



Schriftenreihe

Siedlungswasserwirtschaft und Umwelt

Heft
10

Norbert B. Knieling

**Gekoppelte fluidmechanische Modelle
für Desinfektionsvorgänge und deren Effizienz
in UV - Reaktoren**

Cottbus 2006

Herausgeber:
Lehrstuhl Wassertechnik und Siedlungswasserbau
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. R. Koch

ISBN 3-934294-16-2

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. R. Koch
Lehrstuhl Wassertechnik und Siedlungswasserbau
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus

Vertrieb: Eigenverlag des Lehrstuhls Wassertechnik und Siedlungswasserbau
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus
Postfach 10 13 44
03013 Cottbus
Tel. 0049-355-69-4302
Fax: 0049-355-69-3025
e-mail: wassertechnik@tu-cottbus.de

Alle Rechte vorbehalten. Wiedergabe nur mit Genehmigung des
Lehrstuhls Wassertechnik und Siedlungswasserbau der Brandenburgischen
Technischen Universität Cottbus, Postfach 10 13 44, 03013 Cottbus

Cottbus 2006

ISBN 3-934294-16-2

Gekoppelte fluidmechanische Modelle für Desinfektionsvorgänge und deren Effizienz in UV - Reaktoren

Von der Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom - Physiker
Norbert B. Knieling
aus Ruhla in Thüringen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. R. Koch
Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik
Lehrstuhl Wassertechnik und Siedlungswasserbau

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. habil. J. Reif
Fakultät für Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik
Dekan der Fakultät und Lehrstuhl Experimentalphysik II / Materialwissenschaft

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Dezember 2005

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
1.1. Historisches und Allgemeines	5
1.2. Technische und experimentelle Hintergründe	7
2. Aufgabenstellung	9
3. Literaturoswertung und Grundlagen	11
3.1. Biophysikalische, molekularbiologische und mikrobiologische Grundlagen	12
3.1.1. <i>Biophysikalische Grundlagen</i>	12
3.1.2. <i>Molekularbiologische Grundlagen</i>	22
3.1.3. <i>Mikrobiologische Grundlagen</i>	24
3.2. Physikalische Grundlagen	28
3.2.1. <i>Strahlungsverhältnisse im Reaktor (Reaktor - Optik)</i>	29
3.2.2. <i>Fluidmechanik (Reaktor - Hydraulik)</i>	39
3.3. Stand der Technik	45
3.3.1. <i>Analyse der Konstruktionen im UV Reaktorbau - Systematik und Fluidmechanik ...</i>	45
3.3.2. <i>Analyse von Konstruktionen im UV-Reaktorbau - Strahlertechnik</i>	50
3.3.3. <i>Allgemeine Leistungsanforderungen an den UV - Reaktorbau - Normen, Arbeitsblätter, technische Mitteilungen, Merkblätter -</i>	57
4. Entwicklung gekoppelter fluidmechanischer Modelle	63
4.1. Grundgedanke - Gekoppeltes Fluidmechanisches Modell (GFM)	63
4.2. Gekoppelte Fluidmechanische Modelle - Entwicklung	66
4.2.1. <i>Reaktoroptische Komponente (Tangentenmethode)</i>	68
4.2.2. <i>Fluidmechanische Komponente</i>	77
4.2.3. <i>Mikrobiologische Komponente</i>	88
5. Anwendung des GFM und Diskussion der Ergebnisse	93
5.1. Numerische Simulationen, Modell-Berechnungen - Anwendung des GFM	93
5.1.1. <i>Idealer Reaktor</i>	94
5.1.2. <i>Praxis - Reaktor</i>	101
5.3. Vergleich der Methoden - GFM, PSS - Methode und Linienstrahlungsquelle	110
5.3. Rechentechnik und Software	114
5.4. Schlussfolgerungen für weiterführender Experimente	115
6. Zusammenfassung	119
7. Abkürzungsverzeichnis	123
8. Literaturverzeichnis	129
9. Abbildungsverzeichnis	147
10. Tabellenverzeichnis	151
11. Verzeichnis der Anlagen	153
Danksagung	155
Erklärung	157
Thesen zur Arbeit	159

1. Einleitung

1.1. Historisches und Allgemeines

Die uns umgebende Flora und Fauna ist auf das engste mit der Bereitstellung von elektromagnetischer Energie in Form von Licht durch die Sonne und der Existenz und gar dem Überfluss von Wasser verbunden. Wasser und Licht ermöglichen die Photosynthese, die die Grundlage des pflanzlichen Lebens und darauf aufbauend des Lebens allgemein darstellt.

Rund zwei Drittel unseres Planeten sind von Wasser bedeckt. Dort wo dieses Lebenselixier fehlt, gelingt es nur biologischen Spezialisten, die diesen Stoff sicher über lange Zeit speichern und effizient, mit faszinierenden von der Natur im Laufe der Evolution entwickelten Methoden, gewinnen und verwerten können, zu existieren.

Wasser ist ein Urquell und schließlich in unserer Zeit das Lebensmittel mit der höchsten Qualität. Schon früh, vor dem Beginn aller schriftlichen Aufzeichnungen, verstanden es die Menschen Wasser vielfältig zu nutzen; HERRMANN [1]. Es war ein Mittel, den landwirtschaftlichen Ertrag zu ermöglichen und zu erhöhen, diente bereits den frühen Kulturen als Energiereservoir für den Antrieb einfacher Maschinen und gestattete den Transport großer Lasten über weite Strecken; IRMSCHER et al. [2]. Bereits im antiken Rom wurde dem Wasserbauwesen eine große politische Bedeutung beigemessen, indem ein *Curator Aquarium Urbis Romae* gewählt wurde, den Sextus Julius Frontinus, zwischen 40 - 103 unserer Zeitrechnung, innehatte. Die gleichnamige Stiftung bemüht sich heute um die Erforschung wasserwirtschaftlich historischer Bauwerke der Menschheit. Nicht nur als Nahrungsmittel und zur Körperreinigung, sondern auch zum Zweck der sportlichen Betätigung und der allgemeinen Konditionierung nutzten die Menschen schon damals das Wasser.

Der frühen phänomenologischen Erfahrung der Menschheit entspringt außerdem die Weisheit, dass Licht auf den menschlichen Körper und die Psyche eine besondere Wirkung ausübt. So fördert Sonnenlicht die Heilung bei infektiösen Wunden, die Widerstandsfähigkeit der Haut wird durch das maßvolle Sonnen- und Luftbaden erhöht und besondere körpereigene Wirkstoffe werden gebildet, die das allgemeine - körperliche und geistige - Wohlbefinden des Menschen erhöhen. Ein Teil dieser Wirkungen ist den Anteilen der ultravioletten (UV-) Strahlung im Sonnenlicht zuzuschreiben. Deren Existenz wurde nach MARTINY [4] durch die Untersuchungen von RITTER im Jahre 1801 erkannt.

Mit der Entwicklung der Quecksilberdampflampe im späten 19. Jahrhundert und ersten systematischen Untersuchungen hinsichtlich der Wirkung der UV-Strahlung wurden Effekte beobachtet, die zweifelsfrei beweisen, dass die Strahlung solcher UV-Lichtquelle dazu benutzt werden könnte, pathogene mikrobiologische Organismen abzutöten. Der Schluß lag nahe, das Licht der Quecksilberdampflampe in einer Apparatur zur Desinfektion von Trinkwasser zu verwenden.

In der Arbeit von SOMMER [5] wird eine Patentschrift aus dem Jahr 1910 erwähnt, die einen ersten technischen Lösungsansatz diesbezüglich zeigt. Die Darstellung aus der Patentschrift verdeutlicht, dass der Erfinder eine im Zentrum des Reaktors angeordnete Strahlungs(Licht)quelle vom zu desinfizierenden Wasser umströmen lässt. Allerdings standen zu dieser Zeit keine effizienten Strahlungsquellen zur Verfügung, so dass dieser Vorschlag damals nicht in die Praxis über-

führt wurde. Allerdings stellt dieser eine technische Lösung dar, die mit Abwandlungen und Verbesserungen auch noch heute angewendet wird.

Systematische wissenschaftliche Untersuchungen zu der Wirkung der UV-Strahlung stammen nach HARM [6] aus den dreißiger Jahren; H. J. Müller (1927), F.L. Gates (1928), E. Altenburg (1930), A. Hollaender und J.T. Curtis (1935), A. Hollaender und B.M. Duggar (1938) und E. L. Ellis und M. Delbrück (1939). Heutige Arbeiten basieren nach MARTINY [4] und HARM [6] auf diesen Grundlagen.

Die Absicht, mit der UV-Strahlung einer geeigneten leistungsstarken Strahlungsquelle im strömenden Wasser Mikroorganismen zu inhibieren und abzutöten, erfordert Wissen, das aus dem Bereich der Physik der Kontinua stammt und heute in der Fluidmechanik als Teildisziplin der Physik behandelt wird. Berühmte Wissenschaftler, wie Boltzmann, Prandtl, Navier, Stokes u.a. haben wesentliche Grundlagen für dieses Fachgebiet erarbeitet. Bis in die Gegenwart sind die *Navier - Stokes*-partiellen Differentialgleichungen auf Grund ihrer Nichtlinearität nur für wenige Fälle analytisch lösbar. Bei der Durchrechnung von technischen Aufgaben- und Problemstellungen aus dem Gebiet der Fluidmechanik behilft man sich mit Näherungsverfahren der numerischen Mathematik.

Derzeit werden immer exakter fluidmechanische und damit auch hydraulische Probleme (Raumfahrt, Luftfahrt, Schifffahrt, Schienen- und Straßenfahrzeugbau etc.) unter Ansatz der relevanten Methoden der numerischen Mathematik und unter Verwendung moderner leistungsfähiger Rechentechnik gelöst, von denen eine der erfolgreichsten die Finite Element Methode (FEM) ist. Eine Reihe anderer Methoden bauen auf dieser auf und wurden für spezielle Anwendungsfälle weiterentwickelt. Als Beispiel sei die *Lattice - Boltzmann - Methode* genannt; DURST [9]. In der Summe dieser Erfahrungen und von der Aufgabenstellung abgeleitet erlangt die Methode der Finiten Elemente folgerichtig während der Bearbeitung des Themas eine herausragende Bedeutung.

Die Mechanismen hinsichtlich der biologischen Wirksamkeit der UV-Strahlung sind im Labormaßstab durch subtile experimentelle Bestrahlungsserien unter stationären Bedingungen gründlich erforscht. Die optischen Verhältnisse im Reaktorbau werden derzeit befriedigend mit einfachen Modellen berechnet. Allerdings fehlen *Gekoppelten Fluidmechanische Modelle* (GFM), die unter Berücksichtigung des strömenden Mediums (z.B. Wasser) die biologische Wirksamkeit der Strahlung beschreiben und eine adäquate rechentechnische Optimierung der Reaktoren unter Berücksichtigung der optischen Verhältnisse gestatten. Vielmehr bezieht man sich jeweils auf Erfahrungswerte und Konstante die mit den spezifischen experimentellen Methoden in den entsprechenden Teilgebieten (z.B. Dosiswerte) gewonnen wurden. Dieser Umstand stellt ein Dilemma dar, dessen Lösung in Verbindung mit numerischen Rechenmethoden wesentliche Vorteile hinsichtlich der Optimierung von UV-Reaktoren und eine Verfahrensausdehnung in bislang noch nicht genutzte Anwendungsbereiche bringen würde.

1.2. Technische und experimentelle Hintergründe

Durch die Bereitstellung verbesserter und leistungsfähigerer UV-Strahler auf Quecksilberdampfbasis einerseits und den geleisteten wissenschaftlichen Arbeiten zu den Mechanismen der biologischen Wirksamkeit der UV-Strahlung andererseits wurde bereits in den 50er Jahren des vergangenen Jahrhunderts systematisch begonnen, Trinkwasser mit der UV-Strahlung großtechnisch zu desinfizieren (1955 Küsnacht am Rigi nach GELZHÄUSER [10]).

Bis in die 90er Jahre hinein etablierten sich auf dem Markt Firmen, die UV-Reaktoren und deren Strahlungsquelle hauptsächlich zur Reinigung von industriellen Brauch- und Abwässern dimensionieren und produzieren. Dabei wird die UV-Technologie alleinstehend aber auch in Kombination mit anderen chemischen oder mechanisch - chemischen Verfahren eingesetzt. Hinsichtlich des Reaktorbaus ist allen gemeinsam, dass in erster Linie Erfahrungen aus dem chemischen Apparatebau und zweckmäßige fertigungstechnische Prinzipien die konstruktive Auslegung des Reaktors dominieren. Wichtige Ergebnisse hinsichtlich der Verfahrensoptimierung und der Parameterdefinition enthalten die Arbeiten von KOSCHITZKY et al. [11], BERNHARDT [12], SCHLEYPEN et al. [13], LEGAN [14], BERNHARDT [40] JOHNSON et al. [68], SCHEIBLE et al. [69], STOVER et al. [80], SCHEIBLE [94], DANKWERTS [101] u.a.. Die Fachverbände ([15], [16], [17], [19]) und Normungsinstitute [18] legen verbindliche Mindestdosen fest und definieren Typprüfverfahren mit einem wünschenswerten Testorganismus. Da dieser derzeit nicht zur Verfügung steht, wird mit zwei Leitorganismen, *Escherichia coli* und *Bacillus subtilis*, auf einer Wellenlänge $\lambda = 253,7$ nm und einer Bestrahlung H von 40 mJ/cm^2 geprüft. Die Bestrahlung (Dosis) bzw. Bestrahlungsstärke wird mit einem Sensor an geeigneter Stelle - Innenseite der Reaktorauswand - gemessen. Auch die Expositionszeit t_{Ex} wird dabei messtechnisch erfasst.

Während der Bearbeitung des Projektes „Desinfektion von Schwimmhallenwasser“, deren Ergebnisse in [20] bis [22] dargestellt sind, wurden auf der Grundlage bekannter und zum Teil neuer ingenieurtechnischer Ansätze Reaktoren mit verschiedenen Strahlern und verschiedenen Strahleranordnungen geschaffen und diese an einer konkreten Desinfektionsaufgabe, an Schwimmerbeckenwasser und Kiesbettfilterrückspülwasser aus dem Wasseraufbereitungskreislauf einer Schwimmhalle, erprobt. Sowohl während der wissenschaftlichen Zuarbeit für die Konstruktion als auch im Zuge der Durchführung und Auswertung der Experimente mit diesen Reaktoren wurden Schwächen und Mängel an den zur Verfügung stehenden theoretischen Modellen festgestellt. Diese wurden im erheblichen Maße durch die weitestgehend getrennte Behandlung der komplexen Vorgänge im UV-Reaktor (Mikrobiologie, Biophysik, Optik, Fluidmechanik) verursacht und offenbaren in theoretischer Hinsicht die Kluft zwischen den Einzelmodellen, die zur Beschreibung des naturwissenschaftlichen Sachverhaltes herangezogen werden.

Der Einsatz der UV-Technologie in der Schwimmbadtechnik als ein in frage kommender Anwendungsfall, wird seitens der Mikrobiologen mit Skepsis betrachtet und von den Hygienikern derzeit abgelehnt. Die grundlegenden Verfahren „Chlorung“ und „Chlorung / Ozonung“ des Schwimmerbeckenwassers werden als technisch ausgereift und vollendet angesehen. Außerdem garantiert die Chlorung eine Depotwirkung im Schwimmerbecken.

