

Gutachten zur Begriffserklärung und Einschätzung des Red Arrow Verfahrens für das Räuchern von Lebensmitteln

Von der Firma Red Arrow wurde ein Räucherverfahren für Lebensmittel entwickelt, das sich von den konventionellen Verfahren unterscheidet. In diesem Gutachten sollen hierzu folgende Fragen beantwortet werden:

- (1.) Handelt es sich bei den Materialien, die durch das Red Arrow-Verfahrens erzeugt werden, um „Rauch“ im naturwissenschaftlichen Sinne?
- (2.) Welche Unterschiede gibt es zwischen den mittels des Red Arrow-Verfahrens erzeugten Stoffen und dem Rauch, wie er bei der Verbrennung von Holz entsteht?
- (3.) Erfüllt die Behandlung von Lebensmitteln mit den mittels des Red Arrow-Verfahrens erzeugten Stoffen die gängige Erwartung an ein „Räucherverfahren“ (vgl. auch Reibrauch- und Dampfrauchverfahren)?

Zur Orientierung ist unten ein Glossar angefügt bestehend aus einer Liste von Definitionen relevanter Begriffe zusammen mit notwendigen dazugehörigen Erklärungen. Diese Termini werden in dem Gutachten verwendet, wobei in den Begriffserklärungen zum Teil schon direkt Bezug auf das Red Arrow-Verfahren genommen wird. Nicht alle der gelisteten Begriffe kommen explizit im Text vor, sondern einige sind zum leichteren Verständnis der physikalisch-chemischen Zusammenhänge dazu gestellt worden. Weil die sich die Definition einiger Begriffe – trotz der naturwissenschaftlichen Hintergründe – allgemein und im Zusammenhang mit dem Red Arrow-Verfahren als schwierig herausstellt, wurden die Definitionen selbst kategorisiert in „stringente Definition“, „operationelle Definition“ und „heuristische Definition“. Eindeutigkeit, Präzision, und Abgrenzbarkeit von anderen Begriffen sind bei stringenter Definition am höchsten und bei heuristischen Definitionen am niedrigsten ausgeprägt. Die inhärenten Unschärfen – besonders bei den Begriffen des Rauches und des Nebels – spielen bei der Einschätzung der Natur des Red Arrow-Verfahrens eine gewisse Rolle.

(ad 1.) Nach meiner Einschätzung handelt es sich bei dem Red Arrow-Verfahren um ein Räucherverfahren. Dies begründe ich folgendermaßen:

- Der Erzeugung der die Aromen transportierenden Aerosolpartikel erfolgt, wie bei den traditionellen Räucherverfahren auch, durch einen Verbrennungsvorgang.
- Das Brennmaterial besteht wie bei den konventionellen Verfahren aus Biomassen, also Holz, Nadeln von Bäumen, Holzmehl oder -spänen und dergleichen. Beim Red Arrow-Verfahren wird unbehandeltes, getrocknetes Sägemehl in einem kontrollierten Prozess verbrannt.
- Die gemessenen Größenverteilungen der Aerosolpartikel des Red Arrow-Verfahrens haben ein Maximum bei Partikelgrößendurchmessern von 0.7 Mikrometern und 97% aller Partikel sind kleiner als 1,5 Mikrometer. Bezüglich der Partikelgrößen und des Maximums der Größenverteilungen entsprechen diese Werte genau unseren eigenen Labormessungen zu Rauch-



Aerosolen aus Verbrennungen von Eichen- und Buchenholz, Gräsern und anderen biogenen Materialien (siehe in den Referenzen unten: Schneider et al., 2006).

