		X		X	-
Polylux C1 (S)	Sirona AG D - 64625 Bensheim	15V, 150W	X	X		X	-
Polylux C4 (T)		15V, 150W	X		X		-

Tab. II Leistungswerte der verschiedenen Lichtleiter in den Wellenlängenbereichen 400–520 nm und 462–472 nm

Lampentyp	Lichtleiter	Nennleistung in mW		Nennleistung in W		Spektrale Fenster 400 - 520nm		Spektrale Fenster 462 - 472nm		Vgl. mit Standardlichtleiter (%)		
		EP	AP	EP	AP	Strahlungsfluss (mW/cm²)	Strahlungsdosis (mJ/cm²)	Strahlungsfluss (mW/cm²)	Strahlungsdosis (mJ/cm²)	Strahlungsfluss	Strahlungsdosis	
Vivadent	Standard	3	7	7	13	318.13	1	629.53	36.73	68.36	100.0	100.0
	Power-Boost	3	12	7	13	429.19	2.34	154.78	42.49	113.3	133.3	133.3
	Large	3	12	12	13	471.14	1	410.58	54.43	48.12	144.3	56.5
	Pin-Point	4	5.5	1.75	0.02	120.74	9.85	5019.79	13.13	545.79	35.8	572.3
Coltene	gelbeses Licht	3	7.5	7.5	0.44	190.82	1	431.88	27.32	81.79	100.0	100.0
	Controlux 4	4	12	12	1.13	294.83	1	264.22	42.46	27.54	132.5	60.7
	gelbeses Licht	7	10	10	0.79	268.17	1	329.71	38.65	47.03	134.4	75.1
	gelbeses Licht	8	8	8	0.07	27.34	1	393.40	3.64	62.80	14.4	90.3
Dentsply/3M	11mm curved Tri-Dent	9	10	10	0.79	369.79	1	493.19	47.89	63.22	129.0	100.0
	Optilux 500	12	11.5	7.25	0.41	272.53	2.52	152.36	29.23	65.24	151.9	174.8
	3mm curved Tri-Dent	11	1.75	1.75	0.02	13.29	1	532.72	1.47	60.98	3.5	114.8
	3mm curved, Clearform	12	12	12	1.13	420.25	1	379.80	45.36	40.12	104.8	75.4
Egger	11mm curved Tri-Dent	13	2.25	2.75	0.11	437.29	2.74	1738.33	30.66	183.23	100.0	100.0
	11mm curved Tri-Dent	14	10	10	0.79	394.15	1	499.13	41.42	52.75	101.1	96.1
	Standard	15	6.75	8.75	0.60	357.45	1	357.71	38.52	62.89	100.0	100.0
	Mini	16	1.75	1.75	0.02	13.29	1	532.72	1.47	60.98	3.5	114.8
3M	Tri-Dent	17	7.5	3.75	0.15	141.12	4	141.12	43.73	143.29	100.0	100.0
	Tri-Dent	18	7	7	0.39	194.52	1	594.52	35.52	68.52	100.0	100.0
	Tri-Dent	19	11.5	11.5	1.04	395.26	1	395.26	39.60	38.32	100.0	100.0
	Tri-Dent	20	7	7	0.39	194.52	1	594.52	35.52	68.52	100.0	100.0
Dentsply/3M	Standard	21	7	7	0.39	194.52	1	594.52	35.52	68.52	100.0	100.0
	Standard	22	6.25	6.25	0.51	215.95	1	431.88	34.20	46.91	100.0	100.0
	Standard	23	19	19	1.33	310.83	1	234.18	37.07	27.89	141.3	64.9
	Standard	24	6.25	6.25	0.51	215.95	1	431.88	34.20	46.91	100.0	100.0
Dentsply/3M	Standard	25	2.75	2.75	0.06	53.91	1	950.65	24.9	159.51	34.8	223.4
	Standard	26	19	19	1.33	310.83	1	234.18	37.07	27.89	141.3	64.9
	Standard	27	6.25	6.25	0.51	215.95	1	431.88	34.20	46.91	100.0	100.0
	Standard	28	6.25	6.25	0.51	215.95	1	431.88	34.20	46.91	100.0	100.0
Külner	Standard	29	6.25	6.25	0.51	215.95	1	431.88	34.20	46.91	100.0	100.0
	Standard	30	2.75	2.75	0.06	53.91	1	950.65	24.9	159.51	34.8	223.4
	Standard	31	19	19	1.33	310.83	1	234.18	37.07	27.89	141.3	64.9
	Standard	32	6.25	6.25	0.51	215.95	1	431.88	34.20	46.91	100.0	100.0
Külner	Standard	33	7.5	7.5	0.44	190.82	1	431.88	27.32	81.79	100.0	100.0
	Standard	34	7.25	7.25	0.41	186.60	1	395.26	33.00	77.51	100	100
	Standard	35	7	7	0.39	194.52	1	594.52	35.52	68.52	100	100
	Standard	36	3.75	3.75	0.07	27.34	1	393.40	3.64	62.80	100.0	100.0
Külner	Standard	37	11.75	11.75	1.06	374.83	1	345.07	34.65	34.56	142.0	91.8
	Standard	38	6.75	6.75	0.60	271.60	1	451.07	31.20	51.29	100.0	100.0
	Standard	39	6.75	6.75	0.60	271.60	1	451.07	31.20	51.29	100.0	100.0
	Standard	40	7	7	0.39	194.52	1	594.52	35.52	68.52	100	100
Külner	Standard	41	6.25	6.25	0.51	215.95	1	431.88	34.20	46.91	100.0	100.0
	Standard	42	8.75	8.75	0.80	270.41	1	448.70	32.07	63.34	102.8	102.8
	Standard	43	7	7	0.39	194.52	1	594.52	35.52	68.52	100	100
	Standard	44	7	7	0.39	194.52	1	594.52	35.52	68.52	100	100



die Messungen, die die Lichtleistung betrafen, auch mit den zusätzlich lieferbaren Lichtleitern (Tab. II) durchgeführt. Die publizierten Daten stellen, wenn nicht anders erwähnt, Mittelwerte der 3 getesteten Geräte eines Typs dar.

Technische Daten und Ausstattungsmerkmale

Die Informationen über technische Daten und Ausstattungsmerkmale wurden anhand des Datenprotokolls für jeden einzelnen Gerätetyp zusammengefasst.

Es zeigte sich deutlich, dass sich die Gerätetypen in verschiedenen Merkmalen unterschieden. Vom Geräteaufbau her liessen sich die verschiedenen Gerätetypen in Direkt- oder Leitergeräte (LUTZ et al. 1992), von der Art der Stromversorgung in Akku- oder Netzgerät und von dem Ort der Montage in externe oder in Units integrierte Geräte einteilen. Auf das gesamte Spektrum an technischen Details kann im Folgenden nicht näher eingegangen werden (THORMANN, 1999). Einige technische Daten und Merkmale von einzelnen Gerätekomponenten sind aber für die Interpretation der Versuchsdaten von Interesse.

Die Nennleistung der Halogenreflektorlampen (Tab. I) variierte je nach Gerätetyp zwischen 35 Watt und 150 Watt. Den verschiedenen Leistungsgruppen liessen sich spezielle Gerätekatégorien zuordnen. Mit 150 Watt unterschieden sich die drei Leitergeräte (Translux EC/ECS, Sirona C1 und C4) deutlich von den Direktgeräten, deren Nennleistungen unter 100 Watt lagen. Im Weiteren zeigte das in die Untersuchung einbezogene Akku-gerät ProLite die geringste Lampenleistung mit 35 Watt.

Die meisten Hersteller boten ein grosses Programm an verschiedenen Lichtleitern an (Tab. II). Auch die Gerätetypen, die nur mit einem Lichtleiter ausgestattet waren, verfügten laut Zubehörliste über weitere Lichtleiter. Mit Ausnahme der Turbolichtleiter besaßen alle geprüften Lichtleiter gleich grosse Ein- wie Austrittsfenster. Die Durchmesser der verschiedenen Standardlichtleiter lagen im Bereich zwischen 6,5 und 10 mm. Dies bedeutet ein Flächenverhältnis von über 2 zwischen kleinstem und grösstem Standardlichtleiter. Auffallend war, dass nur wenige Gerätetypen mit Turbolichtleitern ausgerüstet werden konnten. Sinn dieses speziellen Typus von Lichtleiter ist es, grössere Energiedichten am Austrittsfenster durch eine Verjüngung des Durchmessers zu erreichen. Aus diesem Grund differieren Eintritts- und Austrittsfenster in ihrem Durchmesser – das Eintrittsfenster ist grösser als das Austrittsfenster. Nur die Geräte Heliolux DLX, Optilux 500, Elipar Highlight und Poly-lux 2 verfügten über Lichtleiter mit Turbo-Effekt, wobei die Turbolichtleiter der beiden letztgenannten Gerätetypen sehr kleine Lichtleiteraustrittsfenster mit einem Durchmesser von ≤ 6 mm hatten, also nicht im Bereich der Standardlichtleiter. Neben den Standardlichtleitern verfügten alle Gerätetypen über Lichtleiter mit grösseren und kleineren Durchmessern ohne Turbo-Effekt.