Viele in den Arbeiten [20] und [23] zur Beweisführung herangezogene mikrobiologische und chemische Untersuchungsergebnisse die im Labor und vor Ort im Modellbad erzielt wurden, zeigen aber, dass auch diese Verfahren erhebliche Risiken in sich bergen. Es entstehen durch Chlorung in Folge der Badbenutzung mutagen und canzerogen wirkende chemische Verbindungen. Außerdem werden nicht alle Keime in der erforderlichen Zeit abgetötet. Dies sind Gefahren, die keinesfalls unterschätzt werden sollten, vgl. BLATCHLEY [35], MARTINY et al. ([47], [48]), BOSCH et al. [52], SLADE et al. [60], VENOSA et al. [64], OLIVER et al. [76] u.a..

Die UV-Desinfektion von Schwimmhallenwasser stellt eine, gleichermaßen wissenschaftlich - technische wie betriebswirtschaftliche, attraktive Alternative dar. So werden beispielsweise keinerlei gefährliche Nebenprodukte, die die Chlorung derzeit kennzeichnen, erzeugt und die Umwelt durch einen geringeren Chlorkonsum entlastet. Eine der Verfahrensvoraussetzung ist jedoch die Bereitstellung von optimierten UV-Reaktoren in denen der Desinfektionsvorgang sicher abläuft, d.h. wenn der Reduktionsfaktor RF mindestens den Wert -4 annimmt; vergleiche weiter unten.

2. Aufgabenstellung

Ziel der vorgelegten Dissertation ist es, mikrobiologische, biophysikalische, optische und fluidmechanische Ansätze von einem theoretischen Standpunkt derart zu vereinen, dass für den betreffenden Anwendungsfall mit einem durchgängigen Rechengang der optimale UV-Reaktor dimensioniert werden kann. Ein solches die Einzeldisziplinen verbindendes Modell erhält die Bezeichnung *Gekoppeltes Fluidmechanisches Modell* (GFM) bzw. wenn weitere Gesichtspunkte eine Rolle spielen *Gekoppelte Fluidmechanische Modelle*, vgl. weiter unten.

Für diesen Zweck sollen aufbauend auf dem Erkenntnisstand der Einzeldisziplinen die adäquaten Ergebnisse und Modellansätze ausgewählt und mathematisch erprobt werden.

Eine repräsentative Auswahl der derzeit in der Bundesrepublik Deutschland seitens der Industrie verwendeten UV-Reaktorkonstruktionen sind zu untersuchen und im Einzelnen zu bewerten.

Aus den historischen und gesicherten aktuellen wissenschaftlichen Ergebnissen zur Physik der Strahlungsquellen sind die Erkenntnisse zu werten und zu verallgemeinern, die in der Konstruktionsphase und bei der Berechnung der Desinfektionsvorgänge im UV-Reaktors stets zu berücksichtigen sind.

Die im Rahmen der Arbeit zu entwickelten *Gekoppelten Fluidmechanische Modelle* (GFM) für Desinfektionsvorgänge und deren Effizienz in UV-Reaktoren sind unter dem Aspekt eines theoretischen Modellreaktors (idealer linearer Reaktor) und einer konkreten technischen Anwendung (Praxisreaktor), durch numerische Berechnungen zu erproben.

Die experimentellen Ergebnisse, die in den Arbeiten [20] bis [23] dargelegt werden, dienen hierfür als experimenteller Hintergrund und sind an geeigneter Stelle einzuflechten.

Der Inhalt der Arbeit ist derart aufzubereiten, dass die Ansätze und Verfahrensvorschläge für die Einbindung in ein existierendes CFD-*software*-Paket geeignet ist oder in einer kombinierten Form genutzt und angewendet werden können (*spread-sheet-Lösung*; [145], siehe weiter unten).

In die Modellüberprüfungen und Simulationsrechnungen sind technische - konstruktive Erkenntnisse zu integrieren, die sich aus einer Analyse der Reaktorkonstruktionen ergeben, welche von den führenden Unternehmen der Branche bevorzugt eingesetzt werden. Während der Analyse ist eine Klassifizierungsmethode zu entwickeln, die sich auf den technischen Details der Reaktorkonstruktionen und auf den in diesen verwendeten Strahlungsquellen gründet.

3. Literaturlauswertung und Grundlagen

Die Desinfektion eines Fluids unter Verwendung der UV-Strahlung ist dann erfolgreich, wenn auf die im Fluid befindlichen dem Menschen gegenüber pathogen wirkenden mikrobiologischen Organismen - Bakterien, Viren, Pilze, Sporen - eine solche Wirkung durch Bestrahlung ausgeübt wird, die diese Organismen abtötet. Für diesen Erfolg des Verfahrens sind biophysikalische, molekularbiologische und mikrobiologische Effekte, verursacht durch die Wirkung der ultravioletten Strahlung auf die verschiedenen Spezies, von ausschlaggebender Bedeutung.

Das Medium selbst, in welchem die Desinfektion abläuft, beeinflusst die ultraviolette Strahlung als eine grundlegende Eigenschaft (Extinktionsmodulus m_n , spektraler Reintransmissionsgrad τ), durch in diesem vorhandene Farbstoffe und durch beispielsweise zufällig vorhandenen Partikel, die die mikrobiologischen Spezies vor der Strahlung abschirmen.

Da es sich bei den zweckmäßig zum Einsatz kommenden Strahlungsquellen, wie weiter unten gezeigt wird, um Plasmastrahlungsquellen handelt, ist die Betriebsweise und Rückwirkung des Mediums auf die Betriebsbedingungen des Plasmas zu berücksichtigen.

Optische Effekte, die durch die Strahleranordnung und verwendete Materialien begründet werden, legen eine günstige Bestrahlungscharakteristik fest bzw. sind die Ursache für Verluste. Schließlich bestimmen im entscheidenden Maße physikalische Zusammenhänge und Konsequenzen aus der Fluidmechanik, die ihrerseits durch die konstruktiven Details der Reaktorauslegung und die physikalischen Parameter der Betriebsweise verursacht und definiert werden, die Bestrahlung des Fluids und schließlich des Mikroorganismus. In diesem Zusammenhang ist die Einbindung des Reaktors in eine komplette Apparatur und die dadurch bedingte Rückwirkung nicht zu vernachlässigen. Das Bild 3-1 fasst Einflussfaktoren zusammen, die den Desinfektionsvorgang entscheidend beeinflussen ([4], [6], [20] bis [35], [51], [101], [102] u.a.).

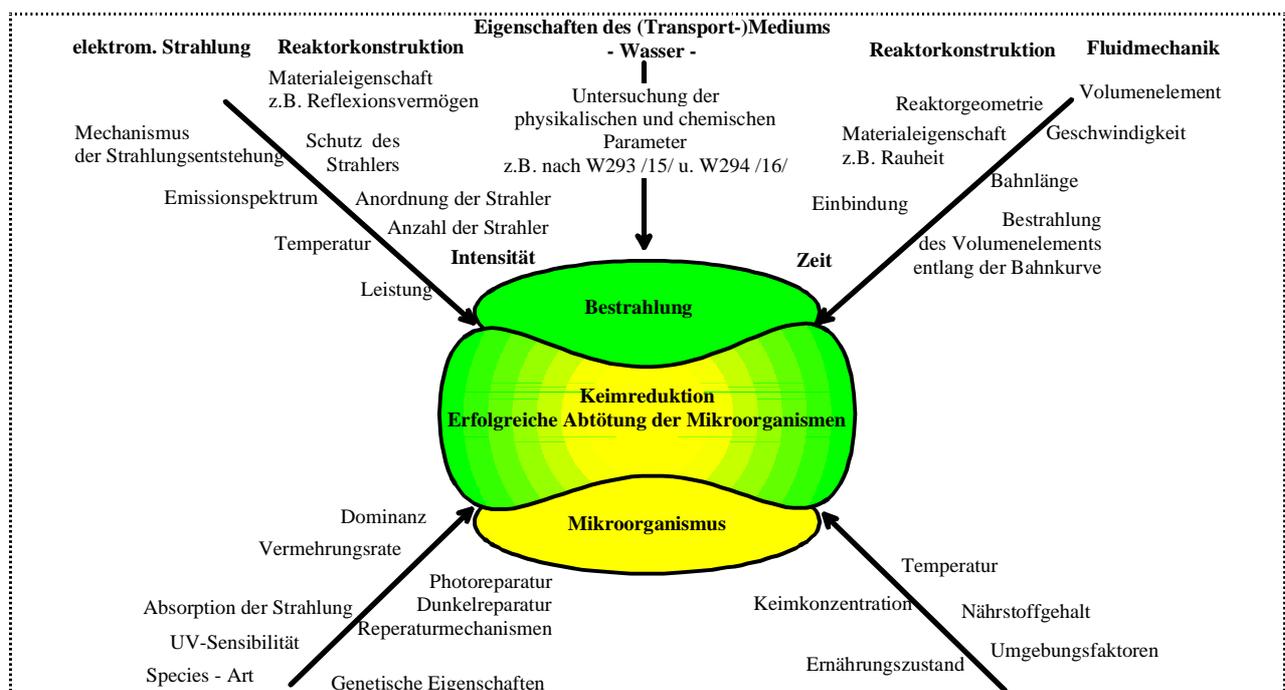


Bild 3-1: Einflussfaktoren auf die erfolgreiche Abtötung von Mikroorganismen

3.1. Biophysikalische, molekularbiologische und mikrobiologische Grundlagen

Aus der Nähe der Biophysik zur Physik und aus der Nähe der Mikrobiologie zur Humanmedizin ergeben sich nach MARTINY [4], SONNTAG [5], HARM [6] u.a. sowohl inhaltliche Unterschiede als auch Unterschiede hinsichtlich der Terminologie der Strahlenfeldgrößen und der photometrischen Größen. In der vorgelegten Arbeit werden die physikalische Definitionen verwandt. Für den Fall, dass die physiologische Wirkung der Strahlung / des Lichtes diskutiert wird, geschieht dies unter Verwendung der Zusammenstellung nach GERTHSEN [105], Seite 567.

3.1.1. Biophysikalische Grundlagen

Die biologische Wirkung der Strahlung beruht auf der Absorption dieser elektromagnetischen Strahlung durch Moleküle, die Bausteine der lebenden Zelle sind. Die Aufnahme der dieser entsprechenden Photonenenergie führt zur Anregung der Elektronen der Atome und der Moleküle. Quantenmechanisch wird dieser Vorgang durch das *Franck-Condon-Prinzip* beschrieben. Die Wahrscheinlichkeit des Elektronenübergangs in ein energetisch höheres Niveau steht im direkten Zusammenhang mit dem *Franck-Condon-Faktor*, dem Quadrat $\langle \chi_i | \chi_f \rangle^2$ der Überlappungsintegrale der Wellenfunktion χ . Dieser Faktor bestimmt die relative Intensität der Banden und Linien der Absorptions- und Emissionsspektren, vgl. Bild 3-2 und TURRO [26], OPPENLÄNDER [27], MASSCHELEIN [28], u.a..

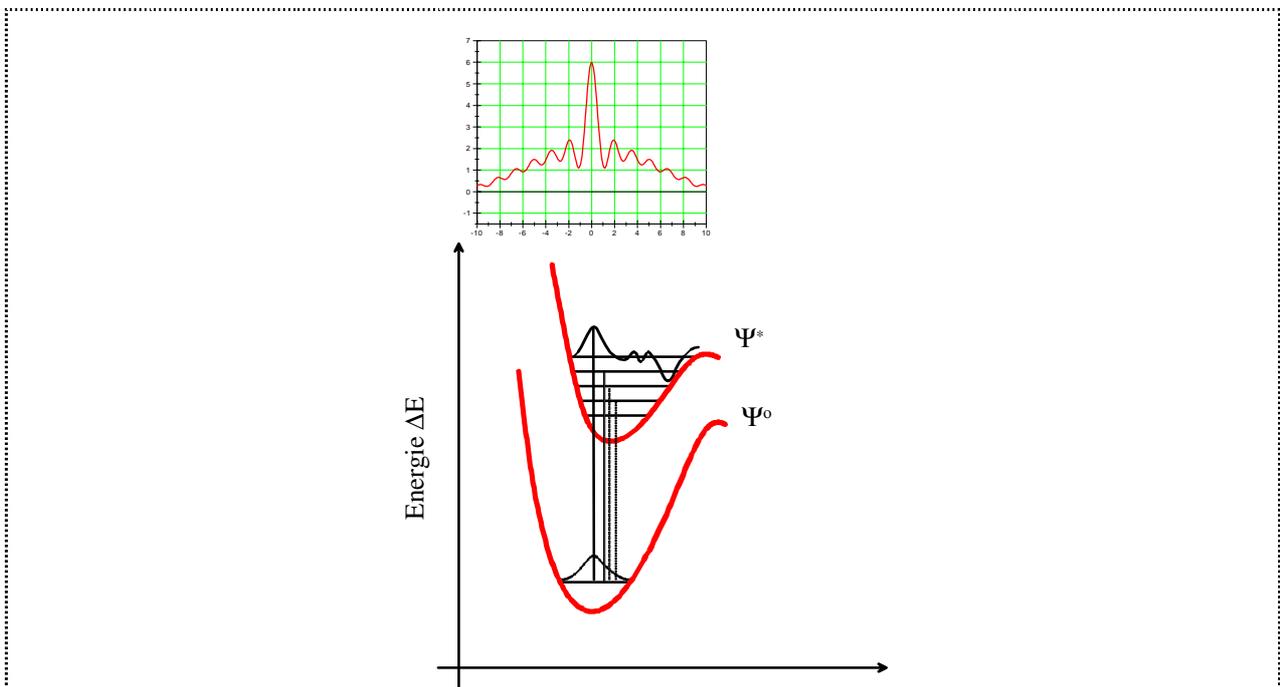


Bild 3-2: Franck-Condon-Prinzip; starke, mittlere, schwache und sehr schwache Absorption schematisch dargestellt

Dieser angeregte Zustand bleibt nur kurze Zeit (10^{-10} bis 10^{-8} s, HARM [6]) erhalten und die absorbierte Energie wird durch die Reemission eines Photons - Fluoreszenz - abgegeben oder durch die Erhöhung der thermischen Energie des Systems in Wärme überführt. Hält der angeregte Zu-

stand über eine längere Zeitspanne an (metastabiler Zustand, 10^{-3} s, HARM [6] und TURRO [26]), steigt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass zwischen den Molekülen im angeregten Zustand photochemische Reaktionen ablaufen. Diese Reaktionen verändern die Moleküle und die chemischen Verbindungen, deren Vorhandensein und Interaktion entscheidend für die Lebensprozesse sind. Natürliche Reaktionsabläufe werden umdirigiert bzw. unterbunden. Bei diesen Molekülen handelt es sich hauptsächlich um die Desoxyribonukleinsäure (DNS), die Ribonukleinsäure (RNS), verschiedene Proteine und um molekulare Komponenten, die unter dem Begriff Chromophoren zusammengefaßt werden. Die DNS und RNS sind unter den vorstehend genannten die wichtigsten, da sie Träger der Erbinformation der lebenden Zelle sind. Gerade die DNS und RNS verfügen über Absorptionsspektren, die in der Nähe der Emissionsspektren der Quecksilber-Niederdruckstrahler ($\lambda_E = 253,7$ nm) liegen. Die Bilder 3-3 und 3-4 zeigen das typische Emissionsspektrum eines Quecksilber-Niederdruckstrahler und zum Vergleich das Emissionsspektrum eines Quecksilber-Mitteldruckstrahlers; jeweils der Firma HERAEUS Noblelight GmbH.