- Beim Red Arrow-Verfahren werden die ursprünglichen festen Rauchpartikel einer nachfolgenden, zusätzlichen Prozessierung in der flüssigen Phase unterzogen. Dabei werden die Aerosolpartikel in der Flüssigkeit als „gereinigtes Rauchkondensat“ suspendiert, also in Hydrosolpartikel konvertiert. Die Rauchpartikel lösen sich hierdurch in der Flüssigkeit nicht, oder zumindest nicht vollständig auf. Das Hydrosol wird sodann wieder in ein Aerosol transformiert und es ist nicht mehr die Flüssigkeit, die die Partikel „trägt“, sondern wieder die Luft. Die Partikel des erzeugten Aerosols haben die o.a. Größenverteilungen und bestehen aus den gereinigten Verbrennungspartikeln, die mit einer Flüssigkeitsschicht aus Wasser und den darin gelösten Substanzen bedeckt sind. Das heißt, die aus der Holzverbrennung erzeugten ursprünglichen Verbrennungsaerosolpartikel werden in gereinigter Form zusammen mit den in ihnen enthaltenen Aromastoffen auf- bzw. in die Lebensmittel eingebracht.
- In der Räucherammer des Red Arrow-Verfahrens¹, die die zu behandelnden Lebensmittel enthält, herrschen relative Luftfeuchten zwischen 90% und 100 % bei 25 °C. In einer solchen Umgebung können die Aerosolpartikel durch Kondensation von gasförmigem Wasserdampf schnell auf Größen über 10 Mikrometer heranwachsen, so dass sich in der Räucherammer ein optisch dichter Nebel bildet. Genau genommen erfolgt ein Wachstum reiner Wassertröpfchen nur bei relativen Feuchten oberhalb von 100%. Anhand des angegebenen pH Wertes von 2,5 bis 3,0 für die aerosolen SMOKEZ Primärrauchprodukte von Red Arrow kann aber geschlossen werden, dass sich gelöste Materialien in der wässrigen Flüssigkeit befinden. Diese führen auf Grund des sogenannten physikalisch-chemischen Raoult Effektes solcher Lösungen zu einem Tröpfchenwachstum schon bei Feuchten unterhalb von 100%. Die Kleinsttröpfchen, die die Festanteile der Rauchpartikel enthalten, werden in der feuchten Umgebung also durch Kondensation von Wasserdampf zu einer gewissen Gleichgewichtsgröße heranwachsen.

Nach meiner Einschätzung handelt es sich mit den angeführten Gründen aus naturwissenschaftlicher Sicht und im Sinn der Begriffsdefinition um „Rauch“, der zentraler und begriffsgebender Bestandteil des gesamten Verfahrens ist. Dies wird auch dadurch deutlich, dass die Lebensmittel dieselben Standzeiten in der Räucherammer aufweisen (müssen), wie solche Produkte, die in konventionellen Anlagen geräuchert werden. Dadurch ist auch belegt, dass sich die stofflichen Räucherprozesse entsprechen.

(ad 2.) Bei der Verbrennung von Holz entsteht direkt frischer, trockener, heißer Rauch aus festen Aerosolpartikeln, mikroskopischen Tröpfchen (beispielsweise aus nichtflüchtigen organischen Verbindungen wie Ölen, Säuren), Dämpfen und Gasen. Gesundheitsgefährdende Schadstoffe können in jeder dieser Komponenten enthalten sein. Trockene, reine, frische Verbrennungspartikel, die ohne das von Red Arrow verwendete Verfahren direkt vom Schornstein eines Verbrennungssofens in die Räucherammer eingeleitet würden, bildeten einen dichten Nebel, weil die Temperaturen (im Vergleich zur Verbrennungstemperatur) niedrig sind und die Luftfeuchten hoch. Dies trifft gleichermaßen auf die konventionellen Verfahren des Räucherns mit Glimmrauch oder Reiberauch zu, wie auf das Verfahren von Red Arrow. In allen Fällen findet ein Größenwachstum der Partikel bis zu einer endgültigen, stabilen Gleichgewichtsgröße statt. Nach meinen Berechnungen (folgend Gutacker, 2004; s. Literaturreferenzen unten) dauert dieser Wachstumsprozess Sekunden bis Minuten. Bei so kurzen Wachstumszeiten kann es tatsächlich verfahrensbedingte, allerdings nur kleinere Unterschiede geben. Da aber die Expositionszeiten der Lebensmittel bei den verschiedenen Verfahren Tage bis Wochen betragen, wird zwischen den Nebeln im Gleichgewichtsendzustand kaum ein Unterschied bestehen. (Bei erheblich kürzeren Expositionszeiten

¹ In Augenschein genommen wurde das Kalträucherverfahren, die nachfolgenden Ausführungen gelten aber auch für Warmräucherverfahren [30 bis 50 °C, 50 – 100 % r.F.] und Heißräucherverfahren [50 bis 90 °C, 50 – 100 % r.F.] gleichermaßen.