Die verschiedenen Ausstattungsmerkmale eines Lichtpolymerisationsgerätes dienen der Vereinfachung des Polymerisationsprozesses. Bei Fehlen bestimmter Merkmale ist die Polymerisation zwar nicht eingeschränkt, die Routineanwendung jedoch erschwert (FAN et al. 1987, MARTIN & JEDYNAKIEWICZ 1995, TAKAMIZU et al. 1988, WELTE 1992). Eine Zusammenstellung dieser bestimmten Merkmale ist deshalb notwendig. Ging man die verschiedenen Gerätetypen auf der Suche nach diesen Kriterien durch, so bot das Gerät Optilux 500 (Kerr/Demetron) alle nur erdenklichen Schikanen und konnte deshalb als Massstab im Bereich Ausstattungsmerkmale dienen. Über Zweckmässigkeit dieser möglichen Ausstattungsmerkmale lässt sich aber streiten,

sodass jeder Anwender individuell über den Nutzen entscheiden muss.

Einzig und allein Ausstattungsmerkmale, die über die Qualität der Polymerisation entscheiden können, sollten in allen Geräten integriert sein. Bestrahlungszeit und -stärke sind entscheidende Faktoren im Prozess der Lichthärtung. Aus diesem Grund können Timer, Spannungsstabilisator und Radiometer als sehr wichtige Bauteile eines Lichtpolymerisationsgerätes angesehen werden. Der Timer bestimmt die Länge eines Belichtungsintervalls und kontrolliert so die Bestrahlungszeit. Spannungsstabilisator und Radiometer hingegen dienen der Aufrechterhaltung bzw. Überwachung der Lichtleistung und kontrollieren so die Bestrahlungsstärke eines Gerätes.

Alle am Versuch teilnehmenden Geräte verfügten über einen Timer, wenn auch in verschiedenen Ausführungen (Tab. I). Laut Herstellerangaben hatten nur die beiden Gerätetypen Heliolux DLX und Translux EC/ECS keinen Spannungsstabilisator eingebaut. Im Gegensatz dazu hatten nur knapp mehr als die Hälfte aller Geräte einen Radiometer integriert (Tab. I).

Lichtleistung

Spektrale Verteilung

Die spektrale Verteilung des emittierten Lichtes hängt von der Lichtquelle selbst und von den Transmissionseigenschaften des Blaufilters ab. In allen Gerätetypen wurde als Lichtquelle eine Niedervolthalogenlampe verwendet. Sie erzeugt als Glühstrahler ein kontinuierliches Strahlungsspektrum, das sich vom UV-Bereich über den sichtbaren bis in den Infrarotbereich erstreckt. Dabei überwiegen bei der Glühlampe im Vergleich zum Tageslichtspektrum stets die roten Spektralanteile. Die Gesamtmenge der Strahlung und somit die der Leistung wächst mit der vierten Potenz der Wendeltemperatur. Dabei verschiebt sich das Strahlungsmaximum mit zunehmender Wendeltemperatur vom Infrarotbereich zum sichtbaren Bereich hin (OSRAM 1994). Ohne den Einbau eines Blaufilters würde die Spektralanalyse des emittierten Lichtes im Wellenlängenbereich von 400 bis 520 nm eine mit der Wellenlänge ansteigende Funktion ergeben.

Wurden die erhaltenen Spektren der verschiedenen Gerätetypen im Wellenlängenbereich von 400 bis 520 nm analysiert, so zeigte sich dieser Charakter der Halogenlampe in den Wellenlängenbereichen, wo die Absorption des von der Halogenreflektorlampe emittierten Lichtes durch den Blaufilter am geringsten war. In diesen Wellenlängenbereichen zeigten die Spektren der verschiedenen Gerätetypen einen ansteigenden Verlauf. Durch die unterschiedlichen Transmissions- bzw. Absorptionseigenschaften der eingebauten Blaufilter begrenzt, variierte dieser Wellenlängenbereich von Gerätetyp zu Gerätetyp. Die Resultate der spektralen Verteilung des von Lichtpolymerisationsgeräten emittierten Lichtes zeigten bei allen Gerätetypen eine typische Kurve (Abb. 1), die sich in drei Phasen einteilen liess. In der ersten Phase stieg der spektrale Strahlungsfluss zunächst schwach, dann stark an und ging dann in eine schwach ansteigende Phase über. In der dritten Phase flachte sich die Kurve ab, erreichte ihr Maximum und fiel stark ab, bevor sie allmählich auslief. Diese drei Phasen der spektralen Verteilung hingen stark von den Transmissions- bzw. Absorptionseigenschaften des jeweiligen Blaufilters ab. Ohne den Vergleich der Lichtspektren mit und ohne Blaufilter konnte aber keine genaue Aussage über diese Eigenschaften des Blaufilters gemacht werden. Es konnte nur gesagt werden, dass die Transmission des Blaufilters während der ersten Phase anstieg, sie ihr Maximum in der zweiten Phase erreichte und in der dritten Phase wieder abfiel.

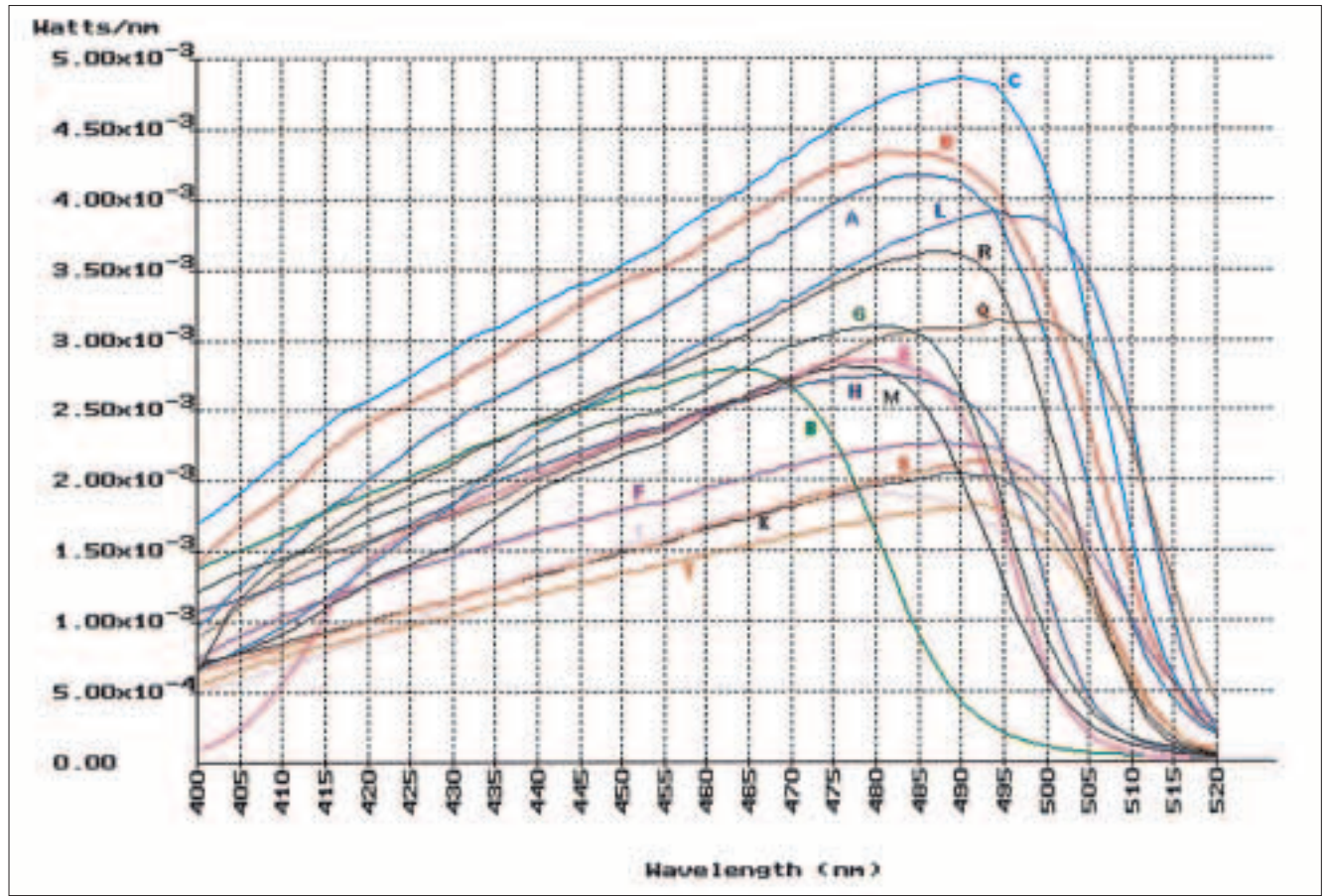


Abb. 1 Spektrale Verteilung des Strahlungsflusses im Wellenlängenbereich 400–520 nm (Legende in Abb. 1)

Fig. 1 Répartition spectrale du flux lumineux dans les plages de longueurs d'ondes entre 400 et 520 nm (les lettres correspondent à celles du Fig. 1)

Wird der spektrale Strahlungsfluss integriert bzw. die Fläche unter der Kurve ermittelt, ergibt sich der Strahlungsfluss im jeweiligen spektralen Fenster. Die Strahlungsflusswerte für den UV-Bereich und den Bereich über 520 nm waren wie im Wellenlängenbereich von 400–520 nm für jeden Gerätetyp unterschiedlich (Tab. III). Verursacht durch zu grosse Transmissionswerte der Blaufilter in den unerwünschten Wellenlängenbereichen erreichten einige Geräte dort sehr hohe Strahlungsflusswerte. Filter mit idealen Transmissionseigenschaften, d. h. einer Transmission von 100% über den gesamten definierten Nutzlichtbereich und 100% Absorption ausserhalb dieses Wellenlängenbereichs sind nicht realisierbar. Dennoch zeigten die Strahlungsflusswerte einzelner Geräte, dass mit der entsprechenden Filterwahl über 95% der Gesamtstrahlung auf den Wellenlängenbereich des definierten Nutzlichtes fallen und trotzdem hohe Leistungswerte erzielt werden können.