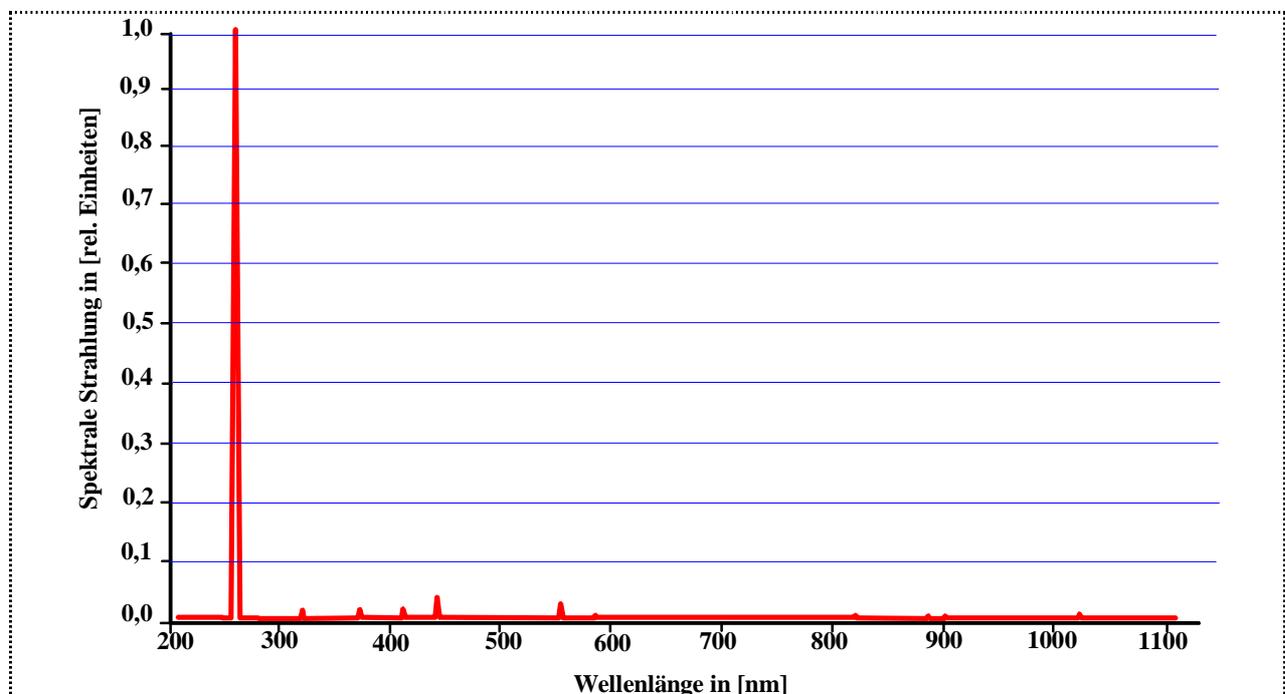


Bild 3-3: Emissionsspektrum eines Quecksilber-Niederdruckstrahlers NN 50/81

Aus diesen Emissionsspektren und den Absorptionsspektren der vorstehend aufgezählten makromolekularen Verbindungen ist ableitbar, dass Quecksilber-Niederdruckstrahler besonders gut geeignet sind, mikrobiologische Spezies abzutöten. Allerdings gibt es weiter unten aufgeführte Bedingungen unter denen der Quecksilber-Mitteldruckstrahler, trotz seines kontinuierlichen Spektrums zweckmäßig und vorteilhaft eingesetzt werden kann, vgl. Bild 3-4.

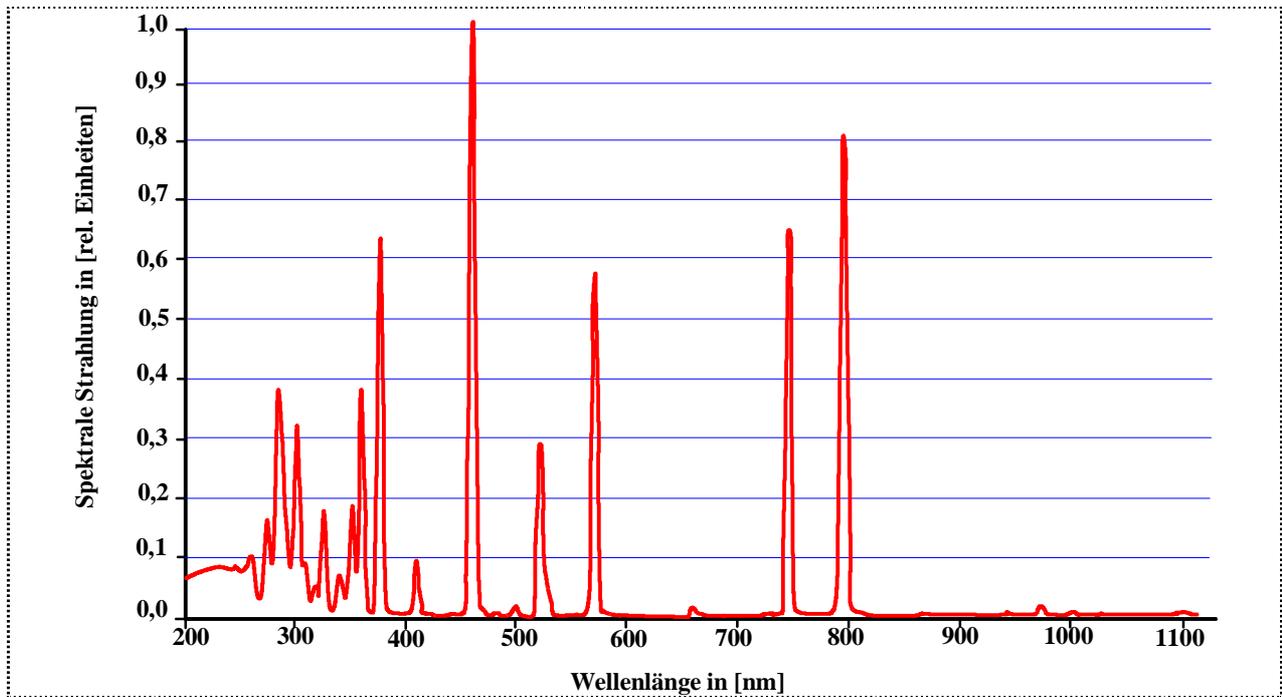


Bild 3-4: Emissionsspektrum eines Quecksilber-Mitteldruckstrahlers DQ 2023

Die Wellenlängenabhängigkeit der Absorption der Strahlung durch die DNS und Proteine zeigt Bild 3-5. Auch andere für den Zellbau und den Zellmetabolismus wichtige makromolekulare Verbindungen, wie Aminosäuren und Chromophoren, weisen hinsichtlich ihrer Absorption von Strahlung eine charakteristische Abhängigkeit von der Wellenlänge auf, Bilder 3-5 bis 3-7 und Tabelle 3 1. Weiterführende Darstellungen dazu findet man bei HARM [6] und TURRO [26].

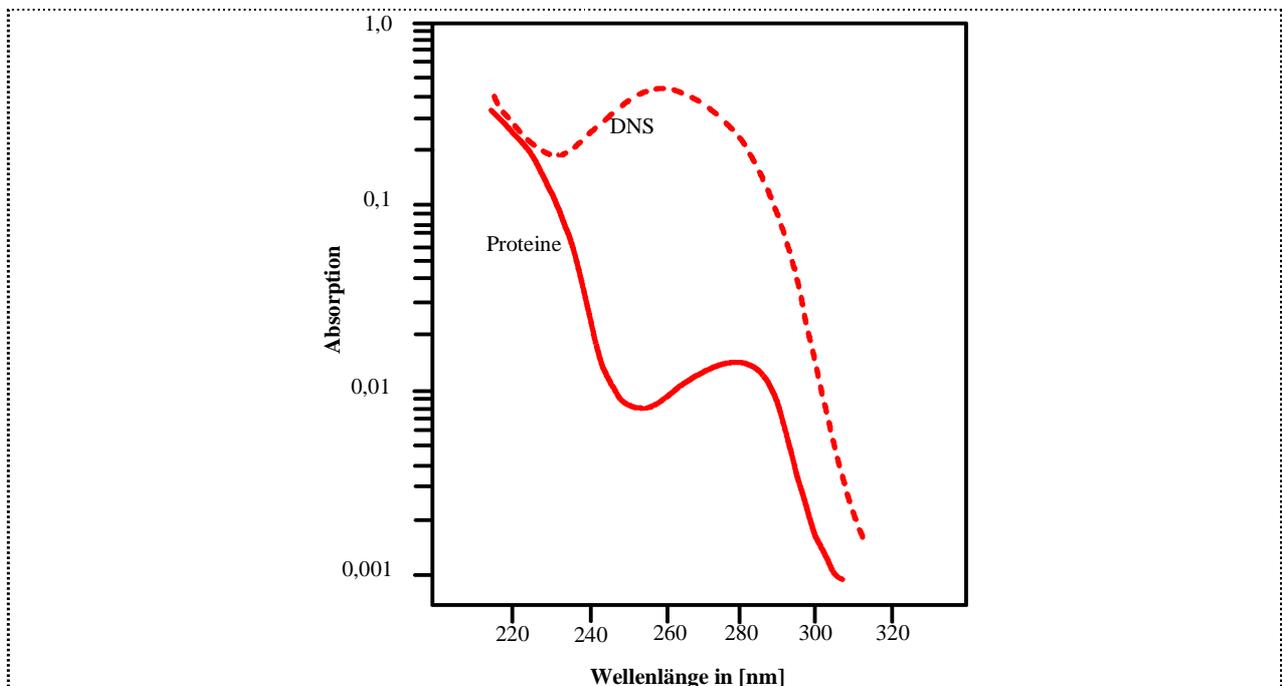


Bild 3-5: Absorptionsspektrum der DNS und Proteine

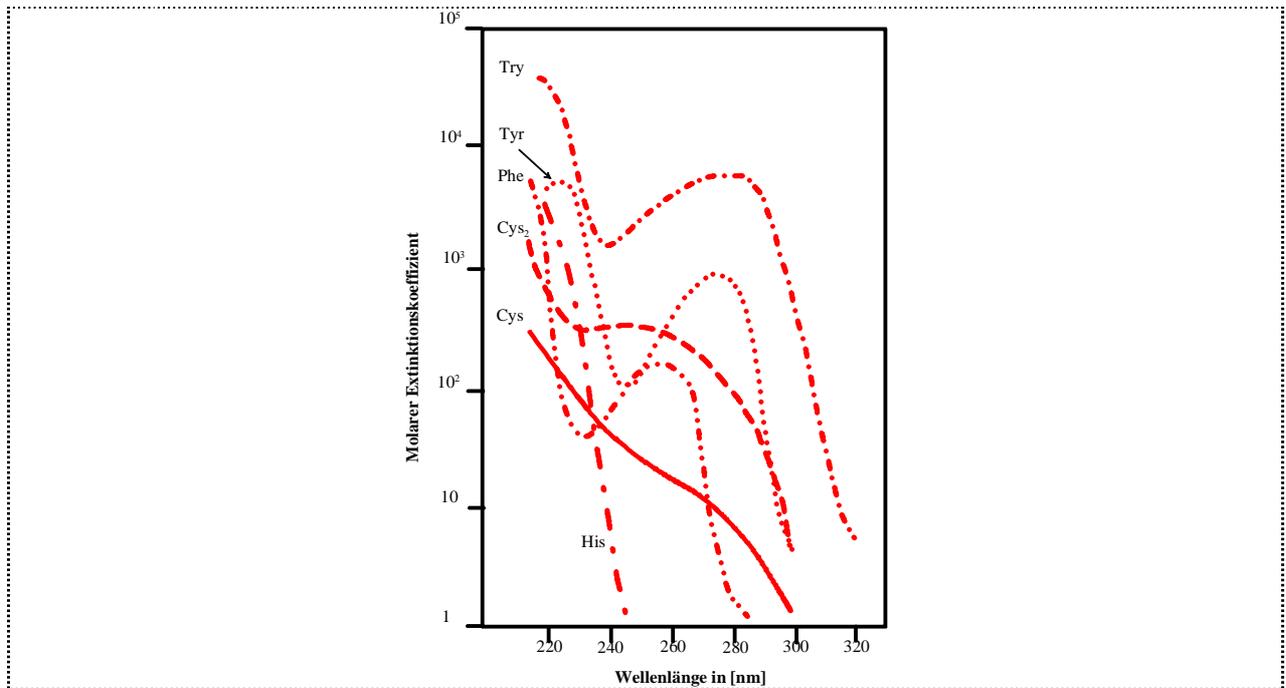


Bild 3-6: Absorptionsspektren von Aminosäuren: Tryptophan (Try), Tyrosine (Tyr), Phenylalanine (Phe), Cystine (Cys₂), Cysteine (Cys), Histidin (His)

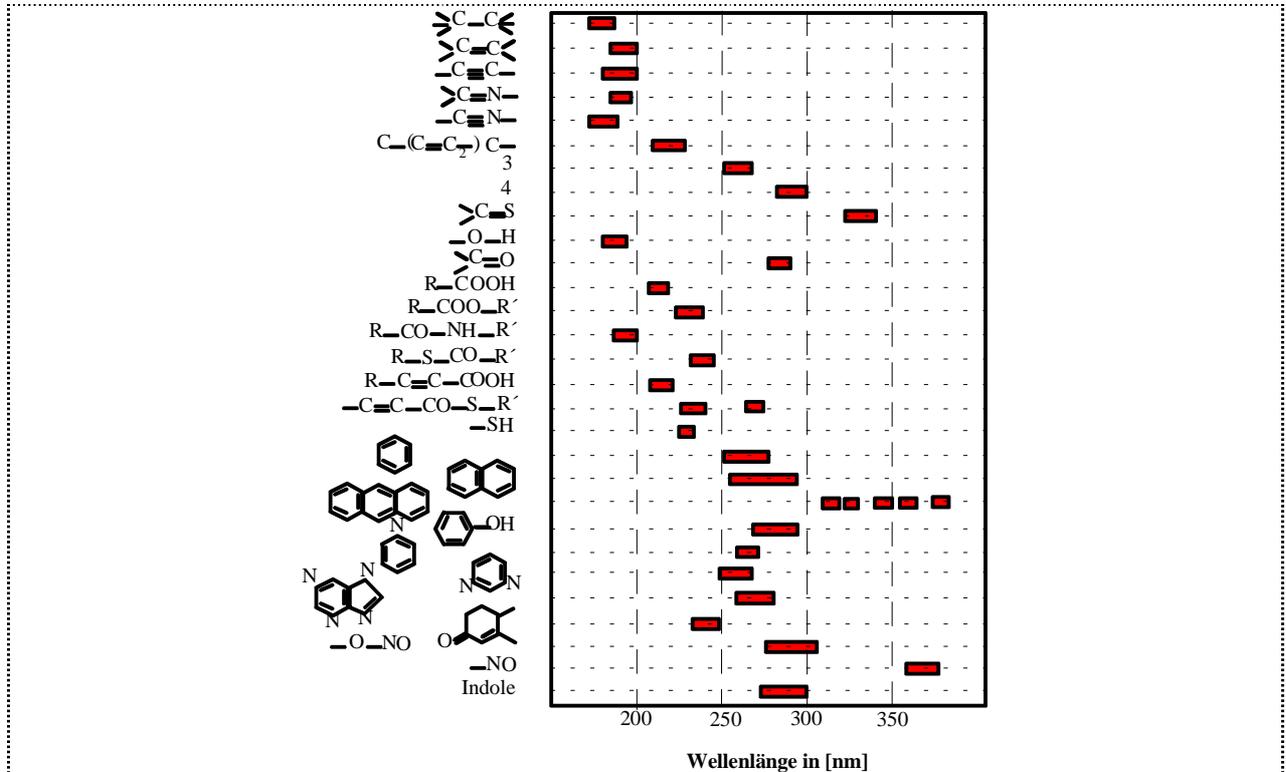


Bild 3-7: Absorptionsbanden verschiedener Chromophoren n. HARM [6], MASSCHELEIN [28]

Tabelle 3-1: Absorptionsmaxima der Chromophoren n. TURRO [26]

Chromophoren	Wellenlänge λ_{max} in [nm]	molare Extinktion ϵ_{max}	Übergangstyp
C-C	< 180	1000	$\sigma \leftrightarrow \sigma^*$
C-H	< 180	1000	$\sigma \leftrightarrow \sigma^*$
C=C	180	10 000	$\pi \leftrightarrow \pi^*$
C=C-C=C	220	20 000	$\pi \leftrightarrow \pi^*$
Benzene	260	200	$\pi \leftrightarrow \pi^*$
Naphtalene	310	200	$\pi \leftrightarrow \pi^*$
Anthracene	380	10 000	$\pi \leftrightarrow \pi^*$
C=O	280	20	$n \leftrightarrow \pi^*$
N=N	350	100	$n \leftrightarrow \pi^*$
N=O	660	200	$n \leftrightarrow \pi^*$
C=C-C=O	350	30	$n \leftrightarrow \pi^*$
C=C-C=O	220	20 000	$\pi \leftrightarrow \pi^*$

Führt man einen Vergleich der Wellenlängenabhängigkeiten der Absorption der Strahlung durch die Nucleinsäure (DNS) und der Tötungsrate des Mikroorganismus *Escherichia coli* durch, fällt die Nähe der Maxima der Absorption der Strahlung durch die DNS und der Tötungsrate zueinander auf, Bild 3-8.