–etwa im Minutenbereich-, wäre dies anders.) Ob dieser Nebel in der Räucherammer also (1.) durch Verbrennung mit direkt nachfolgender Wasserdampfkondensation entsteht, oder (2.) durch Verbrennung plus Flüssigphasenbehandlung nach Red Arrow sowie der danach erfolgenden Wasserdampfkondensation erzeugt wird, bedeutet für die zu behandelnden Lebensmittel nach meiner Einschätzung keinen signifikanten Unterschied. Allerdings ermöglicht das Verfahren nach Red Arrow die Entfernung von Schadstoffen, die bei der ursprünglichen Verbrennung entstehen, sowie eine konstante und reproduzierbare Prozessabfolge.

(ad 3.) Beim Reibrauchverfahren entsteht der Rauch durch mechanische Reibung von größeren Holzstücken an schnell rotierenden Maschinenteilen, wodurch Temperaturen über 300 Grad Celsius entstehen. Beim Dampfrauchverfahren wird der Rauch aus dem Holz nicht durch offenes Feuer erzeugt, sondern durch die Exposition des Brennstoffs in Wasserdampf, der 300 bis 600 Grad heiß ist. Bei diesen hohen Temperaturen beider Verfahren werden manche der Schadstoffe (z.B. Teer, polyzyklische Aromaten) direkt zerstört, so dass das Abgas weniger schädliche Emissionen enthält. Wenn die „gängige Erwartung“ bezüglich des Räucherns darin besteht, dass die zu behandelnden Lebensmittel direkt im Rauch über einer offenen Flamme exponiert werden, so entsprechen Reibrauchverfahren, Dampfrauchverfahren und das Verfahren von Red Arrow nicht dieser Erwartung. Da aber auch durch diese Methoden die in den Rauchpartikeln enthaltenen Aromastoffe auf die behandelten Lebensmittel aufgebracht werden und die Erzeugung des Rauchgeschmacks durch Verbrennung oder Hitzeexposition von Holz entstehen, sind auch die modernen Verfahren in ihrem Ursprung Räucherverfahren.

Glossar relevanter Begriffsfeststellungen und detailliertere Erläuterungen:

Definition, stringente: Die Definition eines Begriffs oder einer Größe auf Grund von erwiesenen physikalischen bzw. naturwissenschaftlichen Sachverhalten; meistens auf quantitativen Zusammenhängen beruhend und daher präzise eingrenzbar. Durch diese Definitionen werden Begriffe oder Größen in eindeutiger Weise festgelegt, so dass kein abweichendes Begriffsverständnis möglich ist. **Beispiele:** Natürliche Zahl, Kugel, Stärke eines elektrischen Stroms, Wärme, Kraft.

Definition, operationelle: Definition einer Größe oder eines Begriffs auf Grund eines oder mehrerer Messverfahren. Häufig unschärfere Definitionen, weil verfahrensabhängig. Im Gegensatz zur physikalisch technischen Definition können sich operationelle Definitionen im Lauf der Zeit ändern, wenn neue und/oder bessere Messverfahren erfunden werden, oder eine Methode eine genauere Eingrenzung erlaubt. **Beispiele:** Ruß nach Euro IV Norm, „schwarzer Ruß“ (engl.: black carbon), Bruttoinlandsprodukt.

Definition, heuristische: Versuch, einen Begriff oder eine Größe festzulegen durch verbale, nicht quantitative, oder nicht genügend genaue quantitative Beschreibungen. Solche Definitionen, die bezüglich ihrer Unschärfe bis ins Umgangssprachliche gehen können, beruhen auf vernünftigen (oder zumindest vernünftig erscheinenden) Annahmen, oder Arbeitshypothesen. Sie sind meistens als vorbehaltlich zu verstehen, solange bis durch neue Erkenntnisse stringente Definitionen formuliert werden können. **Beispiele:** Nachhaltigkeit, Wolke, Rauch. Die Unschärfe der heuristischen Definitionen kann auch daher kommen, dass auch in der Naturwissenschaft verschiedene Meinungen darüber bestehen können, was mit dem Begriff subsumiert ist. So beziehen manche Wissenschaftler eine Vulkanausbruchsfahne in den Begriff der „Wolke“ mit ein, während andere unter Wolken nur von der Atmosphäre selbst gebildete Hydrometeorensembles verstehen.



Gas: Ein Ensemble aus sich frei bewegendem, durch starke Kräfte nicht miteinander verbundenen Atomen oder Molekülen, das einen leeren Raum vollständig und homogen ausfüllt. (Stringente Definition, die aus der Molekülphysik und Thermodynamik ableitbar ist.)

