

# Analyse der chemischen und physikalischen Auswirkungen von UV-Strahlung auf Kochemissionen

F.M. (Tim) Farrell

*Unabhängiger Berater, Saint Paul, Minnesota, USA*

Thomas M. Fitch

*Aveka, Inc., Woodbury, Minnesota, USA*

Merlin K.L. Bicking

*ACCTA, Inc., Saint Paul, Minnesota, USA*

## ABSTRACT

Die auf Kochemissionen zurückgehenden Gesundheits- und Brandrisiken sowie die dadurch verursachte Luftverschmutzung finden zunehmend Anerkennung. In neueren Untersuchungen wurden die Stoffe analysiert, die beim Kochen freigesetzt werden. Ein Teil der Emissionen wird im Absaugsystem abgeschieden. Der Rest entweicht in die Umgebungsluft. Der Auslass des Absaugsystems ist eine Schnittstelle, davor ist der Gebäudeigner bzw. Küchenbetreiber von den Auswirkungen betroffen, danach belasten die Verunreinigungen die Außenluft. Seit langem verpflichten Bauvorschriften die Betreiber zur Behandlung der Abluft vor der Schnittstelle. Neuere Regelungen legen fest, welche Stoffe der Küchenabluft in der Umwelt freigesetzt werden dürfen. Die Industrie begegnet dieser Herausforderung mit Produktinnovationen. Viele dieser Innovationen basieren auf den neueren Erkenntnissen über Kochemissionen, aber längst nicht alle. Dieser Aufsatz geht den angeblichen Vorteilen von verbesserten Filtern und Ultraviolett-Lampen (UVC) in Küchenhauben auf den Grund. UV-Hauben, so wird behauptet, verringern Emissionen durch

einen zweistufigen Reinigungsprozess: verbesserte Filter erfassen mehr Emissionen und UVC-Photonen und Ozon sorgen für die Fotozersetzung und Oxidation der verbleibenden fettthaltigen Bestandteile. Eine Dunstabzugshaube mit UV-Lampen kostet mindestens doppelt so viel wie eine gleichwertige Haube ohne UV-System. Es besteht kein Zweifel daran, dass UV-Hauben Emissionen bis zu einem gewissen Grad verringern. Die entscheidende Frage ist jedoch, ob die bessere Leistung dieser Hauben den UV-Lampen oder den relativ preisgünstigen verbesserten Filtern zuzuschreiben ist. In Versuchen wurden für Kochemissionen typische Ölsäureaerosole mit UVC-Strahlen und Ozon behandelt. Die Ozonkonzentration war höher und die Einwirkzeit länger als in einer UV-Haube. Die Partikelgrößen und die chemischen Veränderungen wurden an unterschiedlichen Proben gemessen, die einmal mit und einmal ohne UV-Einwirkung genommen wurden. Die Ergebnisse zeigten deutlich, dass nur geringfügige Änderungen auftreten und, dass die stärkste Emissionsreduzierung durch bessere Filtration erreicht wird, nicht durch UV-Behandlung. Daraus kann man schließen, dass UV-Hauben nicht die Leistung erbringen, die ihnen zugeschrieben wird und nicht gebundenes Ozon trägt zu höherer Luftverschmutzung bei.

## AUSWIRKUNGEN

Die Emissionen gewerblicher Küchen sind je nach Standort problematisch, da sie Gerüche, Feinstaub und flüchtige organische Verbindungen (VOC) enthalten. Richtlinien zur Luftreinheit fordern zunehmend die Reduzierung von Emissionen. Ein Innovationsversuch in dieser Hinsicht ist die Bestückung von Dunstabzugshauben mit verbesserten Filtern und UV-Lampen. UV-Strahlung und das begleitende Ozon sollen den Großteil der freigesetzten organischen Stoffe durch Fotozersetzung und Oxidation in kleinere Bestandteile umwandeln. Versuche mit einem repräsentativen Emissionsbestandteil zeigen, dass UV-Strahlung nur unerhebliche Auswirkungen auf die Menge und Zusammensetzung der Emissionen hat, während die relativ preisgünstigen verbesserten Filter eigentlich verantwortlich für die Verringerung der Emissionen sind. Außerdem verschmutzt das von den Lampen freigesetzte unverbrauchte Ozon die Luft zusätzlich.

## EINLEITUNG

Kochemissionen gibt es seit unsere Vorfahren mit Feuer kochen. Emissionskontrolle ist in bestimmten Situationen jedoch zunehmend gefordert. Kontrollverfahren wurden über Jahrtausende entwickelt, doch die entscheidenden Durchbrüche gelangen erst in den letzten Jahrzehnten. Die Haupttreiber für Innovationen in der gewerblichen Küchenlüftung sind seit jeher Brandschutz-, Hygiene- und Arbeitsschutzanforderungen. Insbesondere aktive Brandunterdrückungssysteme, energieeffiziente Formgebung und Bedienung, automatische Haubenreinigung und höherer Arbeitskomfort für das Küchenpersonal wurden von der Küchenlüftungsindustrie in diesem Zusammenhang eingeführt. Es ist jedoch ganz offensichtlich, dass sich weitere Entwicklungen auf die

Probleme mit fetthaltigen Emissionen und die daraus entstehenden Kosten konzentrieren sollten.

In neueren Studien wurden die Schadstoffe gemessen, die bei der Zubereitung verschiedener Lebensmittel auf unterschiedlichen Geräten freigesetzt werden.<sup>1-4</sup> Dabei standen Fleisch und Fisch im Vordergrund, da bei der Zubereitung dieser stark fetthaltigen Speisen entscheidende Mengen an Fett in Form von Aerosolen und Dämpfen freigesetzt werden, die Brand-, Hygiene- und Gesundheitsrisiken erhöhen. Einige der freigesetzten feststoff- und flüssigkeitshaltigen Aerosole werden im Abluftsystem abgeschieden, während die restlichen Aerosole und nicht kondensierten Dämpfe in die Außenluft entweichen.<sup>5</sup>

In der Mehrheit der Fälle sind drei Parteien von diesem Problem betroffen, der Betreiber der Küche, der Gebäudeeigentümer und die Öffentlichkeit. Der Auslass des Küchenlüftungssystems, normalerweise der Abluftventilator, ist eine entscheidende Schnittstelle. Vor dem Ventilator (in Richtung der Küchengeräte) betreffen die Emissionen und die verbundenen Risiken den Betreiber und den Gebäudeeigentümer. Die Öffentlichkeit ist betroffen, sobald die Emissionen ins Freie gelangen. Regelungen<sup>6,7</sup>, die Rauch, Fett und Gerüche in der Küchenabluft als Problem anerkennen, wurden erlassen und in der Rechtsprechung bestätigt. Dieser Aufsatz betrachtet in erster Linie das Küchenabluftsystem bis zur Schnittstelle, allerdings werden wir auch auf das öffentliche Interesse im Zusammenhang mit der Beschaffenheit der Emissionen eingehen, die diese Schnittstelle passieren.

#### **Ansätze zur Emissionskontrolle in der Küchenabluft**

**Physikalischer Ansatz.** Filtration ist die älteste und am weitesten verbreitete Methode zur Abluftkontrolle in gewerblichen Küchenlüftungen. **Vier physikalische Vorgänge** wirken auf feste und flüssige Partikel ein, also auch auf die Stoffe in Kochemissionen<sup>8</sup>: **(1) Absinken durch Schwerkraft, (2) Aufprallen, (3) Abfangen und (4) Diffusion.** Durch das schwerkraftbedingte Absinken fallen viele freigesetzte Schadstoffe aus dem thermischen Luftstrom heraus, bevor sie die Filter erreichen. Die anderen drei Vorgänge wirken auf feste und flüssige Teilchen in den Filtern ein bzw. durch den Luftausgleich im Abluftsystem einschließlich dem Haubenraum, Abluftkanal und Abluftventilator. **Es findet außerdem heterogene Kondensation von Dampf auf Partikeln** und den Abluftsystemkomponenten statt.