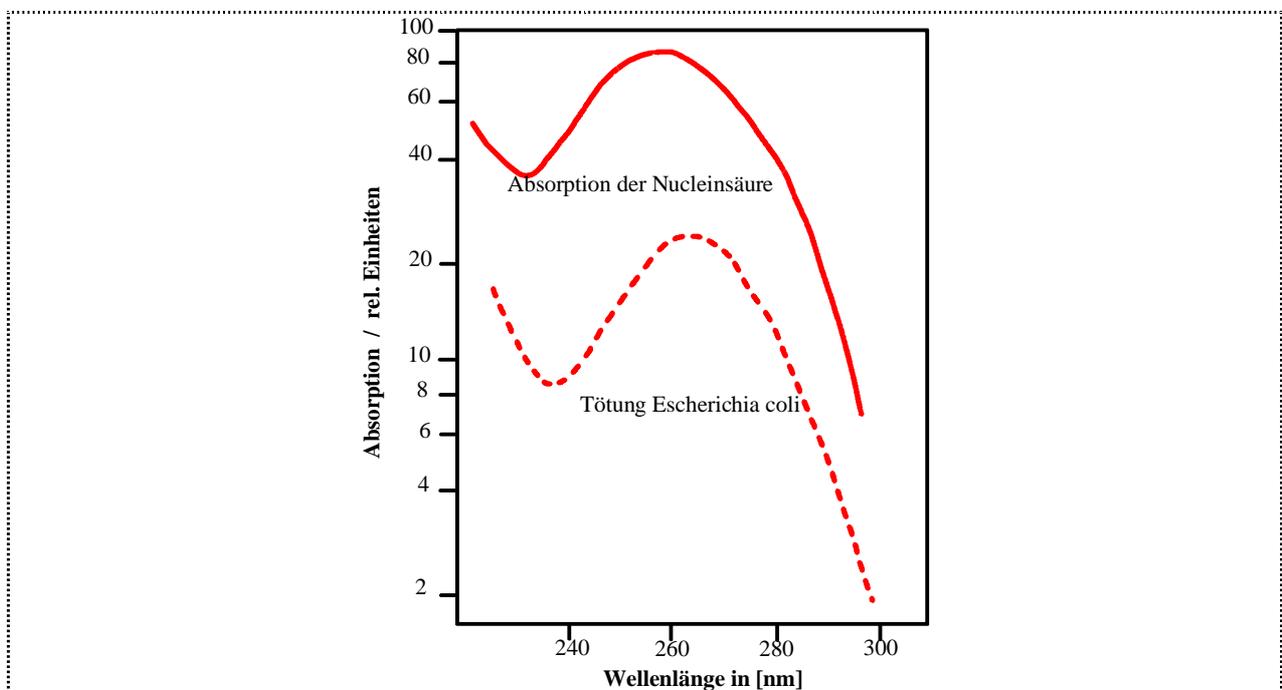


Bild 3-8: Grafische Zusammenstellung des Absorptionsspektrums der DNS und Tötung von *Escherichia coli* als Funktion der Wellenlänge

Tabelle 3-2 : Absorptionswellenlänge

Zit at	Quelle: Autor/en und Referenz	Wellenlängenbereich Angaben in nm	Einschränkungen Organismus/Verbindungen
1	MARTINY [4]	nahe 260 nm	Pyrimidinbasen: Thymin (T), Cytosin (C), Uracil
2	V. SONNTAG [5]	$\lambda_{\max} = 200 \text{ nm}$, $\lambda_{\max} = 260 \text{ nm}$ $\lambda_{\max} = 280 \text{ nm}$	DNS, RNS
3	HARM [6]	$260 \text{ nm} < \lambda < 265 \text{ nm}$	Absorptionsmaximum RNS, DNS
4	BERNHARDT et al. [12]	$\lambda = 254 \text{ nm}$	
5	SCHLEYPEN et al. [13]	$260 \text{ nm} < \lambda < 265 \text{ nm}$	mikrobiologisch wirksamster Bereich
6	DVGW Regelwerk W293 [15]	$200 \text{ nm} < \lambda < 290 \text{ nm}$ $\lambda = 265 \text{ nm}$ Maximum	keine Details
7	DVGW Regelwerk W294 [16]	$\lambda = 253,7 \text{ nm}$ Bezug $240 \text{ nm} < \lambda < 290 \text{ nm}$	keine Details
8	ÖNORM [18]	$\lambda = 265 \text{ nm}$ Maximum	Nukleinsäuren
9	FIGAWA TM 20-98 [19]	$\lambda = 265 \text{ nm}$ Maximum $240 \text{ nm} < \lambda < 290 \text{ nm}$	Nukleinsäuren der Mikroorganismen
10	ATV-Regelwerk ATV-M205 [29]	$200 \text{ nm} < \lambda < 280 \text{ nm}$	Nukleinsäure
11	HOYER [31]	$240 \text{ nm} < \lambda < 300 \text{ nm}$	Photodimerisierung der Purinbausteine in der Doppelhelix der DNS bzw. RNS
12	KOLCH [34]	$\lambda = 254 \text{ nm}$	Mikroorganismus
13	RUDOLPH et al. [38]	$\lambda_{\max} = 265 \text{ nm}$	Nukleinsäure der Zelle Bildung von -OH - Radikalen
14	BERNHARDT et al. [41]	$240 \text{ nm} < \lambda < 280 \text{ nm}$	Desinfektionsbereich ¹
15	PFEIFFER [42]	$250 \text{ nm} < \lambda < 265 \text{ nm}$	Nukleinsäure und Aminosäure der Zelle Bildung von -OH - Radikalen
16	GROSS et al. [43]	$250 \text{ nm} < \lambda < 265 \text{ nm}$	RNS, DNS
17	MAARSCHALKERWEERD et al. [45]	$250 \text{ nm} < \lambda < 270 \text{ nm}$	
18	V. SONNTAG [46]	$\lambda_{\max} \approx 260 \text{ nm}$	DNS
19	MECHSNER et al. [49]	$200 \text{ nm} < \lambda < 280 \text{ nm}$	Desoxyribonukleinsäure, DNS Pyrimidinmoleküle des DNS Stranges
20	JONAS [50]	$\lambda_{\max} \approx 260 \text{ nm}$ $240 \text{ nm} < \lambda < 280 \text{ nm}$	DNS und RNS Dimerisierung der Pyrimidinbasen
21	GELZHÄUSER [51]	$240 \text{ nm} < \lambda < 280 \text{ nm}$	Absorption Nukleinsäuren, Bildung von Dimeren, bevorzugt an Thyminbasen
22	MARTINY et al. [54]	$\lambda_{\max} \approx 260 \text{ nm}$	Absorptionsmaximum DNS, vorzugsweise ihrer Pyrimidinbasen
23	HARRIS et al. [55]	$190 \text{ nm} < \lambda < 300 \text{ nm}$	DNS der Bakterien, RNS bei Viren, Dimerisation der Thyminbasen, Uracil bei Viren
24	HARRIS et al. [58]	$190 \text{ nm} < \lambda < 300 \text{ nm}$	DNS der Bakterien, Dimerisation der Thyminbasen
25	KAWAMURA et al. [59]	$\lambda_{\max} \approx 260 \text{ nm}$	Absorptionsmaximum der Proteine und Nukleinsäuren
26	KNUDSON [61]	$220 \text{ nm} < \lambda < 300 \text{ nm}$	Pyrimidindimere der DNS, mutagen Veränderungen und Zelltod.
27	WHITE et al. [63]	$255 \text{ nm} < \lambda < 260 \text{ nm}$ $\lambda_{\max} = 260 \text{ nm}$	DNS, RNS, UV Strahlen zerstören und verändern die genetische Information
28	JOHNSON et al. [68]	$240 \text{ nm} < \lambda < 290 \text{ nm}$ $\lambda_{\max} \approx 265 \text{ nm}$	DNS, RNS, Dimerisation der Pyrimidinbasen, somit Blockierung der Zellteilung
29	SCHEIBLE et al. [69]	$210 \text{ nm} < \lambda < 310 \text{ nm}$ $\lambda_{\max} \approx 260 \text{ nm}$	Bildung von Dimeren, Thymindimere verhindern die genetisch prog. Replikation des DNS Stranges.
30	B.F. Severin [70]	$\lambda_{\max} = 253,7 \text{ nm}$	biologische tödlich wirkende Veränderungen in der Zelle

¹ Einer Grafik entnommen.

In der Literatur ([4] bis [6], [12] bis [19], [29], [31], [41] bis [43], [45], [49] bis [51], [55], [58]) werden auf Messungen basierende Spektralbereiche zwischen $\lambda_{\min} = 200 \text{ nm}$ und $\lambda_{\max} = 300 \text{ nm}$ angegeben. In diesem befindet sich ein Absorptionsmaximum bei $\lambda = 260 \text{ nm}$ bzw. 265 nm . Wenige Autoren schränken diesen Bereich weitestgehend ein bzw. benennen nur eine einzige Wellenlänge als die wirksamste, vergleiche KOLCH [34], RUDOLPH et al. [38], v. SONNTAG [46], JONAS [50], MARTINY et al. [54] und KAWAMURA et al. [59].

Die vorstehende Tabelle 3-2: „Absorptionswellenlängen“ gibt dazu eine Zusammenstellung und ergänzt den betreffenden Spektralbereich durch Angaben zu den untersuchten Proben, sofern diese vom zitierten Autor gemacht werden. Bezieht man sich auf die Nukleinsäuren so lautet der Wellenlängenbereich, bei welcher eine maximale Absorption stattfindet, $260 \text{ nm} < \lambda < 265 \text{ nm}$. Dies steht im Einklang mit den in den Arbeiten von den Autoren HARM [6] und SCHLEYPEN et al. [13] gemachten Angaben. Betrachtet man allerdings die Chromophoren, so ist ein Wellenlängenbereich $200 \text{ nm} < \lambda < 350 \text{ nm}$ anzugeben; vergleiche HARM [6] und TURRO [26].

Grundsätzlich gehört zu den Angaben der Wellenlängenbereiche immer die exakte Probenbeschreibung. Manche Autoren, vgl. Tabelle 3-2, gehen auf diesen Umstand nicht ein und benennen sowohl Bereiche als auch einen einzelnen Wert in allgemeiner Form.

In Hinblick auf die Gesamtheit der zitierten Literaturangaben der Tabelle 3-2, ist ein für das Verfahren interessanter biologischer Wellenlängenbereich zwischen der kürzesten Wellenlänge von $\lambda_{\min} = 190 \text{ nm}$ und einer größten Wellenlänge von $\lambda_{\max} = 310 \text{ nm}$ anzugeben. Nach den Festlegungen der DIN 6031 - Teil 7 [159] entspricht dies hauptsächlich dem UV-C - Bereich und dem UV-B Bereich (auch fernes UV, mittleres UV).

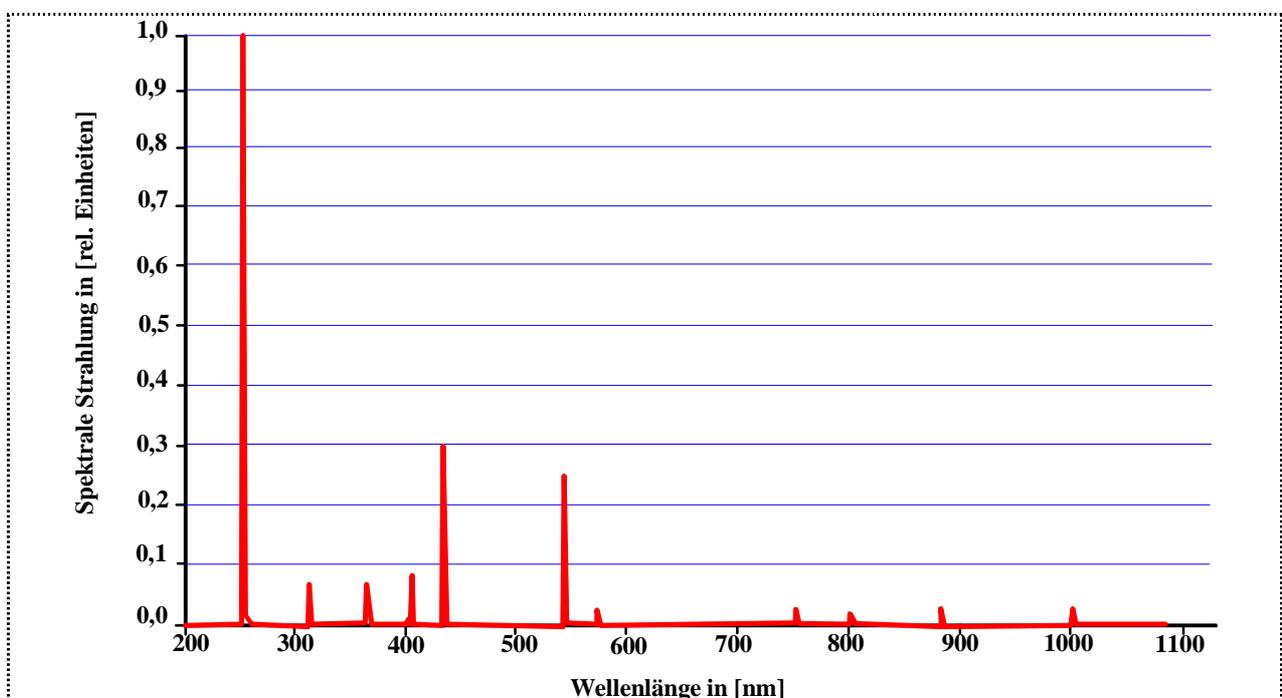


Bild 3-9: Emissionsspektrum eines *multi-wave* - Strahlers NNI 120/84

Gegenwärtig werden als innovative Lösung der Industrie (Heraeus Noblelight GmbH) sogenannte *multi-wave*-Strahler (dotierte Quecksilber-Niederdruckstrahler) in der Praxis verwendet,

vgl. Bild 3-4 und Bild 3-9. Diese ziehen Nutzen aus dem Umstand, dass in der Zelle weitere Moleküle, die ebenfalls einen wenn auch geringeren vitalen Einfluss auf den Zellenmetabolismus haben, von der Strahlung geschädigt werden können, deren Wellenlängen (Frequenzen) außerhalb des Absorptionsmaximums der DNS liegen, vgl. dazu Bilder 3-5 bis 3-8. Außerdem haben diese Strahler einen günstigen Wirkungsgrad, vgl. Tabelle 3-9 und Tabelle 3-10.