Nutzlichtbereich der Photopolymerisation

Die absoluten Messungen für alle Versuchskombinationen wurden in zwei verschiedenen Spektren, den Wellenlängenbereichen von 400 bis 520 nm und 462 bis 472 nm, durchgeführt (Tab. II). Wie erwartet rangierten die Geräte in den beiden Wellenlängenbereichen aufgrund der unterschiedlichen Filtereigenschaften in anderer Reihenfolge. Neben Filtertyp (LUTZ et al. 1992) und dessen Alterung (LEE et al. 1993) hängt die Leistung der emittierten Strahlung von der Nennleistung (WILLER 1982) und Alterung der verwendeten Halogenlichtquelle (LEE et al. 1993)

ab. Verluste durch Alterung von Gerätekomponenten konnten aber aufgrund von fabrikneuen Geräten ausgeschlossen werden. Es blieb die Nennleistung der eingebauten Halogenlampen. Stellte man die Strahlungsflusswerte der verschiedenen Gerätetypen der Nennleistung ihrer Halogenlampe gegenüber, so zeigten die Leitergeräte mit einer Nennleistung von 150 Watt die kleinsten Werte. Grund dafür war der grosse Transmissionsverlust der Flüssiglichtleiter im Vergleich zu den starren Lichtleitern der Direktgeräte (WILLER 1982). Eine Analyse der Strahlungsflusswerte der Direktgeräte zeigte keine direkte Beziehung zwischen der Nennleistung der eingebauten Halogenlampe und der Leistung des emittierten Lichtes. Nur bei hohen Differenzen in der Nennleistung ergab sich ein Zusammenhang. Das Akkugerät Prolite zeigte zum Beispiel mit einer Nennleistung von nur 35 Watt den kleinsten Leistungswert unter den Direktgeräten.

Die Lichtleiterein- und Lichtleiterausstrittsfenster der getesteten Standardlichtleiter hatten jeweils den gleichen Durchmesser und variierten je nach Gerätetyp zwischen 6,5 und 10 mm. Curtis (CURTIS et al. 1995) zeigte, dass die Strahlungsenergie der Halogenreflektorlampe auf einen Kreis fokussiert ist, dessen Durchmesser 15 mm gross ist. Die Strahlungsenergie wird dann durch die Fläche des Eintrittsfensters in den Lichtleiter eingekoppelt. Da die Durchmesser der Eintrittsfenster von Lichtleitern kleiner als 15 mm sind, geht ein Teil der Energie verloren. Mit zunehmender Grösse des Lichtleitereintrittsfensters nimmt somit auch die aufgenommene und ausgestrahlte Energie zu.

Tab. III Spektrale Verteilung des emittierten Lichtes

Gerätetyp	Peak (in nm) des emittierten Spektrums	Strahlungsfluss (in mW) und prozentualer Anteil an Gesamtstrahlung			
		im Bereich von 300-800nm (Gesamt- strahlung)	im UV - Bereich von 300-400nm	im Nutzlicht-bereich von 400-520nm	im Bereich von 520-800nm
Vivadent: Heliolux DLX	486	328.3 (100%)	6.1 (1.85%)	318.1 (96.9%)	4.1 (1.25%)
Coltene: Coltolux 4	465	222.7 (100%)	29.1 (13.05%)	190.8 (85.7%)	2.8 (1.25%)
Kerr/ Demetron: Optilux 500	490	405.6 (100%)	12.9 (3.2%)	389.7 (96.05%)	3 (0.75%)
Espe: Elipar Highlight	482	371.5 (100%)	11.7 (3.15%)	353.4 (95.15%)	6.4 (1.7%)
3M: XL 3000	480	196.1 (100%)	0.7 (0.35%)	194.5 (99.2%)	0.9 (0.45%)
Satelec: Acta	488	207 (100%)	10.2 (4.9%)	192.7 (93.1%)	4.1 (2.0%)
Voco: Polofil Lux	481	250.8 (100%)	20.7 (8.25%)	228.3 (91.05%)	1.8 (0.7%)
Dentsply/ DeTrey: Spectrum Plus	482	235.8 (100%)	18.2 (7.7%)	215.9 (91.6%)	1.7 (0.7%)
Dentsply/ DeTrey: Pro Lite	482	152.7 (100%)	7.7 (5.0%)	143.4 (93.95%)	1.6 (1.05%)
Kulzer: Translux EC	490	188.7 (100%)	15.2 (8.05%)	159.9 (84.75%)	13.6 (7.2%)
Kulzer: Translux CL	494	309.1 (100%)	8.1 (2.6%)	296.9 (96.05%)	4.1 (1.35%)
Degussa: Degulux	476	202 (100%)	10.8 (5.35%)	189.6 (93.85%)	1.6 (0.8%)
Omnident: CU-100RLC	500	276.9 (100%)	8.7 (3.15%)	263.6 (95.2%)	4.6 (1.65%)
Kavo: Polylux 2	488	276.2 (100%)	3.2 (1.15%)	271.6 (98.35%)	1.4 (0.5%)
Sirona: Polylux C1	493	182.5 (100%)	11.2 (6.15%)	163.4 (89.5%)	7.9 (4.35%)
Sirona: Polylux C4	492	170.3 (100%)	9.9 (5.85%)	144.2 (84.65%)	16.2 (9.5%)

Wenn auch der Vergleich der Messwerte von Gerätetypen mit vergleichbaren Halogenreflektorlampen diese These nicht immer bestätigt, so verhalten sich die verschiedenen Lichtleiter eines Gerätetyps exakt danach.

Gerätetypen mit gleicher Nennleistung und gleichem Durchmesser des Standardlichtleiters variierten sehr stark in ihren Leistungswerten. Als Beispiel sind hier die Geräte Heliolux DLX, Polofil Lux und Degulux zu nennen. Aus diesem Grund müssen neben Filtertyp, Halogenreflektorlampe und Lichtleiter noch weitere Faktoren existieren, welche die Grösse des emittierten Lichtes limitieren. Sie sind sicherlich im optischen System Halogenreflektorlampe – Filter – Lichtleitereintrittsfenster zu suchen. Dazu gehören v. a. Eigenschaften des Reflektors (OSRAM 1994) sowie Abstand und Orientierung des Lichtleiters (MOSELEY et al. 1986).

Dividiert man die Strahlungsflusswerte durch die Fläche der Lichtleiteraustrittsfenster, erhält man die Strahlungsflussdichte. Wurden diese Werte den Strahlungsflusswerten gegenübergestellt, so zeigte sich eine andere Reihenfolge der Gerätetypen. Verursacht wurde dies durch die unterschiedlichen Flächen der Lichtleiterfenster. Zwischen grösstem und kleinstem Standardlichtleiter mit Durchmessern von 10 bzw. 6,5 mm lag ein Flächen-

verhältnis von 2,37 vor. Nimmt der Strahlungsfluss auf der einen Seite mit dem Durchmesser der Lichtleitereintrittsfenster zu (CURTIS et al. 1995), so nimmt die Strahlungsflussdichte mit dem Quadrat des Durchmessers des Lichtleiteraustrittsfensters ab (MOSELEY et al. 1986, WILLER 1982). Dies bedeutet, dass bei der Beurteilung der Lichtleistung eines Lichtpolymerisationsgerätes immer die Durchmesser der Lichtleiterfenster in Zusammenhang mit den beiden Strahlungsgrössen, Strahlungsfluss und Strahlungsflussdichte gesehen werden müssen.

Genauere Aufschlüsse über den Zusammenhang zwischen Lichtleiterparametern und Strahlungsfluss bzw. Strahlungsflussdichte ergaben sich aus dem Vergleich der Leistungswerte der verschiedenen Lichtleiter eines Gerätetyps. Da alle Messungen am gleichen Gerätetyp bzw. sogar am gleichen Gerät durchgeführt wurden, waren die Resultate unabhängig von allen anderen Faktoren des Gerätes ausser den lichtleiterspezifischen Grössen. Entscheidende Grössen am Lichtleiter sind die Durchmesser der Lichtleitereintrittsfenster und -austrittsfenster. Die Länge und Abwinkelung des Lichtleiters sind vernachlässigbar. Der Transmissionsverlust von 8% ist zum grössten Teil durch die Reflexion der beiden Fenster bedingt (WILLER 1982). Betrachten wir zunächst die Lichtleiter eines Gerätetyps, deren Eintritts-

und Austrittsfenster gleich gross sind. Als Beispiel eignen sich hier v.a. die vier Lichtleiter des Gerätetyps Coltolux 4. Mit zunehmendem Durchmesser der Eintrittsfenster nahm der Strahlungsfluss wie erwartet zu. Wäre die von der Halogenlampe emittierte Strahlung homogen auf der Kreisfläche im Fokus verteilt, so müssten die Strahlungsflussdichtewerte aller Lichtleiter eines Gerätetyps ohne Turbo-Effekt gleich sein, da Energiegewinn und Flächenzuwachs einander proportional sind. Dem war aber nicht so. Die Strahlungsflussdichte nahm mit zunehmendem Durchmesser ab. Aus diesem Grund kann die auf einen Kreis fokussierte Strahlungsenergie der Halogenreflektorlampe nicht homogen sein, sondern muss nach aussen hin abnehmen. Mit zunehmendem Durchmesser des Lichtleiter-eintrittsfensters wird zwar mehr Energie aufgenommen und der Strahlungsfluss erhöht, da dieser Energiegewinn sich aber nicht proportional zum Flächenzuwachs des Austrittsfensters verhält, wird die Strahlungsflussdichte kleiner.