Gängige Bauvorschriften und Normen, wie der International Mechanical Code (IMC) und die Norm 96 der National Fire Protection Association (NFPA), fordern bestimmte Filter für Hauben vom Typ 1 (für Fett und Rauch). Die in den meisten Hauben eingebauten Filter sind üblicherweise einstufige Prallblechfilter, die vor allem die Brandschutznormen der Underwriters Laboratories Inc. (UL) erfüllen.<sup>9,10</sup>

Im letzten Jahrhundert wusste man wenig darüber, wie effizient Filter in Bezug auf die Menge an Koch-

emissionen sind, aber es war klar, dass nur ein Teil der Emissionen erfasst wird. Die American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) und die Küchenlüftungsindustrie nahmen sich des Problems eines fehlenden Filterleistungstests an und förderten die Entwicklung eines Standards zur Prüfung der Erfassungseffizienz durch die American Society for Testing and Materials (ASTM).<sup>11</sup> Diese Norm wurde 2005 veröffentlicht.<sup>12</sup> Die Erkenntnis, dass eine Norm erforderlich war und deren Einführung beschleunigten Innovationen im Filterbereich und so erschienen verbesserte ein- und mehrstufige Filter vor Kurzem auf dem Markt.<sup>13,14</sup>

**Chemischer Ansatz.** Seit etwa zehn Jahren werden sogenannte UV-Hauben angeboten. Sie sind hinter den Filtern mit UV-Lampen bestückt. Die Lampen geben eine Strahlung mit der Wellenlänge  $\lambda$  ab (100 – 280 nm) und erzeugen Ozon. Es handelt sich hier um einen interessanten Versuch, mit chemischen Reaktionen die Risiken fetthaltiger Emissionen und die damit verbundenen Kosten zu reduzieren. Die Reaktion von UVC-Photonen und Ozon mit den fetthaltigen Substanzen in der Abluft, die von den Filtern nicht erfasst wurden, wird als Argument für UV-Hauben angeführt. **Es wird davon ausgegangen, dass eine kurze Einwirkung der UV-Strahlung und eine etwas längere Einwirkung von Ozon einen Teil der großen Moleküle im Emissionsstrom aufbrechen bzw. kleinere Moleküle komplett oxidieren.** Durch die Bestückung mit UV wird die Ablufthaube vom Lüftungsgerät zum chemischen Reaktor. Dieser Reaktor soll in einem schnell fließenden Abluftstrom einen signifikanten Anteil der relativ großen organischen Bestandteile bei relativ niedrigen Temperaturen (unter 200 °F (93 °C)) abbauen können. Feuer kann das natürlich, aber bei weit höheren Temperaturen. Diese Fähigkeit wird von der Fachliteratur sowohl angeführt<sup>15</sup> als auch bestritten<sup>16</sup>, aber es gibt nur wenig experimentelle Daten, um die Thesen zu untermauern.

*Entwicklung von UV-Systemen von der erkannten Wirkung bis zum Einsatz in Küchenlüftungen.* UV-Licht nimmt mittlerweile einen bedeutenden Stellenwert im Heizungs-, Klima- und Lüftungsbereich (HKL) ein. Es wird in großer Bandbreite im Gesundheitswesen, der Lebensmittelverarbeitung und anderen biosensitiven Anwendungen eingesetzt, um Krankheitserreger in Räumen, an Arbeitsplätzen oder in ganzen Gebäuden abzutöten oder ihre Anzahl entscheidend zu verringern. **Die Wirksamkeit in Bezug auf die Abtötung von Keimen wurde ausführlich getestet und überprüft.<sup>17</sup> UV-Strahlung kann diese Aufgabe erfüllen, weil sie einfach den genetischen Code der abzutötenden Krankheitserreger verändert und dadurch die Reproduktion verhindert. Die zum Auslösen dieser Prozesse erforderliche Energie und Einwirkzeit ist ausreichend und weitere, komplexere chemische Reaktionen sind nicht erforderlich.**

Unsicherheit in Bezug auf die UV-Effizienz. UV-Hauben nach UL Standard 710 müssen mit flammendurchschlagssicheren Filtern gemäß der Klassifikation nach UL Standard 1046 ausgerüstet sein. Erhältliche UV-Hauben sind in der Regel mit zwei Filterstufen bestückt, wobei die zweite Filterstufe Fettpartikel erfasst, die nicht in der ersten Stufe abgeschieden wurden. Solche Nachfilter können in geeigneter Auslegung die Fettmenge, die in den Haubenraum gelangt, entscheidend reduzieren. Weniger Fett in kleineren Partikeln verringert die Ablagerungen in der Haube und den Abluftkanälen unabhängig von einer UV-Behandlung.

Der letzte Punkt wirft daher im Zusammenhang mit UV-Hauben eine zentrale Frage auf, nämlich, welcher Anteil der Fettreduzierung dem UV-System und welcher den verbesserten Filtern zuzuschreiben ist? Diese Frage ist von großer Bedeutung in Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit und die Maßnahmen der öffentlichen Hand, denn die Bestückung einer Abzugshaube mit einem UV-System verdoppelt mindestens den ursprünglichen Preis und zieht auch empfindlich höhere Wartungskosten nach sich, während die Bestückung mit verbesserten Filtern nur geringe Mehrkosten verursacht. Ist der kostengünstige zusätzliche Filter möglicherweise hauptsächlich für die bessere Leistung einer solchen Haube verantwortlich? Falls dem so ist, wäre die Investition in teure UV-Anlagen mit höheren Wartungsanforderungen unnötig. Bis zu den Untersuchungen, die wir in diesem Aufsatz beschreiben, gab es keinen fundierten experimentellen Beleg für diese Annahmen.

Die Entscheidungen der öffentlichen Hand werden durch die Frage nach der Effizienz der UV-Behandlung beeinflusst werden. Die für die Regelung zuständigen öffentlichen Stellen erwägen, UV-Hauben in bestimmten neuen Anlagen vorzuschreiben oder haben das bereits getan. Wenn die angeführten chemischen Reaktionen nicht in einem praxistauglichen Maß ablaufen, wird Kapital in den Sand gesetzt und es werden teure Verpflichtungen auf der Grundlage von falschen Annahmen geschaffen. Die beabsichtigte Emissionsverringerung wird aber möglicherweise, wenn überhaupt, durch bessere Filter erreicht.

Ein früherer Artikel einer der Autoren (Farrell) konfrontiert anhand referierter Fachliteratur die angeführten Vorteile der UV-Hauben mit der wissenschaftlichen Realität.<sup>18</sup> Dieser Artikel bestätigt, dass durch die UV- und Ozon-Einwirkung neue Arten von Molekülen entstehen. Die Reaktionsbedingungen in UV-Hauben, besonders in Hinblick auf die verfügbare Energie und die Einwirkzeit, sind jedoch vollkommen unzureichend, um die Reaktionen vollständig in der angeführten Weise ablaufen zu lassen. Dieser Aufsatz beschreibt die experimentelle Fortführung dieser Studie.

### VERSUCHSREIHE FÜR UV-HAUBEN

Ziel dieser Versuchsreihe ist es festzustellen, welche chemischen Reaktionen beim Einsatz von UV-Hauben

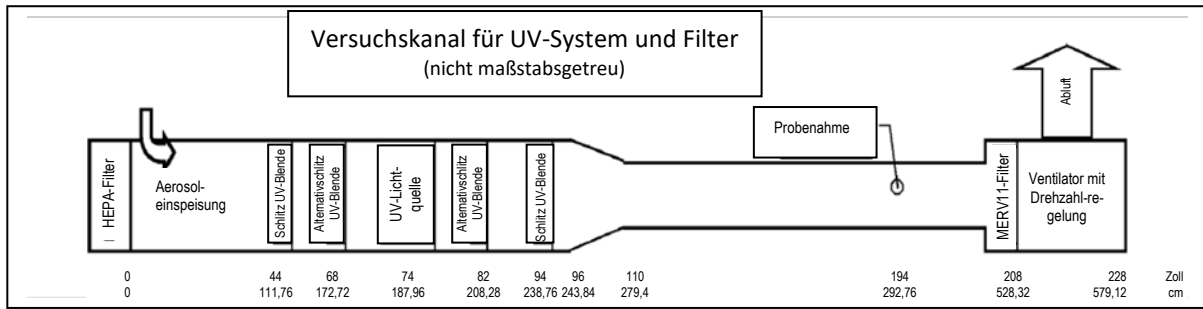
ablaufen, wie viel Fett reduziert wird und wodurch die Verringerung zustande kommt. Die amerikanische Umweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency), ASHRAE, das California Air Resources Board, die National Science Foundation und chinesische Regierungsstellen, alle haben Studien zur Charakterisierung der Kochemissionen und zur Quellenzuordnung durchführen lassen.<sup>19,20</sup> Die hier beschriebene Versuchsreihe wurde auf der Grundlage eines ausführlichen Studiums dieser Werke und vieler weiterführender Gespräche mit den Forschern und Autoren geführt.

Für den Ablauf von chemischen Reaktionen und die Umwandlung von Fett in andere Endprodukte sind Reaktanten und Energie erforderlich. Sowohl Reaktanten als auch Energie sind beim Kochen verfügbar und waren es auch in dieser Versuchsreihe. Beim Kochen entstehen tausende von potenziellen Reaktanten.<sup>21,22</sup> Das von UV-Lampen erzeugte Ozon ist ein weiteres Reaktant. Die Umgebungswärme und die Abwärme der Geräte bilden zusammen mit den UV-Photonen die Energiequellen. Art und Umfang der ablaufenden chemischen Reaktionen wird durch die Konzentration, das chemische Potenzial, die verfügbare Energie und die Einwirkzeit bestimmt. Eine Reaktion läuft vollständig (bis zu ihrem Ende) ab, wenn die Reaktanten unter den vorliegenden Bedingungen das niedrigste Niveau an freier Energie erreicht haben. Die Oxidation (i.e. Verbrennung) von Kohlenwasserstoff ist beendet, wenn der Ausgangsstoff vollständig in Kohlendioxid und Wasser umgewandelt wurde. Mehr Energie, eine höhere Konzentration von reaktiven Stoffen und mehr Zeit begünstigen den vollständigen Ablauf der Reaktion.