Bei der Beschreibung molekularbiologischer Phänomene mit biophysikalischen Mitteln ist es nicht möglich, eine direkte kausale Zuordnung - welches Photon welche Reaktion einleitet - vorzunehmen. Trotzdem war und ist es sowohl für Forschungszwecke als auch für Zwecke der technischen Anwendung erforderlich, die Wirkung der Strahlung qualitativ und quantitativ zu erfassen. Dieser Umstand führte zur Entwicklung von zwei zueinander äquivalenten Methoden. Eine von diesen Methoden, vgl. MARTINY [4], v. SONNTAG [5], [46], HARM [6], DVGW Regelwerk [16], BERNHARDT et al. [41], JONAS [50] und JOHNSON et al. [68], bezieht sich auf die PLANCKsche Formel, nach welcher die Energie E der Strahlung durch

$$E = h \cdot \nu \quad (3.1)$$

mit dem PLANCKschen Wirkungsquantum h und der Frequenz der Strahlung ν beschrieben wird. Die Wellenlänge λ und die Frequenz ν sind über die Gleichung

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (3.2)$$

miteinander verknüpft und in welcher c die Lichtgeschwindigkeit repräsentiert. Um die Energie eines einzelnen Photons zu bestimmen, ist die Maßeinheit Joule [J] unhandlich. Die Maßeinheit des Elektronenvolts [eV] ist bei der Betrachtung der Wirkung des Photons die geeignetere Maßeinheit, vergleiche HARM [6]. Für die Umrechnung gilt bekanntlich $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

In manchen Arbeiten, beispielsweise MARTINY [4], wird auf die in der Photochemie benötigte Einheit [Einstein] und auf die Relation [kcal/Einstein] Bezug genommen. Diese Größen beschreiben nach HARM [6] die Anzahl der Photonen ($6,02 \cdot 10^{23}$) bzw. die Photonenenergie, die in der Lage ist, ein Mol eines Stoffes in den angeregte Zustand zu versetzen. Unter der Verwendung der Gleichungen (3.1), (3.2) und den vorstehend genannten Definitionen ergeben sich folgende Beziehungen:

$$E [eV] = \frac{1240}{\lambda [nm]} \text{ und} \quad (3.3)^2$$

$$E \left[\frac{kcal}{Einstein} \right] = E_{exc} \left[\frac{kcal}{mol} \right] = \frac{28572}{\lambda [nm]}$$

Diese sind dann nützlich, wenn eine Substanz photochemisch bzw. molekularbiologisch untersucht wird. Auf dieser Herangehensweise begründen sich die aktinometrischen Methoden, die

² Wert wurde nachgerechnet. Bei HARM [6] findet man den Zahlenwert 28590 im Zähler von (3.3)

zur Untersuchung der Bestrahlung von biologischen Proben und zur Bestimmung der Emission der verwendeten Strahlungsquelle herangezogen werden können. So wird beispielsweise in der Arbeit JONAS [50] die photochemisch induzierte Reduktion von Eisen - III - Oxalat zu Eisen - II - Oxalat über die Formel für die Intensität D_0

$$D_0 = \frac{n \cdot Fe(II)}{q_{254} \cdot t \cdot \tau} \quad \text{in} \left[\frac{\text{Einstein}}{s} \right] \quad (3.4),$$

in der n die Anzahl der gebildeten Mol Fe(II), q_{254} die Quantenausbeute bei der Wellenlänge $\lambda = 254 \text{ nm}$ ($1,25 \text{ mol} \cdot \text{E}^{-1}$), t die Zeit in s und τ die Absorption der Strahlung an Quarz vertreten, verwendet. Mit der mittleren Strahlungsintensität aus einer Versuchsserie erfolgt nach JONAS [50] die Berechnung der Strahlerleistung bezogen auf die genannte Wellenlänge nach

$$P_{el} = D_0 \cdot N_A \cdot h \cdot \nu \quad (3.5)$$

mit der AVOGADROSchen Zahl N_A , dem PLANCKSchen Wirkungsquantum h und der Frequenz ν der Strahlung unter Verwendung von (3.2). Diese Methode wird hauptsächlich bei statischen Untersuchungen im Labor eingesetzt (JONAS [50]) und wird im DVGW Regelwerk [16] als Verfahren zur Kalibrierung von Sensoren, die unter dynamischen Verhältnissen innerhalb von UV-Reaktoren auf der Basis der Uridin-Reaktion messen, gefordert. BERHARDT et al. [41] und v. SONNTAG [46] beschreiben ein bei Tageslicht auch in situ einsetzbares Aktinometer, bei dem allerdings der Betrieb des UV-Reaktors für die betreffende Messung unterbrochen werden muss. Somit eignet sich auch diese Lösung nicht für den kontinuierlichen Betrieb.

JOHNSON et al. [68] geben der Biodosimetrie als zweite Methode gegenüber der Aktinometrie den Vorrang. Befinden sich beispielsweise Mikroorganismen in wässriger Lösung oder wird eine Nukleinsäure mit einer UV -Lichtquelle bestrahlt, so kann ähnlich wie bei der spektroskopischen Untersuchung von Flüssigkeitsgemischen das *Lambert-Beersche-Gesetz* zur Beschreibung der Absorption angewendet werden. Für den Strahlungsfluss Φ nach dem Durchdringen der Probe gilt

$$\Phi = \Phi_0 e^{-m_n \cdot x} \quad \text{in [W]} \quad (3.6)$$

mit Φ_0 dem auf die Probe auftreffenden Strahlungsfluss, x der Probendicke und m_n dem Extinktionsmodulus. Da der Strahlungsfluss Φ allgemein der von einer Lichtquelle abgegebenen Leistung entspricht, ergibt die Integration über die Zeit die Energie E . Wird gleichzeitig der Strahlungsfluss Φ auf die Fläche A bezogen folgt die Intensität D , wenn eine senkrechte Bestrahlung der Probe angenommen wird, und somit die Bestrahlung H nach

$$H = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\Phi}{A} dt \quad \text{in } \left[\frac{J}{m^2} \right] \text{ bzw. } \left[\frac{mJ}{cm^2} \right] \quad (3.7).$$

$$H = \frac{\Phi}{A} \cdot (t_2 - t_1) = \frac{\Phi}{A} \cdot t_{Ex}$$

Wird die Expositionszeit der Probe t_{Ex} eingeführt, folgt durch Differenzbildung und geeignete Zusammenfassung aus (3.6) für die von der Probe absorbierte Energie E_{abs}

$$E_{abs} = H \cdot A \cdot (1 - e^{-m_n \cdot x}) \quad (3.8).$$

HARM [6] bestimmt aus (3.8) die Anzahl der absorbierten Photonen zu

$$N_{Pabs} = \frac{E_{abs}}{h \cdot \nu} \quad (3.9).$$

und verweist darauf, dass die absorbierte Energie dem *Bunsen-Roscoeschen-Reziprokgesetz* folgt. Die Energieabsorption von Nukleinsäurelösungen sowie von Suspensionen aus Viren oder aus relativ kleinen Zellen kann für den transparenten Fall mit einer vereinfachten Gleichung beschrieben werden, indem man für $m_n \ll 1$ den Klammerausdruck in (3.8) durch das Produkt $m_n \cdot x$ ersetzt (Reihenentwicklung). Findet dabei Berücksichtigung, dass der Extinktionsmodulus m_n dem Produkt aus Extinktionskoeffizient ε_n und Konzentration c der gelösten Substanzen bzw. Zellen gleich steht, folgt

$$E_{abs} = H \cdot c \cdot \varepsilon_n \cdot x \cdot A \quad (3.10).$$

Da das Probenvolumen durch das Produkt der Probendicke x und der bestrahlten Fläche A gebildet wird und sich die Konzentration c stets auf das Probenvolumen V_p bezieht, wird die absorbierte Energie in (3.10) von der Bestrahlung H , dem Extinktionskoeffizienten ε_n und beispielsweise der Anzahl der Zellen bestimmt.

Liegt eine opake Probe vor, die der UV-Strahlung ausgesetzt wird, so ist für $m_n \cdot x > 6$ der Klammerausdruck³ der Gleichung (3.8) nahezu gleich dem Wert 1 und diese Gleichung geht in die vereinfachte Gleichung für die absorbierte Energie

$$E_{abs} = H \cdot A \quad (3.11)$$

über. HARM [6] gestattet die Vereinfachung (3.11) bereits für $m_n \cdot x > 2$ und führt für den halbtransparenten Fall den *MOROWITZ-Korrekturfaktor* ein.

Die biodosimetrische Methode hat Vorteile, welche in ihrer zweckmäßigen technischen Gestaltung einer Meßanordnung und deren Kalibrierung, in ihrer einfachen Anwendbarkeit auf dynami-

³ Im Zusammenhang mit der Arbeit durchgeführte Nachrechnungen und daraus abgeleitete Empfehlung.

sche Verhältnisse in zylinderförmigen Durchflussreaktoren und über deren Einbindung in technischen Apparaturen (Messen, Steuern, Regeln) zum Tragen kommen.

In den meisten Arbeiten deren Auswertung zur Aufstellung der Tabelle 3-3 führte, wird auf diese Methode und die damit gemessenen Bestrahlungswerte H (Dosis) direkt bzw. auf biodosimetrisch gewonnene Werte Bezug genommen. Die Tabelle 3-3 stellt einen Auszug bezüglich Minimal-, Maximalwerte und Wertebereiche dar. Die vollständigen Angaben (auch Quellenangaben) befinden sich in der Anlage 1, Tabelle A1-1. Auf die Gleichungen (3.6), (3.7) und (3.8) wird unten weiter eingegangen.

Tabelle 3-3: Bestrahlungs- (Dosis-) werte (Auszug)

Quelle: Autor/en und Referenz	Bestrahlung in [mJ/cm ²]	Wasser
Angabe von Bereichen min./max. Autoren [4], [5], [6], [13], [34], [37], [53], [54], [61], [67], [68], [69]	$1,3 < H < 150$	verschiedene Wässer Trinkwasser/Abwasser
Angabe des Einzelwertes Autoren [10], [40], [43], [46], [49], [59]	$H_N = 25$	Trinkwasser
D. SCHOENEN et al. B.F. SEVERIN [70]	$H_N = 30$ $H = 35$	Trinkwasser Trinkwasser
BERNHARDT [12]	$H_N = 40$	Trinkwasser
Regelwerk [15], [16], [17], [18], [30], [31], ATV - Regelwerk ATV - M205 [29]	$H_N = 40$ $30 < H_N < 45$	Trinkwasser Trinkwasser
O.K. SCHEIBLE C.D. BASSELL [69]	$H = 130$	Abwasser
E. NOLDE, W. DOTT [75]	$H = 143,5$	Abwasser
P. GELZHÄUSER [51]	$H = 150$	Abwasser

3.1.2. Molekularbiologische Grundlagen

Nach MARTINY [4] haben alle Basen der Nukleinsäuren eine Absorptionsspektrum nahe $\lambda \approx 260$ nm - vgl. Tabelle 3-2 -, allerdings sind lediglich bei den Pyrimidinbasen Thymin (T), Cytosin (C) und Uracil chemische Folgen einer UV - Bestrahlung nachweisbar. Bei diesen handelt es sich zum einen um die sehr stabilen Pyrimidindimere, die zwischen benachbarten Basen eines Stranges gebildet werden, und zum anderen um die Bildung von Adukten. Aus einem Thymin bildet sich ein Uracil, welches sehr stabil ist. Die gleichfalls entstehenden Hydrate sind sehr instabil und können zu einer Basenänderung von Cytosin zu Uracil führen; MARTINY [4], PFEIFFER [42], ITO et al. [74].

Nach SCHEIBLE et al. [69] werden die benachbarten Cytosin- bzw. Thyminhälften durch einen Cyclobutanring verbunden. Infolge dieser photochemischen Reaktionen geht die Fähigkeit des Organismus zur Transkription und Replikation verloren, wodurch dieser schließlich abstirbt, vgl. Bild 3-10. Die molekularbiologischen Mechanismen sind von Organismengruppe zu Organis-

mengruppe verschieden. So wird beispielsweise in Bakteriensporen keine Pyrimidin-Dimeren-Bildung der DNS hervorgerufen, statt dessen bilden sich Thyminil-Thymin-Adukte.

SONNTAG [5] verallgemeinert, indem die Gruppen Purine (Adenin und Guanin) und Pyrimidine (Thymin und Cytosin) genannt werden und die Wirkung der UV - Strahlung auf diese Gruppen erfolgt.

HARM [6] führt aus, dass die absorbierenden Komponenten der Nucleinsäuren die Nucleobasen sind. In der DNS handelt es sich dabei um die Purinderivate Adenin (A) und Guanin (G) und um die Pyrimidinderivate Thymin (T) und Cytosin (C). Die RNS enthält Uracil (U) anstelle der Thymine. Die durch die UV - Strahlung verursachte Wirkung auf die RNS hat nach HARM [6] gewöhnlich geringere biologische Konsequenzen als dies bei der DNS der Fall ist. Allerdings gilt dies nicht für biologische Systeme, die keine DNS sondern nur RNS als genetisches Material enthalten. Dies ist bei einigen tierischen und pflanzlichen Viren sowie bei einigen Bakteriophagen der Fall, so HARM [6].