Lichtleiter mit Turbo-Effekt wirken dem entgegen. Ein grosses Lichtleiter-eintrittsfenster koppelt den grössten Teil der Strahlungsenergie der Halogenreflektorlampe ein. Während des Durchganges durch den Lichtleiter verjüngt sich der Durchmesser. Die Emission der Strahlung erfolgt so durch ein kleineres Austrittsfenster und die Strahlungsflussdichte wird folglich erhöht. Die Resultate aller Turbolichtleiter bestätigen dies.

Diese Ausführungen zeigen, dass die erhaltenen Leistungswerte stark vom verwendeten Lichtleiter bzw. dessen Parametern abhängen. Ein Vergleich der Lichtleistung und eine daraus resultierende Beurteilung der Gerätetypen ohne Berücksichtigung der Lichtleitergrösse ist somit unmöglich.

Wurde für den Vergleich der verschiedenen Gerätetypen die Strahlungsflussdichte im Wellenlängenbereich des Nutzlichtes von 400 bis 520 nm betrachtet und nur Lichtleiter mit einem Durchmesser des Lichtleiteraustrittsfensters von grösser oder gleich 6 mm berücksichtigt, so zeigte sich folgendes Bild: Die beste Leistung zeigten die beiden Geräte Heliolux DLX und Optilux 500, ausgestattet mit Turbolichtleitern. Ihre Werte lagen über bzw. knapp unter 1000 mW/cm². Die Bestwerte der anderen Gerätetypen wurden alle mit Standardlichtleitern erreicht. Das Mittelfeld konnte in zwei Kategorien aufgeteilt werden. In der ersten Kategorie rangierte mit einer spezifischen Leistung von 719,2 mW/cm² als einziges Gerät Translux CL. In der zweiten, schwächeren Kategorie folgten Elipar Highlight, XL 3000, Acta, Polofil Lux und Cu-100 RLC mit Werten zwischen 500 und 600 mW/cm². Das untere Feld liess sich auch in zwei Kategorien aufteilen. Mit einer spezifischen Leistung zwischen 400 und 500 mW/cm² platzierten sich die Direktgeräte Coltolux 4, Polyflux 2 und Spectrum Plus, sowie die Leitergeräte Translux EC/ECS und Sirona C1 in der ersten Kategorie. Wenig überzeugte das Akkugerät ProLite mit einer Strahlungsflussdichte von 268,3 mW/cm² und nicht viel besser war mit 374,7 mW/cm² das Leitergerät Sirona C4. Sie rangierten in der zweiten Kategorie des unteren Feldes.

Lichtleistung in Relation zur Zeit

Vor dem Einschalten des Lichtpolymerisationsgerätes (bei Kaltstart) ist der Widerstand der Wendel bis zu 20fach niedriger als bei der Arbeitstemperatur. Mit zunehmender Erwärmung der Wendel steigt deren ohmscher Widerstand und somit fällt der Strom ab. Der stationäre Zustand wird aber nicht sofort erreicht, denn auch die Stromzuführungen tragen zum Gesamtwiderstand bei. Als Konsequenz dieses Sachverhaltes steigt der Strahlungsfluss kurz nach dem Einschalten der Lampe von null ausgehend zunächst über den stationären Wert an, um sich diesem dann asymptotisch zu nähern. Während der Einschaltphase steht

die Lampe deshalb unter zu hohem Strom. Dies erklärt den Zusammenhang zwischen Schalthäufigkeit und Lebensdauer. Dieser negative Einfluss des Einschaltstromes auf die Lebensdauer kann durch den Einbau eines Strombegrenzers vermieden werden. Durch diesen «Soft-Start» wird der Lampenstrom relativ langsam seinem Betriebswert angenähert, ohne die Lampe zu überbelasten. Des Weiteren hat sich der so genannte «Simmermodus» bewährt. In Dunkelphasen wird die Lampe von einem schwachen Dauerstrom, der ca. 10–20% des Nennstromes beträgt, durchflossen. So wird der thermische Haushalt weitgehend konstant gehalten und das Einschalten gestaltet sich lampenschonend (OSRAM 1994).

Analysiert man die erhaltenen Leistungsdiagramme, so zeichneten sich nur 2 Geräte durch einen lampenschonenden «Soft-Start» aus. Die Kurven der Geräte Heliolux DLX und Coltolux 4 erreichten erst am Ende eines 60-Sekunden-Zyklus langsam ihren Maximalwert. Alle anderen Geräte wiesen das starke initiale Strahlungsflussmaximum gefolgt von der asymptotischen Näherung an den stationären Wert auf (MOSELEY et al. 1986). Das Gerät Translux EC/ECS hatte den beschriebenen «Simmermodus» integriert. Im Vergleich zu anderen Geräten zeigte sich jedoch kein Unterschied und somit auch kein lampenschonender Einschaltvorgang.

Konzentriert man sich auf die ganze Serie der Belichtungsintervalle bei Geräten ohne Strombegrenzer, so reduzierte sich das starke initiale Maximum bei Kaltstart im Verlauf weiterer Belichtungsintervalle. Bei manchen Geräten zeigte sich ausserdem ein geringer Abfall der Lichtleistung im Verlauf der Zeit (MOSELEY et al. 1986). Wie oben erwähnt, dürfte der Grund hierfür in den durch die Erwärmung erhöhten Gesamtwiderständen der Halogenlampen liegen.

Strahlungsflussverteilung am Lichtleiteraustrittsfenster

Das durch das Lichtleiter-eintrittsfenster aufgenommene Licht wird auf dem Weg durch den Lichtleiter nicht verändert (SCHROEDER 1990). Dies bedeutet, dass die Energieverteilungen am Eintrittsfenster und am Austrittsfenster gleich sind. Bei Turbolichtleitern muss eine Veränderung der Austrittswinkel der Strahlen berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu normalen Lichtleitern, deren Eintrittswinkel der Strahlen am Eintrittsfenster auch den Austrittswinkel am Austrittsfenster entsprechen, verhalten sie sich beim Turbolichtleiter nicht gleich (SCHROEDER 1990). Für den Versuch spielte dies jedoch keine Rolle, da die Verteilung direkt auf der Oberfläche des Austrittsfensters gemessen wurde.

Unter Berücksichtigung dieser theoretischen Fakten können anhand der gewonnen Verteilungsmuster (Abb. 2) folgende generelle Aussagen gemacht werden: Das von der Halogenreflektorlampe emittierte und vom Blaufilter auf ein spezifisches Spektrum limitierte Licht zeigt in der Ebene des Lichtleiter-eintrittsfensters und am Austrittsfenster eine heterogene Verteilung. Diese Verteilung ist charakterisiert durch ein Intensitätsmaximum im Zentrum. Mit zunehmendem Radius nimmt die Intensität ab. Frühere Studien von McCabe (McCABE 1989) und Moseley (MOSELEY et al. 1986) bestätigen diese Aussagen. Mit zunehmendem Durchmesser des Lichtleiter-eintrittsfensters wird somit auch das Verteilungsmuster schlechter, unabhängig davon, wie sich die Flächen von Eintritts- und Austrittsfenster zueinander verhalten. Diese heterogene Verteilung zeigte sich ja schon anhand der gewonnenen Strahlungsfluss- und Strahlungsflussdichtewerte der verschiedenen Lichtleiter eines Gerätetyps. Beim Vergleich von Lichtleitern ohne Turbo-Effekt konnte kein direkter Zusammenhang zwischen Energie- und