### Versuchsreihe: Aerosol

Die Versuchsreihe umfasste chemische und physikalische Versuche zur Bewertung der Wirksamkeit von UVC-Lampen in Abzugshauben. Die Versuche wurden in einem eigens dafür gebauten Versuchskanal durchgeführt, der in Abb. 1 dargestellt ist. Zwei UV-Lichtblenden (übliche Fettschutzbleche in gewerblichen Küchen, schwarz angestrichen) wurden in den ersten und vierten Filterschlitz eingesteckt, um den UV-Reaktionsbereich abzugrenzen. Die UVC-Strahlungsquelle wurde in der Mitte dieses Bereichs zwischen dem zweiten und dritten Filterschlitz angeordnet. Die Auslegung des Kanals ermöglichte auch die Untersuchung der Erfassungseffizienz der Küchenabluftfilter.

Die Versuche wurden nicht in einer Abzugshaube mit Kochwrasen sondern in einem eigens dafür entwickelten Versuchskanal mit einem Ersatzstoff, nämlich Ölsäure, durchgeführt, um die Versuchsbedingungen besser kontrollieren zu können und Konsistenz sicherzustellen. Auch wenn diese kontrollierte Umgebung keine Verbrennungsprodukte aus gasbefeuertem Kochen enthält, ist sie dennoch ausreichend repräsentativ für elektrisches Kochen, um die beabsichtigte Bewertung der UV- und Ozonwirkungen durchführen zu können.



**Abb. 1.** Versuchskanal (nicht maßstabsgetreu). Die Längenmaße sind in Zoll und Zentimeter am unteren Rand angegeben. Der linke Abschnitt bis zum Übergang und der Ventilatorbereich haben einen quadratischen Querschnitt mit einem Innenmaß von 24 Zoll (60,96 cm). Der Verbindungskanal hat einen runden Querschnitt mit einem Innendurchmesser von 11,75 Zoll (29,84 cm).

**Tabelle 1.** UV- und Ozoneinwirkung, Vergleich UV-Haube und Versuchskanal

Typische 6-Fuß-Haube (ca. 1,83 cm) mit (6) 64-Zoll-UV-Lampen (ca. 1,63 m)					
Luftmenge über die vordere Haubenlänge, ft <sup>3</sup> /min/ft (m <sup>3</sup> /min/m)			250 (23,2)		
Vordere Haubenbreite, ft (m)			6 (1,83)		
Haubenluftmenge, ft <sup>3</sup> /min (m <sup>3</sup> /min)			1500 (42,5)		
UV-Energie, Wh* (Joule)			198 (7,13 x 10 <sup>5</sup> )		
Erzeugtes Ozon, g/h*			43,2		
Ozoneinwirkung, mg/ft <sup>3</sup> (mg/m <sup>3</sup> )			1500 (42,5)		
<b>Versuchskanal</b>					
Luftmenge über die vordere Länge, ft <sup>3</sup> /min/ft (m <sup>3</sup> /min/m)			200 (5,7)		
Vordere Breite, ft (m)			4,0 (1,22)		
Luftmenge, ft <sup>3</sup> /min (m <sup>3</sup> /min)			9,8 (3,0)		
UV-Energie, Wh* (Joule)			34 (1,22 x 10 <sup>5</sup> )		
Erzeugtes Ozon, g/h*			9,2		
Ozoneinwirkung, mg/ft <sup>3</sup> (mg/m <sup>3</sup> )			0,77 (27,1)		
*Nach Angabe des Herstellers					
Expositionsbedingungen			Zeit (sec)	UV-Energie (Joule/m <sup>3</sup> )	Ozon (mg-sec/m <sup>3</sup> )
<b>Haube</b>					
Mindesteinwirkzeit	der UV-Strahlung		0,1	28	
	des Ozons in der Haube und den Kanälen		0,4		7
Höchstleinwirkzeit	der UV-Strahlung		0,4	112	
	des Ozons in der Haube und den Kanälen		2,5		42
<b>Einwirkzeit im Versuchskanal</b> (200 CFM, 5,66 m <sup>3</sup> /min)					
	der UV-Strahlung		3,3	1320	
	des Ozons von der Lampe zur Probenahme		4,6		125
<b>Einwirkrate im Versuchskanal im Vergleich zur Haube</b>					
Versuchskanal im Vergleich zur Haube bei maximaler Luftmenge	der UV-Strahlung				47
	des Ozons in der Haube und den Kanälen				18
Versuchskanal im Vergleich zur Haube bei minimaler Luftmenge	der UV-Strahlung				12
	des Ozons in der Haube und den Kanälen				3

Außerdem wird nach Gerstler et al.<sup>1</sup> beim gasbefeuchten Kochen mehr Aerosol und Dampf freigesetzt als beim elektrischen, so dass die Beteiligung der Verbrennungsprodukte an der Fettoxidation vernachlässigt werden kann.

*Versuche mit Aerosol.* Die Größenverteilung der Aerosolpartikel in den Versuchen war vergleichbar mit der beim tatsächlichen Kochen.<sup>23-25</sup> Wenn nicht anders angegeben, wurden die Versuche mit einer Luftmenge von 200 CFM (Kubikfuß pro Minute) (ca. 5,66 m<sup>3</sup>/min)

durchgeführt. Dieser Wert wurde bewusst gewählt und liegt im unteren Bereich bei typischen gewerblichen Küchenabzugshauben. Die Luftmenge wurde mit einem Hitzdrahtanemometer auf einer Messstrecke mit 24 Messpunkten gemessen und mit einem regelbaren Ventilator gesteuert. Die Umgebungsluft im Labor wurde mit vier elektrischen Heizgeräten mit einer Leistung von je 1500 Watt auf 100 bis 110 °F (ca. 37,5 bis 43,5 C) aufgeheizt. Dieser Temperaturbereich optimiert laut Angaben des Herstellers den Ozonausstoß der UV-Lampe.

Ein modifizierter Tropfenkettengenerator TSI Modell 3450 (TSI, Shoreview, MN) wurde für die Erzeugung des Ölsäureaerosols eingesetzt. Diese durchflossen die Reaktionszone ohne Einwirkung von UV und Ozon. Aus den strömenden Stoffen wurden Proben in Form von Flüssigkeitströpfchen und Dampf entnommen und chemisch analysiert. Diese Versuche wurden mit UV- und Ozon-Einwirkung wiederholt. Der Versuchskanal wurde eigens für eine Förderung der Reaktion der organischen Aerosole im Luftstrom ausgelegt. **Unter den Versuchsbedingungen wurde das strömende Aerosol länger der UV-Strahlung und einer höheren Konzentration an Ozon ausgesetzt, als das in UV-Hauben der Fall ist, auch in Hauben mit niedrigen Abluftraten.** Tabelle 1 vergleicht die eingebrachte UV-Energie, die Ozonkonzentration und die Einwirkzeit auf das strömende Aerosol in einer Abzugshaube mit UV-System und im Versuchskanal.

**Ölsäure wurde als Versuchsaerosol verwendet. Es handelt sich um eine Omega-9-Fettsäure (CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>7</sub>CH=CH(CH<sub>2</sub>)<sub>7</sub>COOH), die in bestimmten Fleisch- und Gemüsesorten vorkommt. Sie ist einfach gesättigt und verfügt nur über eine Doppelbindung. Aus der zitierten Fachliteratur geht eindeutig hervor, dass langkettige Fettsäureverbindungen üblicherweise in der Küchenabluft vorkommen. Einige Fettsäuren sind gesättigt und haben daher keine Doppelbindungen, andere sind mehrfach ungesättigt mit vielen Doppelbindungen. Doppelbindungen sind am reaktionsfreudigsten bei dieser Art von chemischer Verbindung und ungesättigte Verbindungen reagieren in der Regel früher als gesättigte.** In einer Studie über die Emissionen bei der Zubereitung von Hamburgern<sup>23</sup> war Ölsäure die am häufigsten vorkommende Fettsäure. Sie wurde wegen ihrer Häufigkeit in Kochemissionen und ihrer Reaktionsfreudigkeit für diese Studie ausgewählt.

Das Versuchsaerosol durchströmte eine Luftkammer zur isotopischen Neutralisierung, die mit sechs Staticmaster 2U500 Ionisierern (Neugeräte am Beginn des Versuchs, Polonium-210 hat eine Halbwertszeit von 138 Tagen) ausgestattet war, danach floss das Aerosol durch Tygenschläuche und ein Kupferrohr und wurde parallel zum Luftstrom in der Mitte des Versuchskanals ungefähr fünf Zentimeter hinter dem HEPA (high efficiency particulate arrestance)-Filter eingeleitet.