Dampf (engl. vapor): Einem Trägergas (meistens Luft) beigemischte gasförmige, reine chemische Substanz, die durch Verdampfung/Verdunstung aus ihrer chemisch gleichen Flüssigkeit entstanden ist, und die durch Kondensation wieder in die Flüssigkeit zurückgeführt werden kann. Auch Feststoffe (wie z.B. Eis) können die Quelle des Dampfes sein und dann spricht man von Sublimation bzw. Resublimation. Verdampfung ist der Vorgang, bei dem Moleküle einer Flüssigkeit spontan in die Gasphase übergehen und damit den Dampf bilden. Bei der Kondensation gehen die Moleküle aus dem Dampf wieder in seine (also chemisch gleiche) Flüssigkeit zurück. Wassermoleküle verdunsten/verdampfen aus einer flüssigen Wasserfläche in die Luft und bilden dort den unsichtbaren Wasserdampf. Gasförmige Wasserdampfmoleküle kehren durch Kondensation wieder in die Flüssigkeit zurück. Auch von einem festen Eiswürfel dampfen Wassermoleküle in die Gasphase ab (d.h. Sublimation). Umgekehrt können Wassermoleküle aus dem gasförmigen Dampf auf die Oberfläche des Eises auftreffen, dort wieder im Molekülgitter des festen Eises fest verankert und somit zum Bestandteil des Eises werden (Resublimation). Dampf ist –neben den mikroskopischen Tröpfchen– ein wichtiger Bestandteil des Nebels.

Aerosolpartikel (auch Partikel, „Teilchen“): Ein Aerosolpartikel ist ein Materiestückchen bestehend aus einem Aggregat von Atomen, Molekülen (oder beidem), die durch genügend starke Kräfte aneinander gebunden sind. Die Kräfte verhindern, dass das Aggregat sofort wieder zerfällt und seine Bestandteile in die Gasphase (i.e. meistens die Luft) übergehen. Der Aggregatzustand von Aerosolpartikeln kann fest, flüssig, „fluffy“ (eine amorphe Form), oder gemischtphasig sein. Gemischtphasige Partikel bestehen aus flüssigen **und** festen Komponenten, wobei meistens ein festes, unlösliches Partikel von einer Flüssigkeitsschicht umgeben ist. Dies ist bei dem Aerosol der Fall, das bei dem Red Arrow-Verfahren hergestellt wird.

Aerosol: Ein Ensemble von diskreten Aerosolpartikeln, die in einem Gas als Trägermedium suspendiert sind. In der Wissenschaft wird unter Aerosol die Gesamtheit aus den Partikeln *zusammen mit* dem Trägergas, in dem sie suspendiert sind, verstanden, die zudem für mindestens einige Sekunden lang stabil sein muss. Hier handelt es sich grenzwertig um eine stringente Definition, weil die Partikelgrößen nicht quantitativ scharf festgelegt sind. Die Größendurchmesser der Partikel eines Aerosols liegen –also unscharf definiert– zwischen etwa 1 Nanometer und 100 Mikrometern.

Hydrosol: Das gleiche, wie das Aerosol, nur dass das Trägermedium hier eine Flüssigkeit ist. Wenn das Hydrosol aus vorher luftgetragenen Partikeln hergestellt wird, dann können lösliche Anteile der ursprünglichen Aerosolpartikel in die Flüssigkeit übergehen. Im Grenzfall können sich die Aerosolpartikel vollständig auflösen. Dies ist zum Beispiel bei einem Aerosol aus Kochsalzpartikeln der Fall, wenn sich die Partikel auf einer Wasserfläche absetzen und sich das kristalline, feste, aber leicht lösliche Salz im Wasser auflöst. Bei dem Verfahren von Red Arrow lösen sich die Aerosolpartikel des ursprünglichen Verbrennungsrauchs beim Übergang zum Hydrosol (und damit zum Rauchkondensat) nicht vollständig auf. An der Oberfläche der Verbrennungsrauchpartikel befindliche chemische Substanzen können –wenn sie löslich sind– in die Flüssigkeit übergehen. Dies ist auch die Basis für die Reinigung der Rauchpartikel, bei der gesundheitsgefährdende Stoffe von den Rauchpartikeln getrennt und entfernt werden. Aromastoffe, die auf oder in den Rauchpartikeln vorhanden sind, werden abhängig von ihrer Löslichkeit vollständig, teilweise oder überhaupt nicht in die Flüssigkeit übergehen.