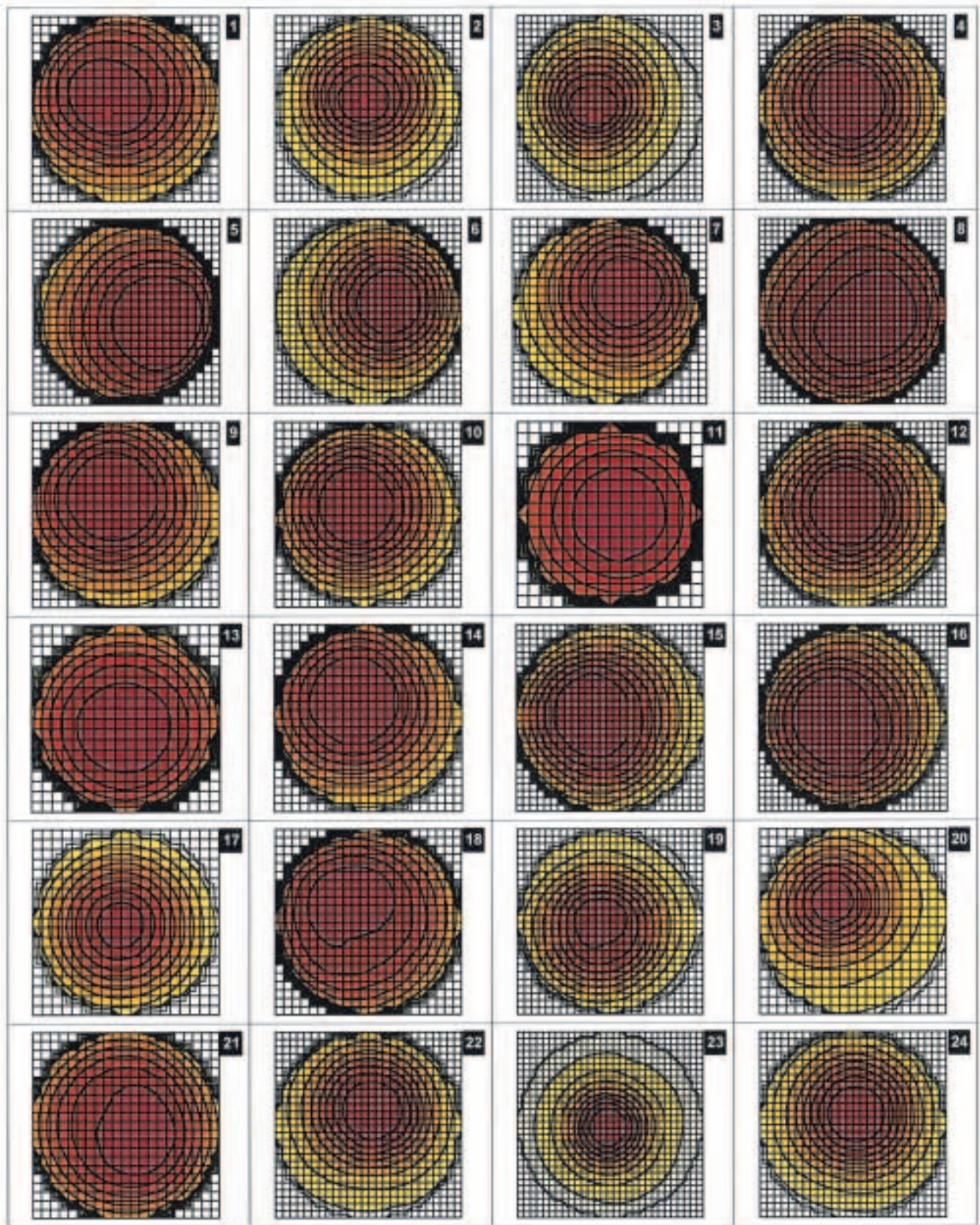
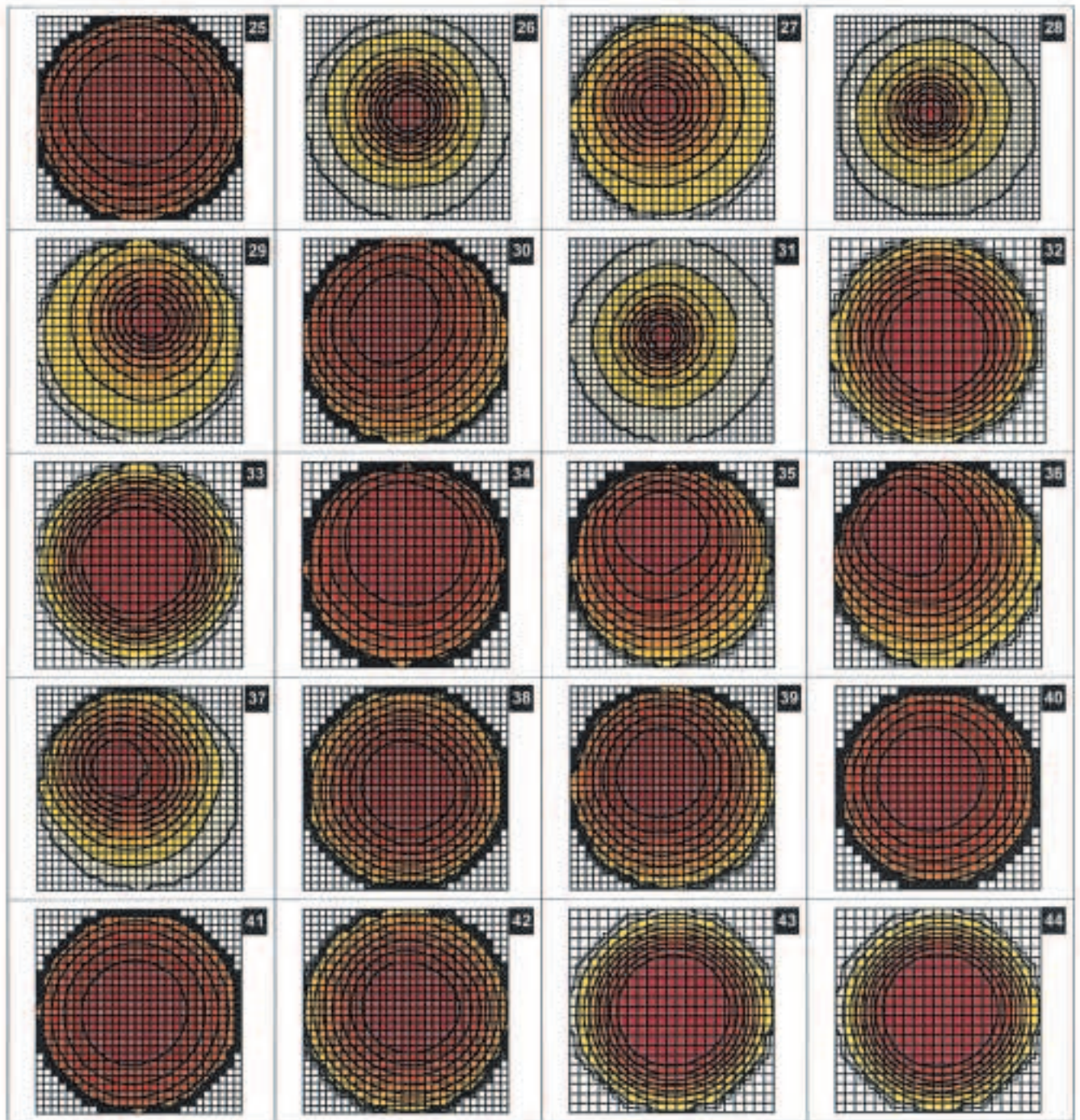


Abb.2 Strahlungsflussverteilung am Austrittsfenster der verschiedenen Lichtleiter (Legende in Abb. 2)

Fig.2 Répartition des flux lumineux au niveau de la fenêtre de sortie de la lumière, schémas des différents embouts testés (la numérotation correspond à celle du Fig. 2)



Flächenzuwachs gefunden werden. Die Strahlungsflussdichte verhielt sich umgekehrt zum Durchmesser des Lichtleiters. Zeigt sich die Anwendung des Turbo-Effektes in den Grössen Strahlungsfluss und Strahlungsflussdichte von Vorteil, so kann man nun den Nachteil erkennen: Aufgrund des grossen Eintrittsfensters ist die Energieverteilung am kleineren Austrittsfenster schlecht. Dies zeigte sich beim Vergleich der Energieverteilungen von Lichtleitern ohne und mit Turbo-Effekt eines Gerätetyps, deren Durchmesser der Austrittsfenster identisch waren. Im Weiteren waren die Verteilungsmuster der einzelnen Gerätetypen von Interesse. Der Vergleich der verschiedenen Gerätetypen zeigte starke Unterschiede in den Verteilungsmustern. Berücksichtigte man den Lichtleiterdurchmesser und verglich

nur Lichtleiter mit etwa gleichen Durchmessern, so zeigten einige Gerätetypen schon in geringem Abstand vom Zentrum einen starken Abfall der Intensität und somit eine schlechte Verteilung. Zu diesen Gerätetypen gehörten Acta, Spectrum Plus, ProLite und CU-100RLC. Im Gegensatz dazu zeigten die Verteilungsmuster der anderen Gerätetypen einen Leistungsabfall erst in den äusseren Randbezirken. Die Ursache für diese Verteilungsunterschiede zwischen den einzelnen Gerätetypen konnte nicht geklärt werden. Aus dem guten Abschneiden einiger Lampen kann aber gefolgert werden, dass eine gute Abstimmung der einzelnen Komponenten des optischen Systems zu relativ homogenen Verteilungsmustern führen kann.

Spannungsstabilisator

Verschiedene Studien (FAN et al. 1987, MARTIN et al. 1995, TAKAMIZU et al. 1988, WELTE 1992) haben die Abhängigkeit der Lichtleistung von der Netzspannung untersucht. Schwankungen der Netzspannung führen bei Geräten ohne eingebauten Spannungsstabilisator zu einer Änderung der Lichtleistung. Bei Unterspannung sinken, bei Überspannung steigen die Leistungswerte. In der Schweiz darf die Netzspannung nur innerhalb einer schmalen Spanne von 207 bis 244V variieren, bei einem Normwert von 230V. Die Resultate des Strahlungsflusses bei 207 und 244 V im Vergleich mit den bei 230 V gewonnenen Werten (Tab. IV) liessen leicht Rückschlüsse auf das Vorhandensein eines integrierten Spannungsstabilisators zu. Ohne Spannungsstabilisator fiel die Leistung bei 207V um 30 bis 35% der erwünschten Leistung ab. Im Gegensatz dazu erhöhte sie sich bei einer Spannung von 244V um 20 bis 25%. Solch grosse Abweichungen könnten durch den Einbau eines Spannungsstabilisators stark reduziert werden. Geräte mit eingebautem Spannungsstabilisator zeigten Schwankungen von maximal +/-5%. Ausnahmen waren die Geräte Elipar Highlight, CU-100RLC und Polylux Sirona C4. In ihren Prospekten wurde auf das Vorhandensein eines Spannungsstabilisators hingewiesen. Die Messresultate konnten diese Behauptung jedoch nicht bestätigen und zeigten starke Leistungsabweichungen bei 207 bzw. 244 Volt, die den Geräten ohne Spannungsstabilisator glichen. Zu diesen Geräten ohne Spannungsstabilisator gehörten die beiden Gerätetypen Heliolux DLX und Translux EC/ECS.