Der Luftstrom wurde danach durch eine UV-Lichtblende geleitet, um die Mischverhältnisse beim Kochen nachzustellen, wenn die Wrasen in den UV-Bereich im

Haubenraum strömen. Bei Durchgängen mit eingeschalteten UV-Lampen wurde Ozon von dem Luftstrom aufgenommen und mischte sich beim Passieren einer zweiten UV-Lichtblende mit dem Aerosol. Die Mischung strömte weiter zur Probenahmestelle. Proben der Schwebstoffe wurden mit einem HEPA 47-mm-Glasfaserfilter genommen. Ein Filter mit einer 0,56-Zoll-Düse (ca. 1,42 cm) am vorderen Ende wurde zur isokinetischen Probenahme bei einer Geschwindigkeit 13,0 l/min eingesetzt. **Die Proben wurden während 30 Minuten genommen, einmal mit eingeschalteten und einmal mit ausgeschalteten UV-Lampen.**

In separaten Versuchen wurden Proben von Dampf und schwerflüchtigen Stoffen mithilfe von Sorptionsröhrchen genommen. Ein XAD-2 Sorptionsröhrchen (SKC, Inc., Eighty Four, PA) wurde zur Untersuchung von Aldehyden und ein Anasorb 727-Röhrchen (SKC, Inc., Eighty Four, PA) zur Erfassung von flüchtigen Kohlenwasserstoffen eingesetzt. Vor den Analysebereichen befanden sich Gaswaschbereiche mit Kaliumjodidgranulat, um Verschmutzung und nachträgliche Reaktionen mit eingeschlossenem Ozon zu verhindern. Die Proben wurden in der Mitte des Kanals am gleichen Punkt wie die Schwebstoffproben genommen (Abb. 1). Die Fließgeschwindigkeit durch die Sorptionsröhrchen wurde auf den vom Hersteller empfohlenen Wert von 2,0 l/min gesetzt. Die Dauer der Probenahme betrug 20 Minuten.

#### **Versuchsreihe: Andere**

*Konzentration des von den UV-Lampen erzeugten Ozons, mit und ohne strömende Aerosole.* Ozonmessungen wurden während der Versuche unter unterschiedlichen Bedingungen und an verschiedenen Stellen vorgenommen. Die im Folgenden ausgewerteten Proben wurden jedoch alle mit einem Ozonmesser mit Teflonschlauch in der Mitte des Kanals 4 Fuß (ca. 1,22 Meter) hinter den UV-Lampen genommen. Bei der Messung der Ozonkonzentration waren die UV-Lampen grundsätzlich eingeschaltet. Die Messwerte wurden sowohl mit fließenden Aerosolen als auch ohne genommen.

#### **Partikelgrößenverteilung, Vergleich mit und ohne UV-Einwirkung.**

Die Partikelgrößenverteilung in den strömenden Aerosolen wurde mit zwei Laserpartikelzählern (LPC) in zwei Versuchsreihen mit unterschiedlichen Testbedingungen festgestellt. Bei beiden Versuchsreihen wurden Messungen sowohl bei angeschalteten als auch mit ausgeschalteten UV-Lampen vorgenommen. Die Proben wurden isokinetisch in der Mitte des runden Kanals, 7 Fuß (2,13 m) nach dem Übergang vom eckigen auf den runden Querschnitt genommen. Die erste Messreihe wurde mit einem Lasair Modell 101 durchgeführt, der Partikel im Bereich 0,1 bis 3,0 Mikrometer erfasst. Die Messungen wurden bei Volumenströmen von 350, 590 und 878 CFM (9,91, 16,70 und 24,86 m<sup>3</sup>/min) durchgeführt. Die Versuche fanden bei Raumtemperatur statt,

da eine Beheizung bei den relativ hohen Volumenströmen nicht möglich war. Die zweite Messreihe wurde mit einem Volumenstrom von 250 CFM (7,08 m<sup>3</sup>/min) und einer Temperatur von 105 °F (ca. 40,5 °C) mit einem HIAC/ROYCO 5230 LPC durchgeführt.

**Erfassungseffizienz der Filter.** In dieser Versuchsreihe wurde die Reduzierung der Anzahl an Aerosolpartikeln allein durch UV-Licht und Ozon gemessen und mit der Erfassungseffizienz von sechs handelsüblichen Filtern in Küchenhauben verglichen. Unter den getesteten Filtern waren vier Typen, die üblicherweise als Hauptfilter in UV-Hauben verwendet werden, weiterhin ein Streckmetallfilter (Gestrickfilter), der als Nachfilter in UV-Hauben zum Einsatz kommt und ein zweistufiger Kombifilter. Die Filterwirkung von UV alleine, ohne zusätzliche weitere Filter, wurde ebenfalls geprüft. Die Verfahren zur Prüfung der Erfassungseffizienz wurden soweit wie möglich nach ASTM F2519-05 *Standard Test Method for Grease Particle Capture Efficiency of Commercial Kitchen Filters and Extractors* durchgeführt, allerdings gab es Einschränkungen aufgrund der Filtergeometrie und der Emissionsquelle.

Für die Prüfung wurden zwei Mischblenden in den ersten und den zweiten Schlitz und der zu prüfende Filter in den vierten Schlitz des Versuchskanals eingeschoben. Der Volumenstrom lag bei 600 CFM (16,99 m<sup>3</sup>/min) mit einer Filteranströmgeschwindigkeit von ungefähr 240 ft/min (73,15 m/min). Der Volumenstrom wurde mit einem Hitzdrahtanemometer auf einer Messstrecke mit 24 Messpunkten nach der Norm 40 CFR 60 der amerikanischen Umweltschutzbehörde EPA ermittelt. Der Druckverlust durch den Filter wurde mit einem digitalen Druckmesser festgestellt.

**Vergleich der Energieabgabe von neuen und verschmutzten UV-Lampen.** Die UV-Energieabgabe von sauberen und verschmutzten UV-Lampen (nach dem Kontakt mit fetthaltigen Aerosolen) wurde jeweils mit einem Hamamatsu UV-Leistungsmesser festgestellt. Die Werte wurden mit zwei Sensoren bei unterschiedlichen Wellenlängen von 254 nm und 185 nm ermittelt. Die Sensoren wurden in einem Abstand von 0,5 bis 0,75 Zoll (1,27 bis 1,9 cm) von der zu messenden Lampe angebracht. Für die Versuche war eine Intervention im Versuchskanal zum Anbringen der Sensoren erforderlich, was zu Temperaturschwankungen führte. Die UV-Energieabgabe wurde bei Lufttemperaturen von 102 bis 106 °F (38,88 bis 41,11 °C) im Kanal gemessen.

## ERGEBNISSE UND DISKUSSION

### Chemische Veränderungen

**Probenahme.** Die Stabilität der Aerosolerzeugung und der Probenahmeeinrichtung wurde anhand eines Vergleichs der erfassten Ölsäuremenge mit der in den Aerosolerzeuger eingespeisten Menge bewertet. In mehreren Versuchen mit ausgeschalteten UV-Lampen erfasste das System im Durchschnitt 0,027 %, bei einer Bandbreite

von 0,020 bis 0,037 % ( $n = 4$ ). Mit angeschalteten UV-Lampen erfasste das System im Durchschnitt 0,030 %, bei einer Bandbreite von 0,023 bis 0,034 % ( $n = 3$ ). Die beiden Durchschnittswerte weichen statistisch gesehen nicht voneinander ab ( $t$  Test auf gleiche Varianten,  $\alpha = 0,05$ ). Jeweils eine Probe jeder Prüfmart (UV an und UV aus) wurde einer chemischen Analyse unterzogen. Die Prüfung der blanken Filter (ohne Ölsäureaerosol) ergab eine Masseänderung unter 0,001 %. Bereits diese gravimetrischen Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass keine nennenswerte Zersetzung von flüchtigen Stoffen durch die Einwirkung von UV-Licht und Ozon stattfindet. Das System hat zwar chemische Reaktionen bewirkt (siehe unten), diese Änderungen stimmen aber mit den bekannten chemischen Reaktionen von Ölsäure und anderen ungesättigten Verbindungen überein.

**Analytische Methodologie.** Proben der Flüssigphase und der Dampfphase wurden mithilfe von Gaschromatografie-Massenspektrometrie-Kopplung (GC-MS) und FTIR-Spektroskopie (Fourier transform infrared) analysiert. Die chemische Untersuchung konzentrierte sich auf den Nachweis von Ölsäure und zugehörigen Abbauprodukten. Diese Analysen wurden in einem nach ISO 9001:2008 zertifizierten Labor durchgeführt.

Jeder Filter wurde in zwei ungefähr gleiche Teile geteilt. Ein Teil wurde für die GC-MS-Analyse und der andere für die FTIR-Analyse verwendet. Jede Filterhälfte wurde auf 0,1 mg (Tabelle 2) genau gewogen. Die FTIR-Spektren waren mehr oder weniger identisch, was auf keine großen Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der erfassten Rückstände hindeutet, unabhängig davon ob die UV-Lampen an oder aus waren.

Tabelle 2. GC-MS-Probengewichte.

	Filterprobe ‚UV aus‘ Probe Nr. 1000851- 01	Filterprobe ‚UV an‘ Probe Nr. 1000851- 02
FTIR-Probe	8,4 mg	9,5 mg
GC-MS-Probe	7,7 mg	7,6 mg

Danach wurde jedes Filterteil in eine vorgereinigte Viole zur Analyse der flüchtigen organischen Stoffe eingelegt. Chromatografie-geeignetes Methanol wurde in jede Viole gegeben und bei 37 °C ungefähr 60 Minuten lang einwirken gelassen. Nach Abschluss der Extraktion wurde jeder Filter aus der Viole entnommen und über Nacht bei 37 °C getrocknet. Die Trocknung wurde solange fortgeführt, bis das Gewicht der Filter konstant blieb. Dann wurden sie auf 0,1 mg genau gewogen und der Gewichtsverlust erfasst. Danach wurden die Extraktlösungen für die GC-MS-Analyse bis auf 0,1 ml und für die FTIR-Analyse bis zur Trocknung konzentriert.