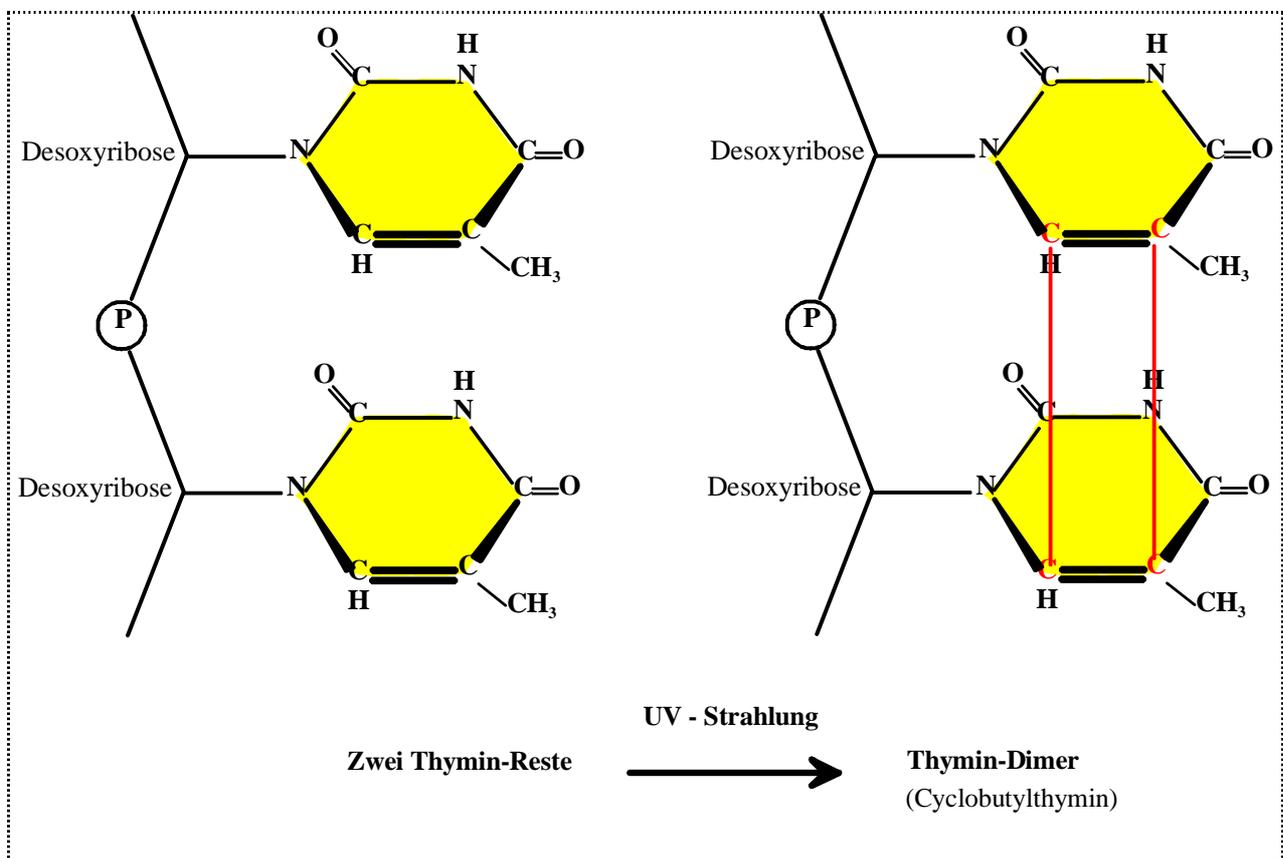


Bild 3-10: Dimerisierung des Thymins, n. LODISH et al. [25]

Die Autoren und Quellen ([13], [15], [18], [19], [29], [31], [38], [41], [43], [45], [46], [49] bis [51], [55], [58], [59], [61], [63], [68], [69], [70], [72] und [73]) gehen nicht auf die molekularbiologischen Einzelreaktionen ein, sondern sprechen zusammenfassend von photochemischen Reaktionen die durch die Absorption der UV-Strahlung durch die DNS und RNS verursacht werden. Diese führen zu Veränderungen an den Pyrimidinbasen der DNS und RNS, wobei Dimerisierungsprodukte entstehen. Das ist gleichbedeutend mit Veränderungen des Erbgutes, bei wel-

chen die Zelle die Vermehrungsfähigkeit / Replikationsfähigkeit verliert. Dies entspricht dem Zelltod.

Da die Evolution der Organismen bei Anwesenheit des natürlichen Sonnenlichtes vor sich ging (LINDENAUER et al. [37]) und diese stets dem natürlichen Sonnenlicht ausgesetzt sein können, haben sich entwicklungsgeschichtlich zwei wesentliche Mechanismen herausgebildet, die in der Lage sind, den durch die UV-Strahlung bewirkten Schaden zu reparieren. Es handelt sich dabei um die Dunkelreparatur und die Photoreparatur ([4], [5], [6], [12], [13], [15], [28] [31], [36], [37], [39] bis [41], [49], [55], [58], [61], [68], [69] und [73]). Bei der Dunkelreparatur sorgt eine enzymatische Reaktion für das Heraustrennen des geschädigten DNS Stranges und dessen Ersatz. Während der Photoreparatur bewirkt eine enzymatische Umkehrreaktion bzw. Prävention, stimuliert durch den Einfluss von langwelligem Licht - Wellenlängenbereich $310 \text{ nm} < \lambda < 500 \text{ nm}$ -, für die Aufhebung des Dimerisationsschadens.

Nach LODISH et al. [25] sind die Reparaturmechanismen der Spezies *Escherichia coli* besonders intensiv erforscht worden. Man fand eine große Anzahl enzymatische Reparatursysteme und zelluläre Antworten auf DNS Schäden, an denen etwa 100 Gene beteiligt sind. Man unterscheidet hauptsächlich die direkte Reparatur und die Exisionsreparatur, die häufiger anzutreffen ist. Weitere Einzelheiten siehe Originalarbeiten. In der Basenfolge der DNS können nach LODISH et al. [25] Schäden auftreten, die sowohl durch äußere Einwirkungen - Strahlen, mutagene Chemikalien, thermische Spaltung von Nukleosiden - verursacht werden als auch im Verlauf der Replikation spontan entstehen. Das Fehlen der DNS - Reparatur würden zu einer weitaus größeren Anzahl von Mutationen führen, als dies in der Natur der Fall ist. Dieser Ansatz führte zur Entdeckung des Korrekturlesens, mit dem die DNS - Polymerase die Kopierfehler eliminiert.

Ist die Schädigung allerdings durch eine ausgedehnte Bestrahlungswirkung genügend groß, führen die Reparaturmechanismen nicht zum Ziel; vgl. ([12], [15], [29] und [31]). Gleichwohl wirken die vorstehend genannten Effekte der Wirkung der UV - Strahlung entgegen. Dies ist bei der Dimensionierung der Reaktoren zu berücksichtigen - Schultereffekt in der grafischen Darstellung der Funktion Reduktionsrate = f (Bestrahlung), HARM [6], OPPENLÄNDER [27], MASSCHELEIN [28] -.

3.1.3. Mikrobiologische Grundlagen

Mikroorganismen sind in der Natur außerordentlich zahlreich und kommen im Boden, in der Luft und im Wasser vor. So enthält ein Gramm guter Ackerboden bis zu mehreren Milliarden Organismen, darunter 2000 bis 2500 Bakterienspezies, 30 bis 50 Pilzspezies und 10 bis 20 Actinomycetenspezies; MÜLLER et al. [24]. Oberflächenwasser aus Flüssen und Seen ist keimreich. Tiefenwasser, aus dem bevorzugt Trinkwasser gewonnen wird, ist keimarm. Die Mikroorganismen verursachen hauptsächlich die Mineralisierung organischen Materials und tragen wesentlich zu einem globalen Stoffkreislauf bei, da die Mineralien eine der Grundlagen des pflanzlichen Lebens sind. Parasitisch lebende Mikroorganismen verursachen Erkrankungen beim Menschen, bei Tieren und bei Pflanzen. Allerdings sollten ihre nützlichen Funktionen nicht unterschätzt

werden, deren Mechanismen in der Lebensmittelindustrie, in der Umwelttechnik und im zunehmenden Maße in der Gentechnik angewendet werden.

In den Arbeiten MARTINY [4], v. SONNTAG [5], BERNHARDT et al. [12], MASSCHELEIN [28], HARRIS et al. [55], HAVELAAR et al. [57], JOHNSON et al. [68], SCHEIBLE et al. [69] und NOLDE et al. [75], werden konkrete Bestrahlungswerte, die für die vollständige Inaktivierung (Abtötung) ausreichend sind bzw. die eine Reduktion der Mikroorganismen bewirken, genannt; vgl. Tabelle 3-4.

In den mikrobiologischen Arbeiten wird ein Reduktionsfaktor (RF) zur Wirkungsbeschreibung verwendet, der nach

$$RF = \lg \frac{N}{N_0} = \lg \frac{\text{Zahl der überlebende Organismen}}{\text{Anzahl der Organismen vor Bestrahlung}} \quad (3.12)$$

definiert ist. Da die Anzahl der überlebenden Organismen N stets kleiner ist als die Anzahl der Organismen vor Bestrahlung N_0 ist RF folglich negativ. In vielen Arbeiten verzichten man auf dieses kleine Detail. Für die Zitate in Tabelle 3-4 wurde es erforderlichenfalls ergänzt. Somit können die Ergebnisse als Zahlenwerte der Arbeiten (beispielsweise [4], [6], [13], [37], [41] u.a.) direkt miteinander verglichen werden. Die Tabelle 3-4 stellt einen Auszug dar. Die vollständige Tabelle mit Quellenverweisen befindet sich in der Anlage 1, Tabelle A2-1, Seite 4-8.

Tabelle 3-4: Bestrahlungswerte für die Inaktivierung von Einzelspezies (Auszug)

Organismen - Gruppe	Bestrahlung bei einem Reduktionsfaktor von -3 bis -4	Organismen
Bacteria	1,3 mJ/cm ² < H < 143,5 mJ/cm ²	<i>Bacillus megatherium</i> sp. (veg.) < <i>Klebsiella pneumoniae</i> (A10 7799 III)
Hefen	6,00 mJ/cm ² < H < 8,00 mJ/cm ²	<i>Saccharomyces spec</i> < <i>Saccharomyces cerevisiae</i>
Pilze	5 mJ/cm ² < H < 132 mJ/cm ²	<i>Oospora lactis</i> < <i>Aspergillus niger</i>
Viren	23,33 mJ/cm ² < H < 46,4 mJ/cm ²	<i>Poliovirus</i> < <i>Reovirus 1</i>
Algen	300 mJ/cm ² < H < 600 mJ/cm ² (hier RF = -1)	<i>Blualgen</i> < <i>Grünalgen</i>

Nach den Arbeiten von HARM [6], HARRIS et al. [58] und SCHEIBLE et al. [103] dient der exponentielle Ansatz nach Chick (*Chick-Watson-Relation* der UV-Desinfektion, [63]) dazu, die Anzahl der überlebenden Spezies nach der UV-Bestrahlung zu bestimmen. Dieser lautet:

$$N = N_0 e^{-k \cdot D \cdot t_{Ex}} \quad (3.13)$$

mit der Anzahl der überlebenden Spezies N , der Anzahl der Spezies vor der Bestrahlung N_0 , der Zeit t_{Ex} , der mittleren Intensität D und einem Inaktivierungskoeffizienten k^* (Sensibilität) für die betreffenden Spezies. Führt man die Bestrahlung H nach (3.7) ein, folgt die Gleichung

$$N = N_0 e^{-k^* \cdot H} \quad (3.14).$$

Auf die UV-Sensibilität k^* haben eine Reihe von Faktoren Einfluss, die in der Versuchsvorbereitung, in der Versuchsdurchführung und in der Versuchsauswertung zu beachten sind. Die Arbeit von MARTINY [4] zählt folgende Einflüsse auf, die die UV-Sensibilität der mikrobiologischen Spezies hauptsächlich bestimmen. Diese sind:

- Stammdidentität (artspezifische Widerstandsfähigkeit gegen UV-Strahlung)
- Anzuchtbedingungen (Beweglichkeit, Farbstoffbildung), Nährmedien (Agar, Hungermedien), Art der Vorkultur, Bebrütungstemperatur, Sauerstoffversorgung bei der Flüssigkultur, Nachbehandlung (z.B. Wäsche)
- Fähigkeit zu Reparaturmechanismen
- Alter der Kulturen
- Untersuchungsmethode vor und nach der UV-Bestrahlung
- Eigenschaften des Mediums in welchem die Spezies der Strahlung ausgesetzt sind, wie Transmission, Inhaltsstoffe, Farbstoffe und Temperatur, Nahrungsangebot
- Rückwirkung des Habitats auf die Strahlungsresistenz (Gewinnung von Wildstämmen)
- Dominanz / Fähigkeit zum kryptischen Wachstum
- Vermehrung / Fortpflanzung
- Stoffwechselmechanismen.

In der Arbeit von SCHEIBLE et al. [69] wird eine weitere Gleichung angegeben, die nach Integration des Ausdruckes

$$\frac{dN}{dt} = k^* N^2 D \quad (3.15)$$

die Beziehung

$$\frac{1}{N} - \frac{1}{N_0} = k^* \cdot D \cdot t_{Ex} \quad (3.16),$$

in welche die Anzahl der überlebenden Organismen N , die Anzahl N_0 der Organismen vor der Bestrahlung, die mittlere Intensität D , die Sensibilität k^* und die Expositionszeit t_{Ex} eingehen, liefert. Für den Anwendungsfall auf das Abwasser von Kläranlagen wird die Anzahl der Organismen N_0 vor der Bestrahlung sehr groß, wodurch die Gleichung (3.16) durch die Vernachlässigung des betreffenden Gliedes vereinfacht werden kann. Weitere konkrete Anwendungsfälle die-

ses Ansatzes sind nicht bekannt. In experimentellen Arbeiten wird die *Chick-Watson-Relation* bevorzugt.

Die Arbeit von DOTT [67] erwähnt, dass in Trinkwasser eine Zunahme der Keimzahl in Abhängigkeit von der Verweilzeit zu beobachten ist. Dies ist nicht an das Vorhandensein nachweisbarer Mengen organischen Kohlenstoffs gebunden. Das Organismenspektrum der Bakterien verändert sich zu Gunsten weniger Arten (Dominanz der betreffenden Kultur) auf Kosten geschädigter bzw. bereits abgetöteter Organismen (kryptisches Wachstum); MECHSNER et al. [49]. Der Anteil der grampositiven Bakterien wurde dabei wesentlich reduziert. Auch in bidestilliertem Wasser wurde ein Wachstum von Mikroorganismen nachgewiesen; DOTT [67].

Unter Anwesenheit von ausgewählten Farbstoffen kann es nach SAVINO et al. [66] zu einer Keimzahlreduktion kommen. Dies steht im Zusammenhang mit der Lichtabsorption des Farbstoffes und mit der Einleitung und dem Ablauf photochemischer Reaktionen, die auf die mikrobiologischen Spezies zurückwirken.

Somit beeinflussen selbst seitens der Mikroorganismen eine Vielzahl von Faktoren den Wert der UV - Bestrahlung, der angewendet werden muss, um den betreffenden Organismus abzutöten, vgl. Tabelle 3-4. Die gemessenen Werte der Bestrahlung die eine Reduktion - $RF \approx -4$ - nach Gleichung (3.12) für den Organismus *Escherichia coli* bewirkt, schwankt im Bereich $3 \text{ mJ/cm}^2 < H < 20 \text{ mJ/cm}^2$ (8 Zitate).

In praktischen Anwendungsfällen ist mit einer Vielzahl verschiedener Organismen zu rechnen, die gleichzeitig im zu desinfizierenden Fluid enthalten sind und die jeweils über eine unterschiedliche UV-Sensibilität verfügen. Deshalb wurden Maximalwerte als Nennwerte gesucht, die eine sichere Desinfektion von Wasser für den Lebensmittelbereich, für die Desinfektion von Grauwasser und eine hinreichende Desinfektion von Abwasser aus Kläranlagen erlauben. Die Auswertung der Arbeiten ([4] bis [6], [10], [12], [13], [15] bis [19], [26] bis [31], [33], [34], [37], [40], [43], [46] bis [48], [50], [53], [54], [57], [59], [61], [67] bis [69], [74] und [103]) gestattet einen Überblick über die Bestrahlungswerte H_N , die die Funktion eines solchen Leitwertes der Bestrahlung für eine sichere Desinfektion übernehmen, vgl. Tabelle 3-3 und Anlage 1, Tabelle A1-1. Besonders die Ergebnisse der Arbeiten von BERNHARDT et al. ([12], [40], [41]) haben die Abfassung der Regelwerke ([15] bis [18]) inspiriert, in denen schließlich ein Wert für die Bestrahlung - $H = 40 \text{ mJ/cm}^2$ - für die sichere Desinfektion von Trinkwasser bzw. für eine sichere Reduktionsrate ($RF_{\min} = -4$) verankert wurde.