Radiometer

Eingebaute Radiometer kamen erst in den letzten Jahren auf den Markt und zählen leider noch nicht zur Standardausstattung eines Polymerisationsgerätes.

Die absoluten Messergebnisse der beiden digitalen Radiometer der Geräte Coltolux 4 und Optilux (Tab.V) konnten am Spectroradiometer nicht bestätigt werden. Dennoch zeigte sich im Laufe der Messreihe mit reduziertem Output bei beiden Geräte-

typen im Vergleich zum Spectroradiometer eine gute Korrelation (HANSEN & ASMUSSEN 1993), sodass die Messwerte keine absolute, aber eine relative Aussagekraft hatten. Im Gegensatz dazu lieferten die Angaben des Radiometers des Gerätetyps Acta (Tab.V) überhaupt keine Information. Wurde der von den Herstellern definierte Grenzwert bei 300 mW/cm² bzw. 80 Einheiten auf die eigenen Messungen umgerechnet, so zeigten die Geräte Coltolux 4 und Optilux 500 einen tatsächlichen Grenzwert von 70 bzw. 220 mW/cm², beim Gerätetyp Acta lag dieser Grenzwert bei 75 mW/cm². Bei diesen Messwerten musste jedoch berücksichtigt werden, dass der gemessene Wellenlängenbereich nach den Angaben der Hersteller gewählt wurde und deshalb von Gerätetyp zu Gerätetyp variierte. Wechselte man zu den Radiometern, die den Grenzwert mit einer Ampelanlage signalisierten, stellte man fest, dass auch hier die meisten Hersteller den Grenzwert auf 300 mW/cm² festlegten. Einzige Ausnahmen waren die Geräte Elipar Highlight und XL 3000. Sie ordneten den programmierten Grenzwerten keine absoluten Zahlen zu. Der Vergleich mit dem am Spectroradiometer gewonnenen Werten zeigte (Tab. VI), dass die Geräte Heliolux DLX und CU-100RLC den Grenzwert von 300 mW/cm² richtig festlegten, die Geräte Spectrum Plus und ProLite lagen mit Werten von 200 und 160 mW/cm² aber deutlich unter diesem Wert. Im Weiteren wiesen die Geräte Elipar Highlight und XL 3000 programmierte Grenzwerte von 115 bzw. 250 mW/cm² auf. Von einer einzigen Ausnahme abgesehen, zeigten alle 3 Radiometer eines Herstellers mit Grenzwertanzeige die gleichen Intensitätswerte. Die Gerätetypen mit digitalem Radiometer konnten mit dieser guten Übereinstimmung nicht konkurrieren. Mit Unterschieden von 10 bis 15% zeigten hier alle drei Gerätetypen Schwankungen innerhalb der Geräteserien.

Die integrierten Radiometer dienen zur Leistungskontrolle des Gerätes (DELLA VOLPE 1986) und signalisieren dem Anwender, wann die Leistung unter einen bestimmten Grenzwert gesunken ist. In diesem Moment muss der Anwender laut Hersteller einzelne Komponenten auf Verschleiss untersuchen, gegebenenfalls austauschen oder das Gerät zum Service einschicken. Entscheidender Faktor ist also der vom Hersteller fest program-

Tab. IV Leistungswerte bei verschiedenen Netzspannungen

Lampentyp		Strahlungsfluss im Integral 400-520 bei Netzspannung:			Vergleich mit der Nennspannung von 230 V in % des Referenzwertes bei	
		230V	207V	244V	207V	244V
Vivadent:	Heliolux DLX	318.1	212.1	400.3	66.7	125.8
Coltene:	Coltolux 4	190.8	179.2	198.6	93.9	104.1
Demetron/Kerr:	Optilux 500	389.7	376.2	379.8	96.5	97.5
Espe:	Elipar Highlight	353.4	239.6	310.5	67.8	87.9
3M:	XL 3000	194.5	184.5	186.9	94.9	96.1
Satelec:	Acta	192.7	195.7	192.7	101.5	100.0
Voco:	Polofil Lux	228.3	234.2	223.4	102.6	97.9
Dentsply DeTrey:	Spectrum Plus	215.9	222.1	220.1	102.9	101.9
Dentsply DeTrey:	ProLite	Akkugerät				
Kulzer:	Translux EC	159.9	111.9	196.4	70.0	122.8
Kulzer:	Translux CL	296.9	286.4	293.8	96.5	99.0
Degussa:	Degulux	189.6	189.8	187.3	100.1	98.8
Omnicent:	CU-100 RLC	263.6	168.8	308.7	64.0	117.1
Kavo:	PolyLUX2	271.6	272.0	264.8	100.2	97.5
Siemens:	Sirona C1	163.4	164.0	165.6	100.4	101.4
Siemens:	Sirona C4	144.2	94.8	149.8	65.7	103.9

Tab. V Digitale Radiometer

Lampentyp	Kodak Wratten Filter		Gemessenes spektrales Fenster	Einheit des integrierten Radiometer	Mit der Lampe des Gerätes 1 gemessene Werte am Radiometer			
	Typ	Reduktion des Output auf			des Gerätes 1	des Gerätes 2	des Gerätes 3	der Firma Macam in mW/cm ²
Coltène: Coltolux 4	keiner	100%	450 - 500nm	mW/cm ²	580	640	670	188.0
	0.1	80%	450 - 500nm	mW/cm ²	560	610	620	150.5
	0.2	63%	450 - 500nm	mW/cm ²	470	520	480	110.7
	0.3	50%	450 - 500nm	mW/cm ²	360	400	370	85.3
	0.4	40%	450 - 500nm	mW/cm ²	290	330	300	69.9
	0.5	32%	450 - 500nm	mW/cm ²	210	240	210	48.0
	0.6	25%	450 - 500nm	mW/cm ²	170	200	180	41.0
Demetron/Kerr: Optilux 500	keiner	100%	400 - 520nm	mW/cm ²	700	750	750	532.3
	0.1	80%	400 - 520nm	mW/cm ²	550	580	580	404.4
	0.2	63%	400 - 520nm	mW/cm ²	400	420	420	296.5
	0.3	50%	400 - 520nm	mW/cm ²	290	300	300	221.3
	0.4	40%	400 - 520nm	mW/cm ²	230	240	240	185.4
	0.5	32%	400 - 520nm	mW/cm ²	160	160	160	125.2
	0.6	25%	400 - 520nm	mW/cm ²	140	140	140	107.3
Satelec: Acta	keiner	100%	450 - 515nm	Anzeige 100-0	100	100	100	345.3
	0.1	80%	450 - 515nm	Anzeige 100-0	100	100	100	271.0
	0.2	63%	450 - 515nm	Anzeige 100-0	100	100	100	203.5
	0.3	50%	450 - 515nm	Anzeige 100-0	100	100	100	156.7
	0.4	40%	450 - 515nm	Anzeige 100-0	100	100	100	104.2
	0.5	32%	450 - 515nm	Anzeige 100-0	86	94	100	89.7
	0.6	25%	450 - 515nm	Anzeige 100-0	76	86	93	74.8

Tab. VI Analoge Radiometer

Lampentyp	Signalfarben	entsprechender Leistungsbereich	Kodak Wratten Filter		Gemessenes spektrales Fenster	Mit der Lampe des Gerätes 1 angezeigte Signalfarbe am Radiometer			Gemessene Werte am Spectroradiometer in mW/cm ²
			Typ	Reduktion des Output auf		des Gerätes 1	des Gerätes 2	des Gerätes 3	
Vivadent: HelioLux DLX	grün	>300mW/cm ²	0.3	50%	400 - 700nm	grün	grün	grün	359.11
	rot	<300mW/cm ²	0.4	40%	400 - 700nm	grün	rot	grün	295.96
			0.5	32%	400 - 700nm	rot	rot	rot	197.22
Espe: Elipar highlight	grün weiss	sichere Polymerisation nicht sichere "	0.6	25%	400 - 510nm	grün-weiss	grün-weiss	grün-weiss	114.58
3M: XL 3000	grün kein Signal	ausreichende Lichtintensität nicht ausreichende "	0.2	63%	400 - 500nm	grün	grün	grün	266.08
			0.3	50%	400 - 500nm	kein Signal	kein Signal	kein Signal	200.8
Dentsply DeTrey: Spectrum Plus	grün	>300mW/cm ²	0.3	50%	400 - 520nm	grün	grün	grün	185.57
	orange	150-300mW/cm ²	0.4	40%	400 - 520nm	orange	orange	orange	151.53
	rot	<150mW/cm ²	0.5	32%	400 - 520nm	orange	orange	orange	104.76
			0.6	25%	400 - 520nm	rot	rot	rot	88.48
Dentsply DeTrey: ProLite	grün	>300mW/cm ²	0.1	80%	400 - 520nm	grün	grün	grün	219.25
	orange	150-300mW/cm ²	0.2	63%	400 - 520nm	orange	orange	orange	166.87
	rot	<150mW/cm ²	0.3	50%	400 - 520nm	orange	orange	orange	101.02
			0.4	40%	400 - 520nm	orange	orange	orange	69.22
			0.5	32%	400 - 520nm	rot	rot	rot	37.69
Omnident: CU-100 RLC	grün	>300mW/cm ²	0.1	80%	400 - 500nm	grün	grün	grün	244.42
	grün/orange	200-300mW/cm ²	0.2	63%	400 - 500nm	grün/orange	grün/orange	grün/orange	181.57
	orange	<200mW/cm ²	0.3	50%	400 - 500nm	orange	orange	orange	152.21
			0.4	40%	400 - 500nm	orange	orange	orange	

mierte (Grenzwertanzeige) oder angegebene (Digitale Anzeige) Grenzwert. Diese Grenzwerte liegen aber in vielen Fällen deutlich zu tief (MANGA et al. 1995).