In Kombination mit den nach Filtern ermittelten gravimetrischen Daten aus Tabelle 2 zeigt sich, dass die

UV-aus-Probe insgesamt 16,1 mg erfasste Stoffe enthielt, die UV-an-Probe dagegen 17,1 mg. Diese beiden Massewerte können als annähernd gleich angesehen werden, angesichts der normalen verfahrensbedingten Ungenauigkeit bei der Zugabe von Ölsäure und der Probenahme. Wie bereits erwähnt, zeigte sich in mehreren Versuchen, dass sich die erfassten Massen bei angeschalteten und ausgeschalteten UV-Lampen statistisch gesehen nicht unterscheiden. Die Proben waren repräsentativ für diese Versuche.

Die filterbasierte Probenahmeeinrichtung ist für die physikalische Erfassung von Flüssigkeitströpfchen und Feststoffteilchen ausgelegt. Chemische Bestandteile in der Gasphase einschl. leichtflüchtige organische Stoffe und Gase, wie z. B. Kohlendioxid, strömen durch den Filter, ohne die untersuchte Masse zu verändern. Diese Ergebnisse legen bereits nahe, dass keine nennenswerte Menge an flüchtigen Bestandteilen durch die Einwirkung von UV-Licht und Ozon gebildet wird und, dass die Gesamtmasse der nichtflüchtigen Bestandteile unverändert bleibt, wenn die UV-Lampen eingeschaltet sind.

*Flüssige Proben.* Die Extraktlösungen wurde in einer GC-MS-Kopplung mit einem abgewandelten Verfahren nach EPA 8270 analysiert. Die halbflüchtigen Verbindungen wurden in das GC-MS-Verfahren durch Injizieren einer Probe in einen Agilent 7890 Gaschromatographen (GC) mit einem massenselektiven (MS) Sensor 5975 mit einem Scanbereich von 35 bis 1000 amu eingebracht. Eine DB-5ms-Narrow-Bore-Kapillarsäule wurde thermisch programmiert, um die Analyte im GC zu trennen, die dann beim Herausfließen aus der Säule vom MS-Sensor erfasst wurden.

Eine semiquantitative Analyse wurde für alle vorläufig ermittelten Verbindungen durchgeführt. Ein elektronischer Abgleich der Spektren der unbekannt Verbindungen mit den Spektren der Referenzbibliotheken des National Institute of Standards and Technology (NIST) und von Wiley wurde durchgeführt. Ein visueller Vergleich jeder unbekannt Verbindung mit dem Bibliotheksmuster mit der größten Übereinstimmung wurde ebenfalls durchgeführt. Die Quantifizierung wurde anhand der naheliegendsten internen Standards vorgenommen. Konnten bestimmte Verbindungen nicht anhand des Massespektrums identifiziert werden, wurden sie der identifizierten Verbindungsklasse zugeordnet (z.B. organische Säure).

GC-MS ist das beste Verfahren zur Identifizierung von flüchtigen und halbflüchtigen organischen Verbindungen. Durch seine Anwendung in dieser Versuchsreihe konnten flüchtige und halbflüchtig chemische Substanzen in den Proben nachgewiesen und viele davon vorläufig identifiziert werden. Da Referenzstandards nicht analysiert wurden, erfolgte eine Schätzung der Konzentrationen jedes Bestandteils. Diese Mengenschätzungen sind nur als semiquantitativ anzusehen.

Dennoch sind diese Schätzungen für die aktuelle Studie gültig, zumal eine mathematische Interpretation der absoluten Mengen nicht sinnvoll war, denn das Hauptziel ist der Vergleich zwischen zwei Versuchsbedingungen. Die durch UV-Licht und Ozon hervorgerufenen Unterschiede zeigen sich in der Zusammensetzung und Gesamtmassenverteilung der beiden Extrakte.

Wie Tabelle 3 zeigt, wird Ölsäure als Hauptbestandteil der UV-aus-Probe bestätigt, aber es gibt auch Hinweise auf eine Vielzahl von anderen „unbekannten organischen Säuren.“ Diese Substanzen sind unbedeutende Verunreinigungen (möglicherweise andere Fettsäuren) und ihr Vorkommen ist typisch für Verbindungen, die aus natürlichen Quellen stammen. Die UV-an-Probe enthält fast alle diese Verbindungen sowie zahlreiche andere Substanzen, von denen viele vorläufig identifiziert werden konnten. Viele dieser Verbindungen sind von ihrer Struktur her mit der Ölsäure verwandt. Ihre Bildung kann durch chemische Reaktionen einfach erklärt werden. Zum Beispiel Azelainsäure (Nonandisäure), die zweithäufigste Säureart in der UV-an-Probe, wird industriell durch Ozonolyse von Ölsäure hergestellt. Nonanal und Nonansäure sind Verbindungen mit neun Kohlenstoffatomen, die vermutlich durch die Spaltung der reaktionsfreudigen Doppelbindung in der Mitte des Ölsäuremoleküls mit 18 Kohlenstoffatomen entstehen. Diese Reaktionen wurden in der Fachliteratur bereits beschrieben<sup>26,27</sup> und ihr Vorkommen in der UV-an-Probe ist nicht verwunderlich.

**Tabelle 3.** GC-MS-Ergebnisse für die Flüssigphaseproben UV-aus und UV-an.

Vorläufig identifizierte Verbindungen	Mikrogramm in der Probe	
	UV-aus	UV-an
Hexanal	<1	2,6
Heptanal	<1	7,7
Hexansäure	<1	2,2
Heptan, 1-Chloro	<1	1,1
1-Oktanol	<1	1,1
Heptansäure	<1	16
Nonanal	<1	57
Decanal	<1	1,1
Nonansäure	<1	3,5
2-Decanal	<1	2,7
Decansäure	<1	2,2
Dodecansäure	1,8	2,5
Azelainsäure	<1	360
<b>Ölsäure</b>	<b>4700</b>	<b>1500</b>
Summe der identifizierten Verbindungen	4714	1960
Unbekannte Aldehyde	<4	240
Unbekannte organische Säuren	952	763
Unbekannte organische Ester	4	9
Gesamtheit aller Arten	5673	2972

*Anmerkungen:* Bei Werten mit <-Zeichen kam der Stoff entweder nicht vor oder die Menge lag unter der Nachweisgrenze des Systems. Der numerische Wert für die Nachweisgrenze wurde in Berechnungen zur Abbildung eines Worst-Case-Szenarios herangezogen.

Tabelle 4. GC-MS-Ergebnisse für Dampfproben

Analyt	UV aus, Anasorb (1001159-01) (mg/ml)	UV 25 Min., Anasorb (1001159-05) (mg/ml)	UV aus, XAD (1001159- 02) (mg/ml)	UV 25 Min., XAD (1001159-06) (mg/ml)	Anasorb 727, leeres Röhrchen (mg/ml)	XAD, leeres Röhrchen (mg/ml)
Unbekannt	1,4	6,4	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0
Nonanal	<1,0	8,6	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0
Unbekanntes Aldehyd	<1,0	<1,0	<1,0	26	<1,0	<1,0

Die Übereinstimmungen bei diesen Stoffen bestätigen, dass die UV-Strahlung und das Ozon in dieser Versuchsanordnung chemische Reaktionen bei der Ölsäure ausgelöst haben. Eine Reihe an Reaktionsprodukten konnte festgestellt werden, was auf das Abfließen chemischer Reaktionen einschließlich nachträglicher Reaktionen der einzelnen Reaktanten zur Bildung kleinerer Verbindungen hindeutet. Theoretisch könnte dieser Prozess für alle Reaktanten ablaufen, möglicherweise bis zur Umwandlung der organischen Stoffe in sehr kleine flüchtige Moleküle. Auch wenn die Bildung dieser flüchtigen Stoffe bei ausreichender Expositionszeit nicht ausgeschlossen werden kann (wurde an diesen Proben nicht untersucht), deutet die Tatsache, dass der Großteil der Reaktionsprodukte aus größeren Molekülen bestand, die dem Ausgangsstoff Ölsäure sehr ähnlich waren, darauf hin, dass die Umwandlung in flüchtige Stoffe keine Hauptabbauweise in diesem System und unter diesen Bedingungen darstellt.

Letztendlich deuten die berechneten Ergebnismassen aus der GC-MS-Analyse und vor allem die anderen gravimetrischen Daten darauf hin, dass möglicherweise ein anderer Reaktionsverlauf in diesem System zusätzlich auftritt. Eine Summe aller Massewerte (d. h. die Gesamtheit an Mikrogramm) der UV-an-Probe in Tabelle 3 macht nur ungefähr die Hälfte des entsprechenden Werts der UV-aus-Probe aus. In diesem Zusammenhang sei noch einmal darauf hingewiesen, dass in der GC-MS-Analyse nur flüchtige und halbflüchtige Stoffe gemessen werden können. Nichtflüchtige Stoffe, die häufig in Verbindungen mit höherem Molekulargewicht vorkommen und andere Verbindungsklassen können in diesem Verfahren nicht nachgewiesen werden. Da die gravimetrischen Anfangswerte der beiden Proben fast identisch waren, deuten die Ergebnisse darauf hin, dass ein bedeutender Anteil der UV-an-Probe aus nicht-flüchtigen Stoffen besteht.