Staub: (engl. dust): Ein Aerosol aus festen Partikeln, die durch mechanische Desintegration, Zerstörung oder Zertrümmerung makroskopischer Stücke festen Materials erzeugt wurden. (Beispiele für derartige



mechanische Vorgänge sind Mahlen, Zerspanen, Sandstrahlen, Sägen und Schneiden mit schnell rotierenden Maschinen, Schleifen, Schmirgeln, Zerreiben, Zerschneiden, Aufwirbelung –etwa bei Wüstenstaub- etc.) Auch bei der Erzeugung von Reibrauch werden Holzpartikel als Staub entstehen. Die Partikel sind in der Regel von nicht-runder Form und liegen im Größen(durchmesser)bereich von einigen Mikrometern bis etwa 100 Mikrometer. Hierbei handelt es sich weitgehend um eine operationelle Definition.

Rauch (engl. smoke): Im engeren Sinn als ein sichtbares Aerosol definiert, das aus unvollständiger Verbrennung resultiert, und –nur– aus festen Partikeln suspendiert im Gas besteht. Die Partikelgrößen sind in der Regel unter einem Mikrometer. Sie entstehen bei unvollständigen Verbrennungen von festen oder flüssigen Brennstoffen, weil der Brennstoff nicht komplett zu Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Wasserdampf, Licht und Wärme umgewandelt wird. Das unvollständig verbrannte Restmaterial erscheint dann gasförmig und in Aerosolform als Rußpartikel, oder Flugasche. Hierbei handelt es sich um eine heuristische Definition.

[Ruß (engl. soot): Mikroskopische, luftgetragene im Wesentlichen feste und das Licht stark absorbierende Partikel (oder Ablagerungen davon) aus denjenigen Kohlenstoffatomen des ursprünglichen Brennstoffmaterials, die bei der (unvollständigen) Verbrennung keinen Kontakt zu Sauerstoff hatten und demzufolge nicht in gasförmiges Kohlenmonoxid oder Kohlendioxid umgewandelt werden konnten.]

Rauch (engl. smoke): Im weiteren Sinn subsumiert die Rauchdefinition auch das zusätzliche Vorkommen rein flüssiger Aerosolpartikel, etwa von Tröpfchen aus Öl oder Säuren im Submikrometer bis Mikrometerbereich. Hierbei werden zudem auch Festpartikel mit flüssigen Oberflächenbeschichtungen mit einbezogen. Dies ist der Fall bei dem durch das Red Arrow-Verfahren aus SMOKEZ Primära Rauchprodukten erzeugten Aerosol, in dem die Lebensmittel exponiert werden.

Raucharoma (engl.: smoke flavoring): vgl. auch die Definitionen in Art. 3 VO (EG) Nr. 2065/2003: „Primära Rauchkondensat“ ist der gereinigte, wässrige Teil eines kondensierten Rauchs. Dieser Begriff wird auch in der Definition von „Raucharomen“ subsumiert. Die „Primärteerfraktion“ ist die gereinigte Fraktion des wasserunlöslichen Teers, die neben „flüssig“, „fest“ und „gasförmig“ als eine eigene, auf den kondensierten Rauch zurückgehende Phase angesehen wird und eine hohe Materialdichte hat. Dieser Begriff fällt ebenfalls unter die Definitionen von „Raucharomen“. Weiterhin werden als „Primärprodukte“ die „Primära Rauchkondensate“ und „Primärteerfraktionen“ bezeichnet. Daraus hergestellte Raucharomen sind demzufolge Aromen, die durch die Weiterverarbeitung von Primärprodukten gewonnen werden. Sie werden in oder auf Lebensmitteln verwendet, oder sollen dazu eingesetzt werden, um diesen Lebensmitteln ein Raucharoma zu verleihen.

Rauchkondensat (engl.: smoke condensate): Wenn Rauch durch Kontakt mit Wasser in ein Hydrosol überführt wird, bezeichnet man dieses Hydrosol als Rauchkondensat. Ein Rauchkondensat aus Verbrennungsrauch von Holz kann feste Rauchpartikel enthalten, flüssige, wasserunlösliche Öltröpfchen, Teer und andere nichtlösliche Bestandteile. Durch eine Vielfalt an Methoden kann ein Rauchkondensat prozessiert und gereinigt, d.h. von Schadstoffen weitgehend befreit werden. Wenn sich Tabakrauch in der flüssigen Oberflächenschicht des Inneren der Lunge absetzt, entsteht ein –auch teerhaltiges– Rauchkondensat. Die von Red Arrow erzeugten SMOKEZ Primära Rauchprodukte sind ein gereinigtes Rauchkondensat.