Es stellt sich die Frage, warum die Messwerte der integrierten Radiometer in einzelnen Fällen so stark von den Sollwerten, ermittelt am Spectroradiometer, abweichen. Die Antwort liegt in der unterschiedlichen Messmethode. Am Spectroradiometer wird die gesamte, vom Lichtleiteraustrittsfenster emittierte Energie erfasst und als Strahlungsfluss gemessen. Die Strahlungsflussdichte, daraus rein rechnerisch ermittelt, ergibt so einen Durchschnittswert über die gesamte Fläche des Lichtleiteraustrittsfensters. Im Gegensatz dazu wird bei den meisten integrierten Radiometern nicht der Strahlungsfluss des ganzen Austrittsfensters erfasst. Entscheidender Faktor ist das Verhältnis der Fläche des Messensors zur Fläche des Lichtleiteraustrittsfensters des Standardlichtleiters (SHORTALL et al. 1995). Ist die Apertur des Messfensters im Vergleich zum Austrittsfenster

relativ klein, wird nur der Intensitätspeak im Zentrum des Austrittsfensters berücksichtigt und so eine hohe Strahlungsflussdichte gemessen. Stimmen die Flächen von Messfenster und Austrittsfenster in etwa überein, so wird der Durchschnitt der Strahlungsflussdichte über das ganze Austrittsfenster ermittelt und die Werte sollten etwa den Werten des Spectroradiometers entsprechen.

Timercheck

Moseley (MOSELEY et al. 1986) berichtete bei der Kontrolle der eingebauten Timer von Abweichungen bis zu 20%. Diese Messergebnisse konnten nicht mehr bestätigt werden. Die Resultate zeigten Abweichungen von maximal 2 Sekunden bei einer Intervalldauer von 60 Sekunden an nur 3 Gerätetypen. Aus diesem Grund kann dem Timer, der die Intervalldauer kontrolliert, bei allen Gerätetypen Vertrauen geschenkt werden.

Kühlventilator

Das Schutzelement gegen Überhitzung konnte in vier Fällen, trotz Dauerbetriebes während einer Stunde, nicht ausgelöst werden. Zu diesen Geräten zählten Heliolux DLX, Optilux 500, XL 3000 und Spectrum Plus. Beim Akkugerät ProLite fand nach 18-minütigem Dauerbetrieb eine automatische Abschaltung statt, aber nicht aus Gründen der Überhitzung, sondern weil die Batterie leer war. Alle anderen Geräte schalteten nach einem Dauerbetrieb von minimal 4 Minuten und maximal 32,5 Minuten automatisch ab. Setzt man die Grenze des minimalen Dauerbetriebes auf 6 Minuten fest, was der Zementierung eines adhäsiven Werkstückes entspricht, so erfüllten 3 Geräte mit Abschaltzeiten unter 6 Minuten dieses Kriterium nicht. Zu diesen Geräten zählten Coltolux 4, Acta und Degulux. So unterschiedlich die Zeiten bis zur automatischen Abschaltung, so unterschiedlich waren auch die Zeiten, bis ein erneuter Start möglich war. Die Erholungszeiten lagen zwischen 1 und 28,5 Minuten. Dabei zeigte sich in den meisten Fällen, dass die Dauer bis zum erneuten Einsetzen und die Erholungszeitdauer miteinander korrelierten. Schaltete sich der Schutz nach relativ kurzer Betriebsdauer ein, so war das Gerät auch schnell wieder einsatzbereit.

Die Resultate der Lärmemissionsmessungen zeigten unterschiedliche Rangierungen in den beiden gemessenen Frequenzbereichen. Dies sprach für unterschiedliche Schalldruckpegelverteilungen der Gerätetypen über den Frequenzbereich. Aufgrund der beiden definierten Frequenzbereiche deuten viel höhere Werte im Frequenzbereich C als im Frequenzbereich A auf einen tiefen, vom menschlichen Ohr als angenehm empfundenen Ton hin. Sind die Werte der beiden Frequenzbereiche jedoch fast gleich gross, spricht dies für einen hohen, eher als lästig empfundenen Ton. Aus diesem Grund sollte vor allem der Messwert im Frequenzbereich A als Referenz dienen. Die Messwerte in diesem Frequenzbereich zeigten dann auch, dass die meisten Geräte einen Schallpegel von 45 bis 50 dB aufwiesen. Darüber lagen mit Schallpegelwerten um 55 dB nur die Geräte Coltolux 4, Optilux 500 und Polylix 2 und als Spitzenreiter mit einem Wert von über 60 dB das Gerät Translux CL. Auffallend war dabei die Korrelation zwischen Grösse der Nennleistung der Halogenlampe dieser Direktgeräte und dem gemessenen Schallpegelwert. Ob es sich hierbei um eine Folge des erhöhten Kühlbedarfs von Halogenlampen mit höherer Nennleistung handelte, kann nur vermutet werden. Inwieweit diese Werte unter oder über der Grenze der Zumutbarkeit lagen, ist noch nicht definiert worden, da einheitliche Normen über Lichtpolymerisationsgeräte fehlen.

Schlussfolgerungen

Werden ausschliesslich Halogenlichtquellen in Betracht gezogen, dann ist das Gerät der Wahl ein Direktgerät. Direktgeräte zeigen gegenüber Leitergeräten erhebliche Leistungsvorteile. Die Nennleistung ihrer Halogenlichtquellen sollte jedoch bei mindestens 75 Watt liegen. Aus diesem Grund können akkubetriebene Geräte auch nicht überzeugen. Neben der Nennleistung der Halogenlampe spielen jedoch noch Reflektor, Filter und Lichtleiter eine wichtige Rolle, sodass die spezifische Leistung als ein Endresultat vieler Faktoren anzusehen ist. Für die Leistung scheint die Anordnung und Abstimmung der einzelnen Komponenten dieses komplexen optischen Systems zueinander entscheidend. Durch optimalen Strahlengang kann auf der ei-

nen Seite die Leistung maximiert, auf der anderen Seite die Verteilung am Lichtleiteraustrittsfenster homogenisiert werden.

Für den Durchmesser von Lichtleitern müssen Kompromisse gemacht werden. Zu grosse Durchmesser am Lichtleitereintrittsfenster resultieren in einer kleinen Strahlungsflussdichte, die sich zudem sehr heterogen über das Lichtleiteraustrittsfenster verteilt. Zu kleine Durchmesser leiten nur wenig Energie zum Werkstück. Durchmesser im Bereich der Standardlichtleiter von 6 bis 8 mm müssen deshalb bevorzugt werden, möchte man eine möglichst homogene Energieverteilung und hohe Werte für Strahlungsfluss und -dichte erzielen. Lichtleiter mit Turboeffekt versuchen die Vorteile von kleinem und grossem Lichtleiter in sich zu vereinen. Es können sowohl hohe Strahlungsfluss- als auch hohe Strahlungsflussdichtewerte erzielt werden. Einziger Nachteil ist die schlechte Energieverteilung am Lichtleiteraustrittsfenster.

Zu den essentiellen Ausrüstungsfeatures eines Lichtpolymerisationsgerätes gehören Spannungsstabilisator, Timer und Radiometer. Einige der Geräte hatten keinen oder aber nur ungenügende Spannungsstabilisatoren integriert. Ein Einbau bzw. Austausch von Spannungsstabilisatoren wäre in diesen Fällen sinnvoll. Im Gegensatz dazu werden die eingebauten Timer ihren Aufgaben vollauf gerecht. Die programmierten oder aber angegebenen Leistungsgrenzwerte der Radiometer sind generell zu tief, sodass erst ein zu starker Leistungsabfall detektiert und allenfalls korrigiert werden kann. Der Einbau eines Strom-Begrenzers zur Schonung der Halogenlampe beim Start scheint ratsam, möchte man die Lebensdauer der Halogenlampe verlängern. All die anderen möglichen Ausrüstungsfeatures wie Displays, Timervarianten etc. bedürfen einer persönlichen Überprüfung und Bewertung, um über die Zweckmässigkeit zu entscheiden.

Leistung und Gerätekomponenten von Lichtpolymerisationsgeräten zeigten grosse Variationen. Um allgemein gültige Standards zu schaffen, wäre es sinnvoll, Richtlinien zu erarbeiten und in Normen zusammenzufassen. Im Weiteren sollten die Leistungsanforderungen an Lichtpolymerisationsgeräte für die verschiedenen Restaurationstypen definiert werden, um das Anwendungsspektrum jedes Gerätes genau festlegen und gegebenenfalls einschränken zu können.

Verdankung

Die Autoren danken der Schweizerischen Zahnärztesellschaft für die grosszügige Unterstützung der Forschungsarbeit (SSO Fonds, Gesuch Nr. 188).

Summary

In this study 16 different light curing units, available on the Swiss market, were tested for their features, radiant power and light distribution across the face of the curing tip and components like integrated radiometer, timer and cooling device. The basis of this study was the test protocol published in the november edition (11/1999).

The features of the light curing units differed from one another. The Optilux® 500 had all conceivable features that it could be designated the standard in features. If all these technical options are necessary has to be decided by the consumer. However, the components such as the timer, radiometer and voltage stabilizer are important because they influence the time of irradiation and the radiant power.