Oligomerisation und Polymerisation sind Beispiele für chemische Reaktionen, bei denen nichtflüchtige Produkte entstehen. Dafür werden ein reaktionsfreudiges Monomer und ein geeigneter Katalysator benötigt. In unserer Versuchsreihe hat Ölsäure eine reaktionsfreudige Doppelbindung, die sich für die Polymerisation eignet, ähnlich wie bei einfachem Ethylen, aus dem dann Polyethylen entsteht. UV-Licht und Ozon sind beide als Katalysatoren für die Polymerisation bekannt. Daher ist die Entstehung von Arten mit höherem Molekular-

gewicht durch Polymerisationsmechanismen eine realistische Möglichkeit. Obwohl alle vorliegenden Daten auf das Vorhandensein solcher Polymerarten hindeuten, wären für den tatsächlichen Nachweis weitere Versuche erforderlich. Wie schon erwähnt, haben frühere Studien<sup>26,27</sup> halbflüchtige Arten, wie sie in diesen Versuchen gefunden wurden, unter einer ganzen Reihe von Versuchsbedingungen nachgewiesen und es deutet alles auf das Vorhandensein größerer, nichtflüchtiger Stoffe hin.

*Dampfproben.* Dampfphaseproben wurden separat mithilfe von Sorptionsröhrchen genommen. Die Probenahme erfolgte einmal mit ausgeschalteter UV-Lampe und in verschiedenen Versuchen zweimal mit angeschalteter UV-Lampe. Anasorb-Reagens wurde für die Probenahme von flüchtigen Kohlenwasserstoffen und XAD-2-Reagens für die Aldehyde verwendet. Die Analyse der mit Sorptionsröhrchen in der Dampfphase genommenen organischen Verbindungen wurde ebenfalls in einer GC-MS-Kopplung im bereits erwähnten Labor vorgenommen. Der vordere und hintere Sorptionsbereich jedes Röhrchens wurden zu je einer Probe kombiniert. Jede Probe wurde dann mit einer 1:1-Mischung aus Methanol und Dichlormethan extrahiert. Für jedes Sorptionsmittel wurde auch ein leeres Röhrchen extrahiert. Tabelle 4 zeigt die GC-MS-Ergebnisse für die Dampfphaseproben. Die Messergebnisse zeigen wenig Stoffe in der Dampfphase ohne UV-Licht und nur einen leichten Anstieg in einem Versuch mit UV-Lichteinwirkung. Insgesamt bestätigen auch diese Ergebnisse, dass UV-Licht keine nennenswerten Mengen kleiner, flüchtiger organischer Verbindungen erzeugt.

*Ozonverbrennungsversuch.* Um festzustellen, in welchem Maß das von den UV-Lampen erzeugte Ozon mit den organischen Aerosolen reagiert, wurde seine Konzentration einmal im partikelfreien und einmal im aerosolhaltigen Luftstrom gemessen. Das unwesentliche Absinken der Ozonkonzentration in Tabelle 5 zeigt, dass nur ungefähr 35 % des Ozons verbraucht werden, auch wenn ausreichend feine Partikel in fetthaltigen Aerosolen für eine Reaktion zur Verfügung stehen. Das deutet ganz stark darauf hin, dass ein Großteil des Ozons nicht die ihm zugeschriebene fettreduzierende Funktion erfüllt, auch nicht bei kleinsten Partikeln, sondern ins Freie gelangt, wo es zur Luftverschmutzung beiträgt.



## Physikalische Änderungen

**Partikelgrößenänderungen.** Kochemissionen und das Versuchsaerosol enthalten beide Partikel unterschiedlicher Größen. Veränderungen in der Partikelgrößenverteilung im Versuchsaerosol bei eingeschalteten und ausgeschalteten UV-Lampen bieten die Möglichkeit, den Effekt von UV-Licht und Ozon physikalisch zu messen. Zwei Versuche wurden durchgeführt, um die Messungen zu bewerten. Abb. 2a zeigt drei Aerosolströme mit einem Partikelgrößenbereich von 0,3 bis 3 Mikrometer, wogegen Abb. 2b einen Größenbereich von 1 bis 10 Mikrometer bei einem Fluss mit geringerem Volumenstrom zeigt.

**Tabelle 5.** Ozonkonzentration unter unterschiedlichen Bedingungen.

UV-Lampen an, Temperatur im Kanal 106 °F (ca. 41,11 °C), Volumenstrom 200 CFM (ca. 5,66 m<sup>3</sup>/min), Aerosolstrom 4,1 g/min am Erzeuger

	O <sub>3</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	ppm O <sub>3</sub>
Ohne Aerosol	7,94	3,71
Mit Aerosol	5,15	2,41
Ozonverbrauch		35 %

Die in den Abb. 2a und 2b gezeigten unveränderten Partikelzahlen bei eingeschalteten und ausgeschalteten UV-Lampen sind ein weiterer Beleg dafür, dass keine signifikante chemische Zersetzung stattfindet. Jede chemische Veränderung, die ein Partikel erfährt, wirkt sich zuerst auf seine Oberfläche aus und führt auch oft zu einer Größenänderung. Hätte UV-Licht die ihm zugeschriebene Wirkung, könnte man diese am deutlichsten an den kleinen Partikeln erkennen, da bei diesen das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen relativ groß ist und sie am leichtesten oxidiert werden können. Würden die kleinen Partikel vollständig zu Kohlendioxid und Wasser oxidiert, wären sie dampfförmig und würden bei der Partikelzählung nicht erfasst. Wenn also kleinere Partikel nicht in gasförmige Stoffe umgewandelt werden, kann man davon ausgehen, dass dies für die größeren Partikel im untersuchten Größenbereich noch weniger zutrifft. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass, wenn sich der Durchmesser eines Partikels verdoppelt, sich das Volumen und die Masse bis um das Achtfache vergrößern können.

**Erfassungseffizienz.** Sechs kommerzielle Filter wurden nacheinander mit Ölsäure getestet. Die UV-Lampen waren dabei nicht eingeschaltet. Die Partikelmessung wurde mit einem HIAC/ROYCO Laserpartikelzähler durchgeführt, und zwar vor Einbau des Filters, während er eingebaut war und nach seinem Ausbau. Die Messung wurde außerdem nur mit UV-Licht- und Ozoneinwirkung durchgeführt. Die Werte in Abbildung 3 zeigen die Abnahme der Anzahl an Partikeln durch unterschiedliche Haubenfilter in Vergleich zu UV-Licht mit Ozon.

Der zweistufige Filter wies die größte Gesamteffizienz auf, die Leistung einiger einstufiger Filter war

beeindruckend, aber die Abscheidewirkung durch UV-Licht mit Ozon war mehr oder weniger gleich null. Diese Ergebnisse bestätigen Abb. 2a und b, wonach UV-Licht und Ozon die Partikelgrößenverteilung nicht beeinflussen konnten.