Für die Entwicklung von Berechnungsmodellen für die Dimensionierung von UV - Reaktoren ist die Kenntnis der Abmessungen der Organismen nicht unerheblich. Die Mikrobiologie definiert Mikroorganismen als vorwiegend einzellige Organismen, die gewöhnlich einer naturwissenschaftlichen Untersuchung unter Verwendung eines Mikroskops zugänglich sind.

Zu den Mikroorganismen gehören nach MÜLLER [24] folgende Organismengruppen, die in der nachfolgenden Tabelle 3-5 durch ihre Formen und Größe beschrieben werden.

Tabelle 3-5: Organismengruppen und Abmessungen

Organismengruppe	Beispielorganismus	Form	Größe
Bakterien	<i>Escherichia coli</i>	stäbchenförmig	0,5µm (1...3) µm
Actinomyzeten	<i>Streptomyces griseus</i>	Hyphen	0,8...1,0 µm
	<i>Aspergillus niger</i>	Hyphen	8...20 µm Durchmesser
Pilze	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	elliptisch	(3...10)µm*(4,5...15)µm
Algen	<i>Ulothrix subtilis</i>	fadenförmig	4...8 mm Durchmesser
Protozoen	<i>Entamoeba histolyca</i> -Zyste-	kugelförmig	4...5µm
Viren	MKS Maul- und Klauensäuche - Virus	kubisch, nackt	25...27 nm

Weiter unten wird vorausgesetzt, dass diese Organismen zuverlässig in die für die mathematische Betrachtung herangezogenen Volumenelemente eingeschlossen sind (vgl. Kapitel 4, Kapitel 5.).

3.2. Physikalische Grundlagen

Die im Abschnitt 3.1. beschriebenen mikrobiologischen und biochemischen Grundlagen des Desinfektionsprozesses unter Anwendung der UV - Strahlung gehen in ihren Ansätzen stets global vom Eintrag der mit der elektromagnetischen Strahlung verbundenen Energie aus. Diese ist die Ursache für die ablaufenden biochemischen Reaktionen und schließlich für den Desinfektionserfolg. Für die Gestaltung des technischen Desinfektionsprozesses ist Abstand von den Modellvorstellungen, die sich aus dem traditionellen mikrobiologischen Versuchsaufbau zur Untersuchung der Desinfektion ableiten lassen, zu nehmen, ohne diesen jedoch vollständig zu verwerfen.

In den seltensten Fällen können Mikroorganismen zum Zweck der Desinfektion direkt der UV - Strahlung ausgesetzt werden. Allerdings liegt ein solcher Fall dann vor, wenn die Mikroorganismen auf der Oberfläche eines Trägermaterials gezielt angesiedelt wurden bzw. dort zufällig wild gewachsen sind (Biofilme); KREYSIG [174]. Eine ausgedehnte Schicht von Mikroorganismen lässt sich für experimentelle Zwecke unter Verwendung von Nährböden erzeugen. Die Kolonien aus Mikroorganismen liegen in diesem Fall nahezu in einer ebenen Schicht vor und können von einer Seite direkt der Strahlung ausgesetzt werden. Im Versuchsaufbau zur Untersuchung des Einflusses der Strahlung auf Spezies von Mikroorganismen, wie ihn beispielsweise der DVGW ([16], [17]) und die ÖNORM [18] fordern, wird der Einfluss der Luft auf die Strahlung stets vernachlässigt und eine ebene Strahlungsfront als Näherung angenommen, obwohl diese Situation den betreffenden Untersuchungen nicht vorliegt. Versuchsanordnungen in denen die Strahlung

von zwei Seiten, von unten und von oben bzw. von allen Seiten auf die Probe trifft, gibt es bislang nicht.

Läuft die Desinfektion in einem Reaktor ab, so sind komplizierte und komplexe technische Verhältnisse zu berücksichtigen, die vom Reaktor selbst bestimmt werden. Infolgedessen sollen nachstehend Erkenntnisse und Aspekte zur Reaktor - Optik und Reaktor - Hydraulik aufgezeigt werden, die als gesichert gelten, die sich erfolgreich in der technischen Anwendung befinden, die die Mängel der derzeit in der Anwendung befindlichen Methoden aufzeigen und die Ansätze zur Entwicklung gekoppelter Modelle anbieten.

Einen historischen Überblick in der Literatur zur Entwicklung der Technik allgemein enthalten beispielsweise die Arbeiten von MARTINY [4], v. SONNTAG [5] und SCHENCK [95].

3.2.1. Strahlungsverhältnisse im Reaktor (Reaktor - Optik)

Mit der Errichtung erster großtechnischer Anlagen für die Desinfektion von Trinkwasser und für die Desinfektion und Reinigung von Abwasser aus Kläranlagen und deren Erfolg, war es im Bestreben um die technische Optimierung der Anlagen notwendig, verbesserte Modelle bereitzustellen, mit denen zuverlässig die Desinfektion in UV-Reaktoren berechnet werden konnte. Im Zuge dessen benötigte man zunächst Methoden, die ein zuverlässiges *scale up* von experimentellen Aufbauten und den damit gewonnenen *reaktoroptischen* Messergebnissen auf großtechnische Anlagen erlauben würden. Die Arbeiten von JOHNSON et al. [68], SCHEIBLE et al. [69], JACOB et al. ([77] [78]), HARRIS et al. [79], STOVER et al. [80] und COUTTERET [81] spiegeln diese Bestrebungen wider.

Die zitierten Arbeiten repräsentieren zwei prinzipielle Lösungswege. Geht man davon aus, dass der Raum zwischen Strahlungsquelle und Strahlungsempfänger zunächst frei von absorbierenden Medien ist, können auf der Basis strahlungsphysikalischer Beziehungen die Bestrahlungsstärke E_{S_i} in jedem Raumpunkt um die Strahlungsquelle bestimmt werden.

Für die Annäherung an die technischen Sachverhalte in Reaktoren mit zylindrischen Strahlungsquellen (z.B. Quecksilber-Niederdruckstrahler) werden die Modell-Vorstellung der Punktstrahlungsquelle (PSQ) und davon abgeleitet die der Linienstrahlungsquelle (LSQ) verwandt. Üblicherweise benutzt man in diesen Fällen außerdem Kugel- bzw. Zylinderkoordinaten. Die Linienstrahlungsquelle wird für eine weitere Näherung aus finiten Strahlungsquellen mit zweckmäßig gewählten Abmessungen zusammengesetzt und man weist ihnen die Eigenschaft einer Punktstrahlungsquelle zu. Für die weitere mathematischen Beschreibung des bestrahlten Ortes im Reaktor wird der Kugelradius R und der Zylinderradius r_z zueinander in einen funktionalen Zusammenhang gebracht und zweckmäßig in den Ableitungen eingesetzt. In der Arbeit von JACOB et al. [78] wird außerdem der von der Linienstrahlungsquelle ausgehende Strahlungsfluss Φ auf die Länge L_{SQ} der Strahlungsquelle bezogen.

Im Konzept von JACOB et al. [78] und HARRIS et al. [79] gehen die Autoren von der allgemeinsten Form des *Beerschen Gesetzes* für die Intensität \mathfrak{D} ,

$$\operatorname{div}\mathfrak{D} = -m_n |\mathfrak{D}| \quad (3.17),$$

dem auf die zur Ausbreitungsrichtung senkrecht stehenden Fläche A wirkende Strahlungsfluss Φ , aus. Die Gleichung (3.17) beschreibt den allgemeinen Fall der Absorption der elektromagnetischen Strahlung über die Divergenz - ein in der räumlichen Probe verschwindender Strahlungsfluss. Dabei wird der Strahlungsfluss Φ vektoriell, als von einer unendlich langen Linienstrahlungsquelle ausgehend, aufgefaßt, wobei m_n den Extinktionsmodulus repräsentiert. Außerdem liegt in dieser Modellvorstellung ein zeitlich und über seine Länge konstantes zylindersymmetrisches Strahlungsfeld vor. Wenn in der Darstellung in Zylinderkoordinaten,

$$\frac{1}{r_z} \frac{\partial (r_z \mathfrak{D}_{r_z})}{\partial r_z} + \frac{1}{r_z} \frac{\partial \mathfrak{D}_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial \mathfrak{D}_z}{\partial z} = -m_n |\mathfrak{D}| \quad (3.18),$$

die Ableitungen nach dem Winkel φ und der z - Koordinate wegfallen und nur die radiale Komponente auftritt, folgt nach Integration des Ausdruckes,

$$\frac{1}{r_z} \frac{d}{dr_z} (r_z \cdot \mathfrak{D}_{r_z}) = -m_n |\mathfrak{D}_{r_z}| \quad (3.19),$$

die Lösung

$$D = \frac{r_{zQ}}{r_z} \cdot D_0 e^{-m_n (r_z - r_{zQ})} \quad (3.20).$$

Vorstehend wurde berücksichtigt, dass in dieser zitierten Arbeit der Strahler der behandelten technischen Anwendung ein Schutzrohr aus strahlungsdurchlässigem Material (Quarz, Suprasil, Pyrex) mit dem Radius r_{zQ} hat; vgl. auch [95]. Die Integrationsgrenzen erstrecken sich vom Radius des Schutzrohres r_{zQ} bis zum Innenradius des Reaktors r_W . Bezieht man die Integration auf eine Position des Volumenelementes in einer beliebigen infinitesimal dünnen Zylinderschale im Integrationsintervall, in welchem sich hypothetisch der Mikroorganismus aufhält, wird allgemein r_z als Radius der Zylinderkoordinaten verwendet; vgl. Bild 3-11.

SCHEIBLE et al. [69] kommen zu einer Lösung, in welcher der jeweilige auf Referenzflächen bezogene Strahlungsfluss Φ - die Oberfläche des Schutzzyinders und die innere Oberfläche des Reaktors - zueinander in Beziehung gesetzt werden. Im Zwischenraum zwischen diesen den Wirkungsraum der Strahlung begrenzenden Flächen befindet und sich zunächst Luft, deren Absorption in diesen Arbeiten vernachlässigt wird.

Wird der betreffende Strahlungsfluss Φ unter vorstehenden Annahmen auf die senkrecht zu diesem stehende Fläche bezogen, folgt bekanntlich die Intensität D . Für die Intensität an der Oberfläche D_0 der Strahlungsquelle bzw. der Oberfläche des Schutzrohres um die betreffende Strahlungsquelle und die Intensität D einer beliebig gewählten zylindrischen Oberfläche zwischen Schutzrohr und der inneren Mantelfläche des Reaktors gilt

$$\frac{D}{D_0^*} = \frac{r_{zQ}}{r_{zQ} + r_z} \quad (3.21).$$

Mit dem nachträglichen Einsetzen des *Beerschen Gesetzes* über D_0^* folgt

$$D = \left(\frac{r_{zQ}}{r_{zQ} + r_z} \right) D_0 e^{-m_n r_z} \quad (3.22).$$

Der zweite in der Literatur beschriebene Lösungsweg geht von dem Ansatz aus, dass die zylindrische Strahlungsquelle, über die die Mehrzahl der Reaktoren verfügt, über jeweils eine linienförmige, zylindersymmetrische Strahlungsquelle (LSQ) anzunähern ist. Diese wird ihrerseits durch eine zweckmäßig festgelegte Anzahl finiter Punktstrahlungsquellen angenähert. Die Intensität D ist somit entweder durch Integration über die Strahlungsquellenlänge oder durch eine Summenbildung über die Strahlungsbeiträge der einzelnen Punktstrahlungsquellen zu berechnen. Die erste Methode - klassische Integration - führt analytisch zu elliptischen Integralen deren Lösungen schwer bzw. nicht angebar sind; [119], [177] bis [179], und Werke der mathematischen Analysis beispielsweise SMIRNOV, FICHTENHOLZ.

Die zweite Methode, auch als *Point Source Summation Method* (PSS-Methode) bekannt, ist als erfolgreich praktizierte Methode und als Methodenbegriff in die Literatur eingegangen, beispielsweise STOVER et al. [80].

Die Beiträge in den Arbeiten von JOHNSON et al. [68], JACOB et al. [77] und von STOVER et al. [80] stellen Lösungen dar, die im Zuge der weiteren Methodenentwicklung ebenfalls Berücksichtigung fanden. JACOB et al. [77] wählen als analytischen Ansatz das *Beersche Gesetz* in Kugelkoordinaten, wobei für die Lösung der Radius R_P der Kugelkoordinaten durch den Radius r_z der Zylinderkoordinaten und die Entfernung z eines ausgewählten finiten Strahlungsquellenteils der Linienstrahlungsquelle vom Koordinatenursprung z_{PSQi} bzw. der Entfernung des bestrahlten Volumenelementes eingeführt wird, vgl. Bild 3-11.

Die Strahlungsquelle, in der Form eines geraden Kreiszylinders, wird als Linienstrahlungsquelle aufgefasst und willkürlich in finite Strahlungsquellenanteile zerlegt, wobei die Anzahl n der Punktstrahlungsquellen zweckmäßig zur Strahlerlänge L zu wählen ist. Der Strahlungsfluss Φ_{LSQ} wird somit auf die Länge der Strahlungsquelle und auf die Anzahl der finiten Punktstrahlungsquellen bezogen, wodurch aus

$$D_{PSQ} = \frac{\Phi_{0,PSQ}}{4\pi \left(r_{zP}^2 + (z_P - z_S)^2 \right)} \cdot e^{-m_n \sqrt{r_{zP}^2 + (z_P - z_S)^2}} \quad (3.23)$$

mit

$$R_P^2 = r_{zP}^2 + (z_P - z_S)^2 \quad (3.24)$$

und

$$N \cdot \Phi_{PSQ} = \Phi_{LSQ} \cdot L \quad (3.25)$$

$$D_{PSQ} = \frac{\Phi_{0,LSQ} \frac{L}{N}}{4\pi \left(r_{zP}^2 + (z_P - z_S)^2 \right)} \cdot e^{-\left\{ \left[m_n (r_{zP} - r_{zQ}) \right] + m_{py} r' \right\} \frac{\sqrt{r_{zP}^2 + (z_P - z_S)^2}}{r_{zP}}} \quad (3.26)$$

folgt. In vorstehenden Gleichungen steht der Index z für Zylinderkoordinaten und der Index PSQ bezeichnet die willkürliche Punktstrahlungsquelle. Über den Extinktionsmodulus m_{py} und die Dicke r' werden die strahlenphysikalischen Eigenschaften des Schutzzyllinders für die Strahlungsquelle berücksichtigt, sofern dieser vorhanden ist.

JOHNSON et al. [68] definieren die zylinderförmige Strahlungsquelle ebenfalls als eine Anzahl n finiter Punktstrahlungsquellen die durch Summenbildung bekannter Strahlenflüsse Φ_i mit

$$\frac{\Phi}{n} = \Phi_i \quad (3.27)$$

und in Anlehnung an Gleichung (3.24)

$$R_P^2 = r_z^2 + z_{PSQ}^2 = r_z^2 + (z_P - z_{PSQ})^2 \quad (3.28)$$

die Berechnung der Intensität D nach

$$D = \sum_{i=1}^{i=N} \frac{\Phi_i}{4\pi \left[r_z^2 + (z_{PSQ_i} - z_P)^2 \right]} \cdot e^{-m_n (r_z - r_{zQ}) \left\{ \frac{\sqrt{r_z^2 + (z_{PSQ_i} - z_P)^2}}{r_z} \right\}} \quad (3.29)$$

gestatten. Im Zuge dieser Ableitung wurde die nützliche Beziehung

$$\frac{R_{SP}}{r_{zP}} = \frac{R_{SP} - R_{SQ}}{r_{zP} - r_{zQ}} \quad (3.30)$$

verwandt, die über die Strahlensätze der Planimetrie bewiesen werden kann; vgl. Bild 3-11 und Bild 4-4.