The radiant power (mW) i.e., the radiance (mW/cm²) were measured in 2 spectral areas which are important for visible light polymerisation. The absolute values for the standard curing tip at

a voltage of 230V lay between 143,4 and 389,7 mW for the wavelengths between 400–520 nm and between 17,7 and 41,8 mW for the wavelengths between 462–472 nm. The resultant specific radiance values were between 268,3 and 862,6 mW/cm² in the broad spectrum of 400–520 nm and 33,5 and 95,4 mW/cm² in the narrow spectrum of 462–472 nm. Where the standard curing tips were replaced by guides with other diameters, tips with larger entrances showed more radiant power, light guides with smaller exits also showed more radiance. Turbo tips have larger entrances than exits and therefore combine both positive effects.

The intensity wasn't distributed equally across the face of the curing light guide. Characteristically there was a concentric distribution of the intensity, with the maximum found in the centre and a decrease to the margin. Corresponding to the radiance values, curing light tips with decreasing diameters showed more homogeneous distribution patterns. Only Turbo tips showed worse distribution.

Comparing the light intensity at a voltage of 207V and 244V to the normal voltage of 230V it was found that not all curing units had an integrated voltage stabilizer.

Just 9 out of the 16 tested units had an integrated radiometer. Comparison of the evaluated radiance values to the values given by the integrated radiometer revealed an agreement in just two cases. The marginal values, programmed by the manufacturer varied between 70 and 300 mw/cm² and lie therefore, too low.

Résumé

Dans le travail présenté, 16 lampes à polymériser différentes du marché suisse ont été testées par rapport à leur équipement, leur puissance, la répartition du flux lumineux à la sortie de la lampe, ainsi que pour les éléments intégrés tel que radiomètre, timer et ventilateur. Le protocole d'étude présenté dans la première partie de cette publication (11/1999) a servi de base théorique et pratique pour ces tests.

L'équipement des appareils a varié considérablement d'un type de lampe à un autre. L'appareil Optilux 500 proposait tous les accessoires possibles et imaginables, si bien qu'il peut être considéré comme référence en la matière. Le soin est laissé à l'utilisateur de savoir si toute ces options sont indispensables. Toutefois, un timer, un radiomètre et un stabilisateur de courant peuvent être considérés comme accessoires importants, car ils peuvent influencer la durée et l'intensité du rayonnement lumineux.

Le flux et la densité du rayonnement ont été mesurés respectivement en milliwatt et milliwatt par cm² dans deux longueurs d'ondes importantes pour la polymérisation. Les valeurs absolues, avec un embout standard et avec un courant de 230 V, se situaient entre 143,4 mW et 389,7 mW pour une longueur d'onde de 400 à 520 nm et entre 17,7 mW et 41,8 mW pour une longueur d'onde comprise entre 462 et 472 nm. Les performances spécifiques résultantes de ces mesures étaient comprises entre 268,3 mW/cm² et 862,6 mW/cm² pour une longueur d'onde de 400 à 520 nm et entre 33,5 mW/cm² et 95,4 mW/cm² pour une longueur d'onde de 462 à 472 nm. Les embouts qui possédaient la plus grande «fenêtre d'entrée» ont montré la plus grande performance absolue alors que la plus petite «fenêtre de sortie» produisait la plus grande performance spécifique. Les embouts «turbo» possèdent à la fois une grande «fenêtre d'entrée» et une petite «fenêtre de sortie» et cumulent, par conséquent, les deux avantages susmentionnés.

La répartition de l'énergie à la sortie des embouts n'était pas régulière. L'intensité était maximale au centre et diminuait lorsque

le point de mesure s'éloignait du centre. Cette répartition devenait plus homogène lors de la réduction du diamètre de l'embout. Uniquement les embouts «turbo» ont présenté un diagramme de répartition d'énergie plus mauvais.

En faisant varier la tension électrique de 230 V à 207 V, resp. 244 V et en comparant les performances, il a été constaté que tous les appareils n'étaient pas munis d'un stabilisateur de courant intégré.

Seul 9 des 16 appareils testés possédaient un radiomètre intégré. La comparaison des mesures spécifiques enregistrées avec les valeurs indiquées par les radiomètres intégrés n'ont donné des valeurs identiques que dans 2 cas. Les valeurs limites programmées par les constructeurs variaient entre 70 mw/cm² et 300 mw/cm² et se trouvaient, par conséquent, nettement en dessous des valeurs recommandées.

Literaturverzeichnis

- BARGHI N, BERRY T, HAITON C: Evaluating intensity output of curing lights in private dental offices. *J Am Dent Assoc* 125: 992–996 (1994)
- CURTIS JW, RUEGGEBERG FA, LEE AJ: Curing efficiency of the turbo tip. *Gen Dent* 43: 428–433 (1995)
- DELLA VOLPE M: Neue Messapparate zur Kontrolle von Halogenlichtpolymerisationslampen. *Swiss Dent* 7: 29–32 (1986)
- ERNST C-P, SCHAUER F, WILLERSHAUSEN B R H: Leistungsvergleich von Lichtpolymerisationsgeräten (I). *Acta Med Dent Helv* 1: 58–63 (1996)
- FAN P L, WAYNE T W, REYES W D, STANFORD J W: Irradiance of visible light-curing units and voltage variation effects. *J Am Dent Assoc* 115: 442–445 (1987)
- FOWLER C S, SWARTZ M L, MOORE B K: Efficacy Testing of Visible-Light-curing Units. *Oper Dent* 19: 47–52 (1994)
- HANSEN E K, ASMUSSEN E: Reliability of three dental radiometers. *Scand J Dent Res* 101: 115–119 (1993)
- HOTZ P R, PETER S B, THOMANN H, LUSSI A: Durchhärtungsleistung von Polymerisationslampen für Kompositmaterialien. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 99: 1122–1126 (1989)
- KULLMANN W: Emissionsspektren und Oberflächenhärtungsmuster von 35 verschiedenen Photopolymerisationsgeräten. *ZWR* 96: 320–330 (1987)
- LEE S-Y, CHIU C-H, BOGHOSIAN A, GREENER E H: Radiometric and spectroradiometric comparison of power outputs of five visible light-curing units. *J Dent* 21: 373–377 (1993)
- LUTZ F, KREJCI I, FRISCHKNECHT A: Lichtpolymerisationsgeräte. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 102: 565–572 (1992)
- MANGA R K, CHARLTON D G, WAKEFIELD C W: In vitro evaluation of a curing radiometer as a predictor of polymerization depth. *Gen Dent* 43: 241–243 (1995)
- MARTIN N, JEDYNAKIEWICZ N M: Quality aspects of light-activation technology. *Eur Dent* 4: 8–10 (1995)
- MCCABE J F: Output from Visible-light Activation Units and Depth of Cure of Light-activated Composites. *J Dent Res* 68: 1534–1539 (1989)
- MEHL A, HICKEL R, KUNZELMANN K-H: Physical properties and gap formation of light-cured composites with and without "softstart-polymerization". *J Dent* 25: 321–330 (1997)
- MOSELEY H, STRANG R, STEPHEN K W: An assessment of visible-light polymerizing sources. *J Oral Rehabil* 13: 215–224 (1986)
- NOMOTO R, UCHIDA K, HIRASAWA T: Effect of Light Intensity on Polymerization of Light-cured Composite Resins. *Dent Mater J* 13(2): 198–205 (1994)

- OSRAM: Halogen-Niedervoltglühlampen. Firmendokumentation 122 W99D 7/94: (1994)
- PEUTZFELDT A: Correlation between recordings obtained with a light-intensity tester and degree of conversion of a light-curing resin. *Scand J Dent Res* 102: 73–75 (1994)
- PIRES J A, CVITKO E, DENEHY G E, SWIFT E J: Effects of curing tip distance on light intensity and composite resin microhardness. *Quintessence Int* 24: 517–521 (1993)
- RUEGGEBERG F A, CAUGHMAN W F, CURTIS J W: Effect of Light Intensity and Exposure Duration on Cure of Resin Composite. *Oper Dent* 19: 26–32 (1994)
- RUEGGEBERG F A, WYATT F, CURTIS J W, DAVIS H C: Factors affecting cure at depths within light-activated resin composites. *Am J Dent* 6: 91–95 (1993)
- SCHROEDER G: Technische Optik. 7. Auflage. Vogel, Würzburg, pp 105–109 (1990)
- SHORTALL A C, HARRINGTON E, WILSON H J: Light curing unit effectiveness assessed by dental radiometers. *J Dent* 23: 227–232 (1995)
- TAKAMIZU M, MOORE B K, SETCOS J C, PHILLIPS R W: Efficacy of Visible-light Generators with Changes in Voltage. *Oper Dent* 13: 173–180 (1988)
- THORMANN J: Typenprüfung von Lichtpolymerisationsgeräten I: Prüfungsprotokoll. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 109: 1191–1197 (1999)
- TSCHUPP R M K: Einfluss der Polymerisationsschrumpfung auf die marginale Adaptation von Seitenzahnrestaurationen vor und nach Belastung. *Zahnmed Diss* (1996)
- UNTERBRINK G L, MUESSNER R: Influence of light intensity on two restorative systems. *J Dent* 23: 183–189 (1995)
- WELTE C H: Absolute Nutzleistung von Kompositlampen & Aushärtung von Komposit und Dualzementen unter verschiedenen Bedingungen in vitro. *Zahnmed Diss, Zürich* (1992)
- WILLER J: Lichtleitsysteme in der Zahnmedizin. *Quintessenz* 6: 1261–1267 (1982)
- WOJTEK R, WERNISCH J, WIEDERSCHWINGER H: Vergleichende Untersuchungen hinsichtlich Aushärtezeit an lichthärtenden Kompositen. *Z Stomatol* 90: 187–201 (1993)