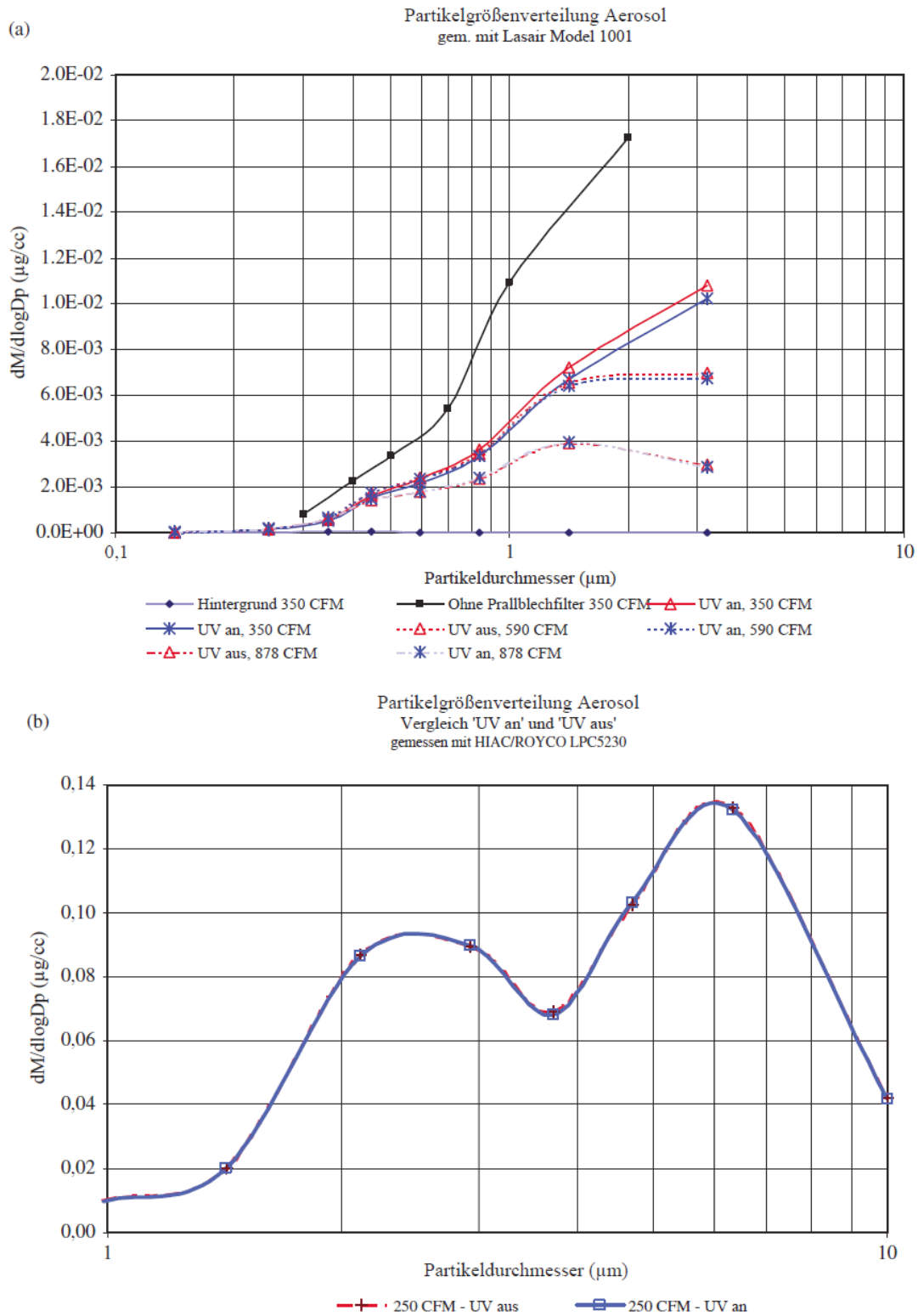
**Verschmutzungen an den UV-Lampen verringern die Energieabgabe.** Eine weitere untersuchte physikalische Änderung war die Energieabgabe der UV-Lampen bei 185 nm und 254 nm. Tabelle 6 zeigt einen Vergleich der Leistung neuer Lampen mit der Energieabgabe der beiden in der Versuchsreihe verwendeten Lampen. Hier wurde die Energieabgabe an der dem Strom zugewandten und an der dem Strom abgewandten Seite gemessen. Die Leistung von UV-Lampen nimmt durch den Kontakt mit fetthaltigen Aerosolen ab. In den Versuchsreihen wurden insgesamt ungefähr vier Liter Ölsäure verbraucht. Die Messwerte zeigen, dass bereits kleine Mengen von Küchenabluft durch Ablagerungen auf den Lampen die für die Fotozersetzung zur Verfügung stehende Energie verringern. In der Praxis strömen große Mengen an flüssigen und festen Partikeln (z. B. Fett und Holzkohle) in die Küchenhauben und verringern sehr schnell die Energieabgabe der UV-Lampen.

## Luftverschmutzungsrisiken

Abschließend möchten wir die Auswirkungen von UV-Hauben jenseits der Schnittstelle betrachten, die den Zuständigkeitsbereich des Betreibers von dem der öffentlichen Hand trennt. In der Tat sind ungünstige Auswirkungen auf die Luftqualität sehr wahrscheinlich, da neue Zusammensetzungen mit einem geringeren Molekulargewicht entstehen, die wahrscheinlich gemeinsam mit einem nicht unerheblichen Anteil an dem von den UV-Lampen erzeugten Ozon ins Freie geblasen werden. Sowohl die neuen Verbindungen als auch das ungebundene Ozon stellen eine Belastung für die Außenluft dar. Weiterführende Studien über die beim Kochen freigesetzte Abluft mit oder ohne UV-Lichtbehandlung wären also durchaus im öffentlichen Interesse.

## FAZIT

Sowohl die Analyseergebnisse aus den Tabellen 3 und 4 als auch die Werte für nicht gebundenes Ozon in Tabelle 5 zeigen aus chemischer Sicht sehr deutlich, dass die Einwirkung von UV-Licht und Ozon die Fettmasse in der Abluft nur geringfügig verringert. Die physikalischen Messungen zeigen, dass die Partikelgrößenverteilung in Abb. 2a und b mehr oder weniger unverändert bleibt und, dass die UV-Lampen fast keine Abscheidewirkung erzielen wie in Abb. 3 dargestellt. Damit untermauern sie die chemischen Versuchsergebnisse. Bei allen Volumenströmen in Abb. 2a, außer bei den höheren Werten, sind die Reaktionsbedingungen günstiger als in UV-Hauben im praktischen Einsatz. Tabelle 1 zeigt, dass das Versuchsaerosol 12- bis 47-mal häufiger UV-Licht und 3- bis 18-mal häufiger Ozon ausgesetzt war als in



**Abb. 2.** Vergleich der Aerosolpartikelverteilung, mit und ohne UV-Lichteinwirkung.  
 (a) Drei Volumenströme 350, 590, 878 CFM ((9,91, 16,70 und 24,86 m<sup>3</sup>/min), Hintergrundstrom 350 CFM (9,91 m<sup>3</sup>/min), Partikelgrößenbereich 0,1 bis 3,0 Mikrometer, gemessen mit Lasair Modell 101.  
 (b) Einzelner Volumenstrom 250 CFM (7,08 m<sup>3</sup>/min), Partikelgröße 1 - 10 Mikrometer, gemessen mit HIAC/ ROYCO LPC 5230.

einer kommerziellen UV-Haube. Wenn unter diesen sehr günstigen Reaktionsbedingungen so wenig passiert, kann man daraus schließen, dass der Einsatz von UV-Lampen beim gewerblichen Kochen keinen praktischen

Nutzen bietet. Wenn UV-Hauben, wie behauptet wird, Fett aus dem Abluftstrom abscheiden, so geschieht dies durch die verbesserten Filter, wie in Abb. 3 gezeigt, bevor UV-Licht und Ozon auf den Luftstrom einwirken.

Filtereffizienz versus Aerosolpartikelgröße  
Gemessen bei 600 CFM

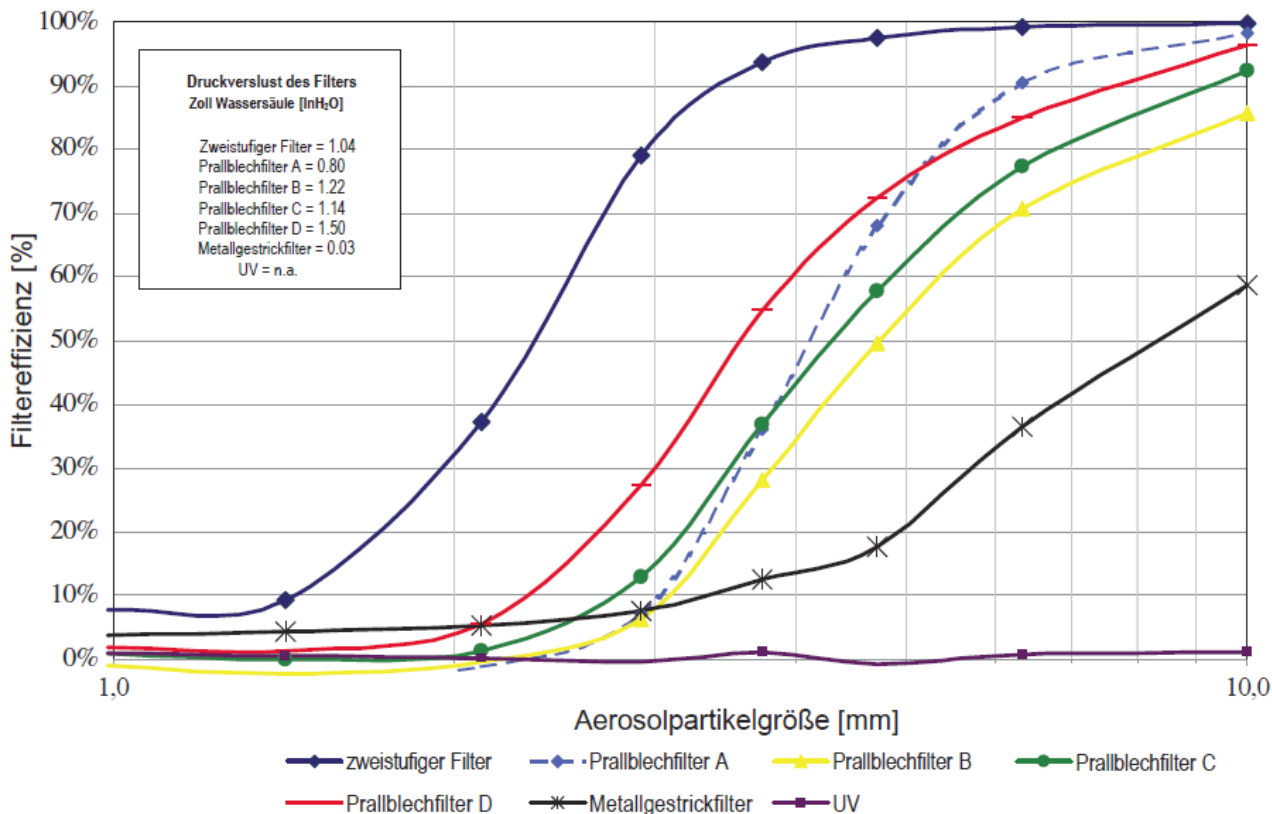


Abb. 3. Partikelerfassungseffizienz von sechs handelsüblichen Filtern im Vergleich zu UV-Licht mit Ozon.