Qualm (engl. fume(s), dense smoke, smoulder): Optisch sehr dichter, dunkler, undurchsichtiger Rauch. (Heuristische Definition)

Nebel (engl. Fog): Sichtbares Aerosol aus fein verteilten flüssigen Tröpfchen mit Größendurchmessern von unterhalb 1 Mikrometer bis etwa 200 Mikrometer. Da in einem Nebel ständig Moleküle des flüssigen



Materials in die Gasphase hinein verdampfen und gleichzeitig gasförmige Moleküle der Flüssigsubstanz wieder auf die Tröpfchen kondensieren, ist der Dampf neben der Flüssigkeit der Tröpfchen wesentlicher Bestandteil des Nebels. Ist im Umfeld der Nebeltropfen kein Dampf vorhanden, oder nur zu wenig, „löst sich der Nebel auf“. Physikalisch bedeutet das, dass die Nebeltröpfchen vollständig verdampfen und alle Moleküle der Flüssigkeit in das Gas übergehen. Dies unterscheidet den Nebel auch grundsätzlich von einem Rauch, der beispielsweise aus einer Verbrennung stammt. Ein Rauch aus festen Aerosolteilchen kann unabhängig von Dämpfen bestehen, weil die festen Partikel nicht durch Verdampfung in ein Gas übergehen können.

Die Tröpfchen eines Nebels müssen nicht ausschließlich aus Flüssigmaterial bestehen. Vielmehr können sie in ihrem Inneren auch feste Partikel -demzufolge bestehend aus Materialien, die in der Flüssigkeit unlöslich sind- enthalten. Technische Nebel werden durch Versprühung/Vernebelung erzeugt, oder durch gezielt herbeigeführte Kondensation eines Dampfes auf einem vorher vorhandenen und aus anderen Materialien bestehenden Aerosol (sog. Heterogene Kondensation). Letzteres ist bei dem Verfahren von Red-Arrow der Fall, wobei das a priori vorhandene Aerosol der, die Aromastoffe enthaltene Verbrennungsrauch ist. Würde man in den Nebel aus Flüssigtröpfchen des SMOKEZ Materials, die die ursprünglichen Rauchpartikel enthalten, genügend trockene Luft einmischen, so würde die Flüssigkeit der Nebeltröpfchen verdampfen und ein trockenes Aerosol aus den Rauchpartikeln übrig bleiben, die zudem mit einer Schicht aus nichtflüchtigem, flüssigem Material bedeckt sein können.

Mainz, 9.2.2015,

Prof Dr. Stephan Borrmann
Direktor Abteilung für Partikelchemie
Max Planck Institut für Chemie
Hahn-Meitner-Weg , 55128 Mainz

Anmerkung: Die in diesem Gutachten getroffenen Feststellungen stellen die Ansichten und Einschätzungen des Verfassers dar und sind nicht als offizielle Verlautbarungen des MPI für Chemie oder der Max Planck Gesellschaft zu verstehen.

Literaturreferenzen:

- * Borrmann, S., Atmospheric Chemistry, Vorlesungsskript zum Modul “Met-ChA” des Masterstudiengangs „Meteorologie“ an der Universität Mainz, 2015.
- * Gutacker, H., Wachstum von Tropfen im molekularkinetischen, Übergangs- und Kontinuumsbereich, Diplomarbeit, Arbeitsgruppe Partikelchemie von Prof. Borrmann, Universität Mainz, 2004.
- * Hinds, W. C., Aerosol Technology – Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, 2nd Edition, Wiley Interscience, 1999.



- * Jacobson, M. Z., Air Pollution and Global Warming – History, Science and Solutions, 2nd Edition, Cambridge University Press, 2012.
- * Möller, D., Luft – Chemie, Physik, Biologie, Reinhaltung, Recht, de Gruyter, 2003.
- * Schneider, J., S. Weimer, F. Drewnick, S. Borrmann, G. Helas, P. Gwaze, O. Schmid, M. O. Andreae, U. Kirchner, Mass spectrometric analysis and aerodynamic properties of various types of combustion-related aerosol particles, International Journal of Mass Spectrometry, 258, 37-49, 2006.
- * Seinfeld, J. H., S. N. Pandis, Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change, 2nd Edition, Wiley, 2006.