Tabelle 6. UV-Energieabgabe von neuen Lampen und an der sauberen und schmutzigen Seite von gebrauchten Lampen

Lampe (Wellenlänge, nm)	Anströmseite (schmutzig) (mW)	Abströmseite (sauber) (mW)	Veränderung %
1 (254)	10,58	12,00	-11,8%
3 (254)	12,52	13,63	-8,1%
3 (185)	2,07	2,37	-12,7%
Neue Lampe (254)	n. a.	13,45	n. a.
Neue Lampe (185)	n. a.	2,54	n. a.

Abschließend kann man sagen, dass der angeführte Abbau von Kochemissionen durch UV-Systeme durch die Ergebnisse dieser Studie nicht unterstützt wird. Obwohl vermutlich einige chemische Reaktionen ablaufen, hat die Einwirkung von UV-Licht und Ozon keinen Einfluss auf den Großteil der Kochemissionen. Die Ergebnisse zeigen, dass eher größere und weniger flüchtige Stoffe sowie kleinere, halbflüchtige organische Substanzen entstehen als größere Mengen von Kohlendioxid und Wasser, wenn überhaupt. Eine messbare Verringerung der Emissionsmasse ist vermutlich eher durch eine verbesserte physische Filtration bedingt als durch chemische Reaktionen. Der Einsatz von UV-Lampen in gewerblichen Küchenlüftungen verursacht demnach zusätzliche Kosten ohne messbaren Nutzen.

LITERATURHINWEISE

- Gerstler, W.D., Kuehn, T.H., Pui, D.Y.H.; Ramsey, J.W. Measurements of the Effluent from Hamburger Cooked on a Gas Underfired Broiler; *ASHRAE Trans.* 1999, 105 (Pt 2), 303–315.
- Kuehn, T.H.; Gerstler, W.D.; Pui, D.Y.H.; Ramsey, J.W. Comparison of Emissions from Selected Commercial Kitchen Appliances and Food Products; *ASHRAE Trans.* 1999, 105 (Pt 2), 128–141.
- Kuehn, T.H.; Olson, B.A.; Ramsey, J.W.; Rocklage, J.M. Comparison of Emissions from Selected Commercial Kitchen Appliances and Food Products; *ASHRAE Trans.* 2009, 115 (Pt 1), 360–371.
- Kuehn, T.H.; Olson, B.A.; Ramsey, J.W.; Rocklage, J.M. Comparison of Emissions from Selected Commercial Kitchen Appliances and Food Products; *ASHRAE Trans.* 2009, 115 (Pt 2), 126–137.
- Rogge, W.F.; Hildemann, L.M.; Mazurek, M.A.; Cass, G.R.; Simoneit, B.R. T. Sources of Fine Organic Aerosol. 1. Charbroilers and Meat Cooking Operations; *Environ. Sci. Technol.* 1991, 25, 1112–1125; doi: 10.1021/es00018a015
- South Coast Air Quality Management District Rule 1138, Control of Emissions from Restaurant Operations, 1997. [www.aqmd.gov/hb/1997/97066a.html](http://www.aqmd.gov/hb/1997/97066a.html).
- Bay Area Air Quality Management District Regulation 6, Rule 2, Commercial Cooking Equipment, 2007. [www.baaqmd.gov/Divisions/Engineering/Equipment-](http://www.baaqmd.gov/Divisions/Engineering/Equipment-)

- Registration/Charbroiler.aspx.
8. Hinds, W.C. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*; John Wiley & Sons: New York, 1999; pp 191–196.
  9. *UL 710 Standard for Safety—Exhaust Hoods for Commercial Cooking Equipment, Edition 5*; Underwriters Laboratory: Northbrook, IL, 2010.
  10. *UL 1046 Standard for Safety—Exhaust Hoods for Commercial Cooking Equipment, Edition 4*; Underwriters Laboratory: Northbrook, IL, 2010.
  11. Schrock, D.W.; Olson, B.A.; Urness, R.J.; Kuehn, T.H.; Breitenfeld, A.L. A New Standard Method of Test for Determining the Grease Particulate Removal Efficiency of Filter Systems for Kitchen Ventilation; *ASHRAE Trans.* 2006, 112 (Pt 1), 583–590.
  12. ASTM Standard F 2519 – 05. *Standard Test Method for Grease Particle Capture Efficiency of Commercial Kitchen Filters and Extractors*; ASTM International: West Conshohocken, PA, 2005.
  13. Livchak, A.; Schrock, D.; Lehtimäki, M.; Taipale, A. The Facts about Mechanical Grease Filters; *ASHRAE J.* 2003, 45, Kitchen Ventilation Supplement, K14–K17.
  14. Farrell, F.M.; Fitch, T.M.; Morgan, M.J. Development and Performance of a Retrofittable, High-Efficiency, Grease Filter System for Kitchen Hoods; *ASHRAE Trans.* 2007, 113 (Pt 1), 548–557.
  15. Livchak, A.; Schrock, D. Ultraviolet Light—Seeking Out and Destroying Grease; *The Consultant*, 2003, 111–117.
  16. Grace, J. *Exploring UV Technology, Restaurant Facility Business*; France Media, Inc.: Atlanta, GA, June 2008; pp 38–41.
  17. Kowalski, W. *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook*; Springer: Berlin, 2009, p 337; doi: 10.1007/978-3-642-01999-9.
  18. Farrell, F.M. Cooking Emissions and the (Supposed) Light Fantastic; The Consultant, Foodservice Consultants Society International: Toronto, First Quarter 2010; pp 40–41.
  19. Rogge, W.F.; Hildemann, L.M.; Mazurek, M.A.; Cass, G.R.; Simoneit, B.R. Source Apportionment of Airborne Particulate Matter Using Organic Compounds as Tracers; *Atmos. Environ.* 1996, 30, 3837–3855; doi:10.1016/1352-2310(96)00085
  20. Roe, S.M.; Spivey, M.D.; Lindquist, H.C.; Hemmer, P.; Huntley, R. National Emissions Inventory for Commercial Cooking; Presented at 13th International Emission Inventory Conference, Clearwater, FL, June 8–10, 2004. [www.epa.gov/ttn/chieff/conference/ei13/index.html#ses-1](http://www.epa.gov/ttn/chieff/conference/ei13/index.html#ses-1). (accessed August 3, 2011). [vp]. 2004.
  21. McDonald, J.D.; Zielinska, B.; Fujita, E.M.; Sagebiel, J.C.; Chow, J.C.; Watson, J.G. Emissions from Charbroiling and Grilling Chicken and Beef; *J. Air Waste Manage. Assoc.* 2003 53 185 194
  22. Zhao, Y.; Hu, M.; Slanina, S.; Zhang, Y. The Molecular Distribution Of Fine Particulate Organic Matter Emitted From Western-Style Fast Food Cooking; *Atmos. Environ.* 2007, 41, 8163–8171.
  23. Nolte, C.; Schauer, J.; Cass, G.; Simoneit, B.R.T. Highly Polar Organic Compounds Present in Meat Smoke; *Environ. Sci. Technol.* 1999, 33, 3313–3316.
  24. Gerstler, W.D.; Kuehn, T.H.; Pui, D.Y.H.; Ramsey, J.W.; Rosen, M.; Carlson, R.R.; Peterson, S.D. *Identification and Characterization of Effluents from Various Cooking Appliances and Processes as Related to Optimum Design of Kitchen Ventilation Systems*; 745-RP, Phase II, Final Report; ASHRAE: Atlanta, GA, 1998 (Revised February, 1999).
  25. Schauer, J. J.; Kleeman, M.J.; Cass, G.R.; Simoneit, B.R.T. Measurement of Emissions from Air Pollution Sources. 1. C1 through C29 Organic Compounds from Meat Charbroiling; *Environ. Sci. Technol.* 1999, 33, 1566–1577.
  26. Ziemann, P.J. Aerosol Products, Mechanisms, and Kinetics of Heterogeneous Reactions of Ozone with Oleic Acid in Pure and Mixed Particles; *Faraday Discuss.* 2005, 130, 469–490.
  27. Vesna, O.; Sax, M.; Kalberer, M.; Gaschen, A.; Ammann, M. Product Study of Oleic Acid Ozonolysis as Function of Humidity; *Atmos. Environ.* 2009, 43, 3662–3669.

#### Über die Autoren

F.M. (Tim) Farrell leitete Forschungs- und Entwicklungslabors in drei größeren Unternehmen in St. Paul, Minnesota und Deutschland. Zurzeit berät er Unternehmen aus der gewerblichen Küchenlüftung und anderen Branchen in Technologiefragen und bei der Geschäftsentwicklung. Thomas M. Fitch arbeitete in der Filterforschung und -entwicklung und ist zurzeit für Aveka, Inc., in Woodbury Minnesota als Berater der gewerblichen Küchenlüftungsbranche tätig. Merlin K.L. Bicking, Ph.D., ist Vorstandsvorsitzender bei ACCTA, Inc., einer Analyse- und Beratungsfirma in St. Paul, Minnesota. Fragen und Anregungen bitte an: Tim Farrell, 552 Summit Avenue, Saint Paul, MN 55102; E-Mail: [tim@farrell4593.com](mailto:tim@farrell4593.com).