Die Methode, Gleichung (3.29), war in ihrer Anwendung sehr erfolgreich und wurde zum empfohlenen Näherungsverfahren der *Environmental Protection Agency* (EPA) der USA; ([80], [28], [103] und [28]).

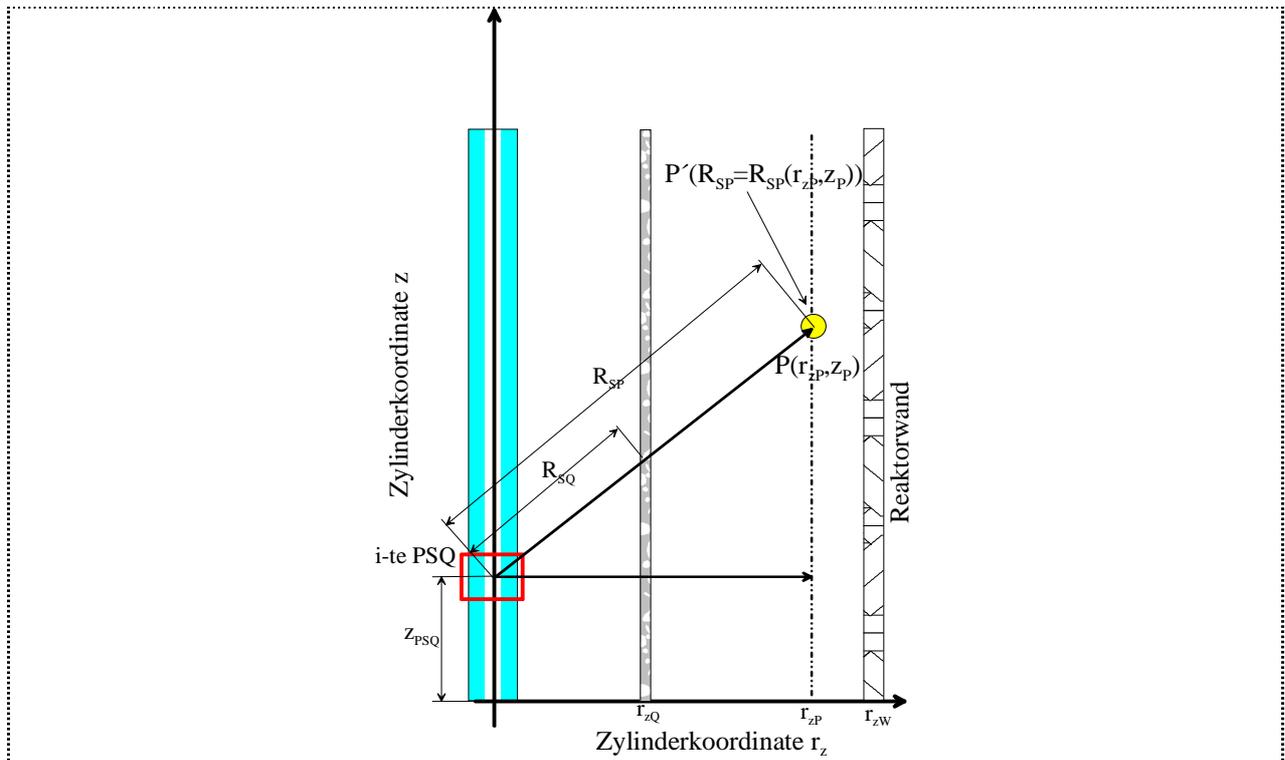


Bild 3-11: Point Source Summation Method - PSS - Methode

Zur Desinfektion von Abwässern aus Kläranlagen werden häufig Gerinne-Reaktoren eingesetzt. Diese, wie auch geschlossene leistungsstarke Reaktoren, verfügen über mehrere parallel angeordnete Strahlungsquellen. Dadurch ergeben sich Strahlungsanteile von mehreren Strahlungsquellen, die bei den Berechnungen und Abschätzungen zu berücksichtigen sind. In der Arbeit von SCHEIBLE et al. [69] wird dieses Problem durch die Einführung von symmetrischen Lösungsdomänen bewältigt. So werden die Anteile der UV-Strahlung von 4 benachbarten Strahlungsquellen zusammengefaßt und unter Verwendung eines experimentell gewonnenen Korrekturfaktors C_F , dem *Compounding Factor*, hochgerechnet. Nach SCHEIBLE et al. [69] hat im Fall von 100 Strahlungsquellen der *Compounding Factor* den Wert $C_F \approx 1,78$.

In der gleichen Arbeit wird eine Gleichung angegeben, die den Strahlungsfluss Φ_0 aus der elektrischen Leistungsaufnahme P_{el} ermittelt. Es gilt

$$\Phi_0 = P_{el} \cdot \eta_{LSQ} \cdot \eta_Q \quad (3.31)$$

mit dem Wirkungsgrad der Strahlungsquelle η_{LSQ} und dem Strahlungsverlust durch den Schutzzyylinder η_Q der Strahlungsquelle. Die Bestrahlungsstärke E_0 lässt sich unter der Annahme, dass die Strahlung senkrecht auftrifft und somit der Intensität D_0 gleichsteht nach der Gleichung

$$E_0 = \frac{P_{el} \cdot \eta_{LSQ} \cdot \eta_Q}{A_Q} = D_0 \quad (3.32)$$

für eine Empfängerfläche in der Oberfläche der Strahlungsquelle bestimmen. In der Literatur aus diesem Zeitbereich wird der Wirkungsgrad der Strahlungsquelle mit $\eta_{LSQ} = 0,35$ angegeben und der Verlust an Strahlung durch das Quarzschutzrohres wird über den Wert $\eta_Q = 0,9$ berücksichtigt. Vorstehend angegebenen Werte beziehen sich auf die Quecksilber - Niederdruckstrahler. Die Oberfläche des Schutzrohres A_Q wird aus den Abmessungen des Bauteils berechnet. Die experimentelle Untersuchung der Effizienz der Desinfektion in UV - Reaktoren unter dynamischen Verhältnissen mit einer photochemischen Reaktion ist sehr vorteilhaft. In der Arbeit von HARRIS et al. [79] und in der Arbeit von JACOB et al. [78] wird ein Ansatz angegeben, der die Reaktionsrate P_v

$$P_v = 2\pi r_{z0} L \cdot \varphi_Q \cdot E_0 \left(1 - e^{-m_n(r_{zw} - r_0)}\right) \quad (3.33)$$

als Funktion die Bestrahlungsstärke E_0 , des Extinktionsmodulus m_n und der Quanteneffektivität ε_Q darstellt; Quantenausbeute bezogen auf einen biologischen Effekt bzw. auf eine chemische Reaktion, vergleiche F. DESSAUER, *Quantenbiologie*, Springer-Verlag 1964 und [105].

In der Arbeiten ([20], [21], [23]) wird ebenfalls vom *Beerschen Gesetz* für den Strahlungsflusses Φ ausgegangen und die Verteilung in einem Reaktor mit einer zentralen Strahlungsquelle und 17 konzentrisch um die mittlere Strahlungsquelle angeordneten Strahlern nach

$$\Phi = \sum_{i=1}^{18} \Phi_0 e^{-m_n \sqrt{r_{zp}^2 - r_{z0i}^2}} \quad (3.34)$$

berechnet. Isolinien des Strahlungsflusses gestatten eine rasche und zuverlässige Einschätzung der strahlenphysikalischen Verhältnisse im Reaktor. Diese Ergebnisse lassen sich bequem mit den sich einstellenden Strömungsprofilen im Reaktor verbinden. Allerdings bleiben bei dieser Näherung die Anteile des Strahlungsflusses, die von außerhalb der Betrachtungsebene auf den Mikroorganismus treffen, vereinfachend unberücksichtigt. In dieser Herangehensweise werden die Strahler als unendlich lange Linienstrahlungsquellen betrachtet, von denen eine zylindersymmetrische elektromagnetische Welle ausgeht. Die Bestrahlungsstärke E_{St} eines Strahlers berechnet sich nach der Gleichung

$$E_{St} = \frac{\Phi_0}{2\pi r L_{eff}} \cdot e^{-m_n r} \quad (3.35)$$

in welche der Radius r und die effektive Länge L_{eff} der Strahlungsquelle eingegangen ist, die um die Strahlungsquelle gelegte Zylindermantelflächen beschreiben.

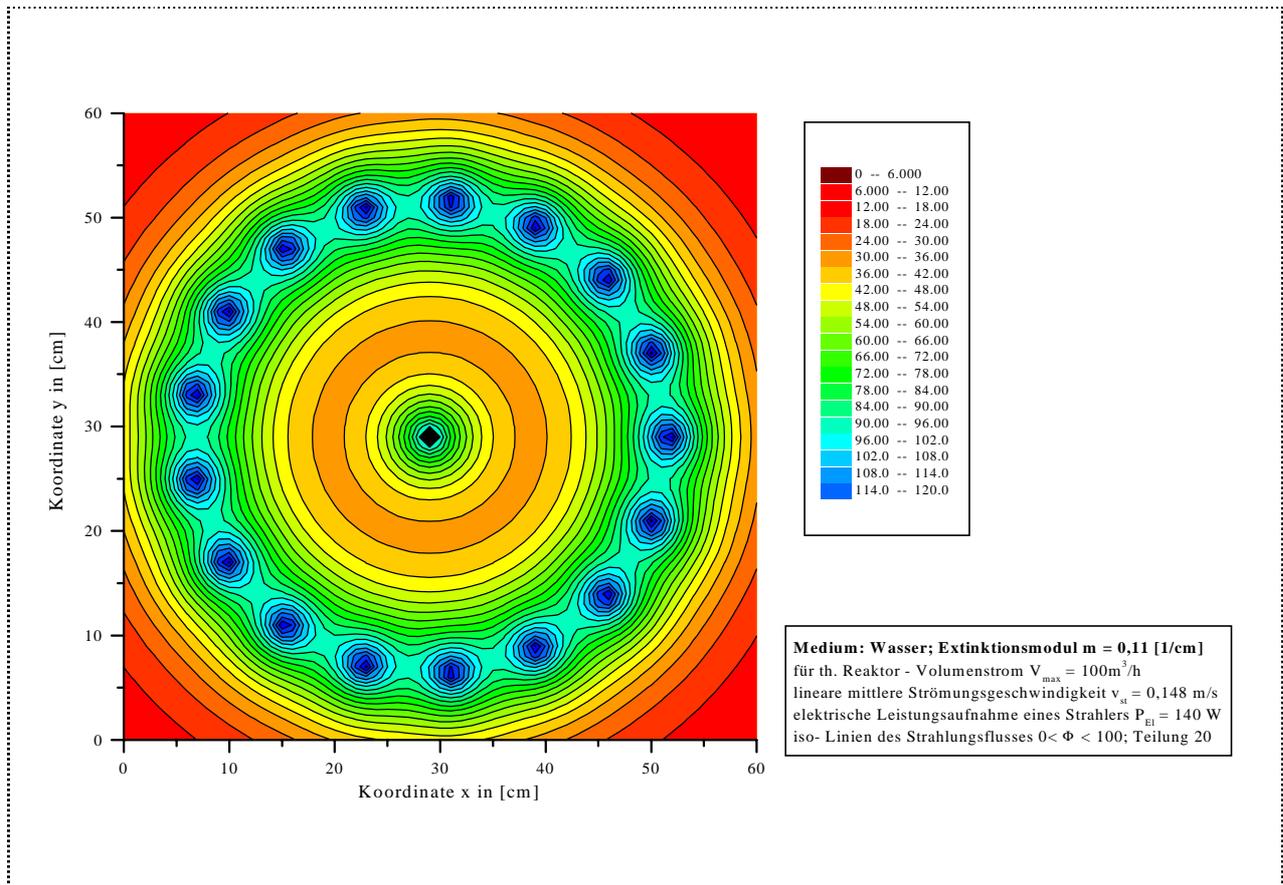


Bild 3-12: Isolinien des Strahlungsflusses Φ , nach ([20], [21], [23])

Die PSS-Methode stellt ein Verfahren dar, welches sich relativ eng an den physikalischen Sachverhalt anlehnt. Die mit dieser Methode berechneten Intensitätswerte D bzw. Werte der Bestrahlungsstärke E_{Sf} sind grundsätzlich größer als die Werte, die unter gleichen Reaktorbedingungen mit den Gleichungen (3.20), (3.22) und (3.34) berechnet werden können; ([20], [21], [22], [69], [78], [79], [99]). Unter den zuletzt zitierten Arbeiten weist die Methode die größten Werte nach, die in den Arbeiten ([78], [79]) angewendet wurde. Diese kommt somit den mit der PSS-Methode berechneten Werten am nächsten. Allerdings sind die Abweichungen nach den Methoden der Arbeiten ([20], [21], [22], [69], [78], [79], [99]) gering. Die PSS - Methode summiert alle Strahlungsanteile der gedachten Punktstrahlungsquellen bzw. der endlich langen Linienstrahlungsquelle. Dabei berücksichtigt diese den Schwellenwert allerdings nicht, der überschritten werden muss, um eine biozide Wirkung zu erhalten (Schultereffekt).

In vorstehend beschriebenen Ansätzen gehen folgende Annahmen ein:

- Die Emission der Strahlung erfolgt unabhängig vom Winkel φ und der Länge der Strahlungsquelle L_{SQ} bzw. z .
- Die Strahlungsquelle hat finite Abmessungen.
- Die Punktstrahlungsquelle/n und die Linienstrahlungsquelle/n sind geeignet einen technisch realen zylindrischen Strahler zu modellieren.
- Alle in den zitierten Arbeiten in Luft durchgeführten Messungen, gehen davon aus, dass Luft nicht absorbiert, nicht streut und der Extinktionsmodulus $m_n = 0$ ist.

- Im Zwischenraum zylindersymmetrische Strahlungsquelle (Linienstrahlungsquelle) und Schutzzyylinder findet keine Absorption statt. In der Arbeit von SCHEIBLE et al. [69] wird eine Selbstabsorption erwähnt, die dann auftritt, wenn die Strahlung der einen Strahlungsquelle den Plasmabereich der anderen Strahlungsquelle durchdringt. Diese Selbstabsorption soll nach der zitierten Quelle ca. 10% betragen.
- Reflexion, Brechung, Streuung, Interferenz werden in den Ansätzen mit unterschiedlicher Gewichtung bzw. nicht berücksichtigt.
- Im bislang angenommenen Fall wird die Strahlung über den durch das *Beersche Gesetz* beschriebenen funktionalen Zusammenhang vom Medium absorbiert, bevor diese auf den Mikroorganismus trifft. Die Absorption wird über den Extinktionsmodulus m_n hinreichend berücksichtigt, der sich mit den Instrumenten der UV-vis-Spektrometrie entweder über einen Wellenlängenbereich oder auf einer ausgewählten Wellenlänge (z.B. $\lambda = 253,7 \text{ nm}$) bestimmen lässt.

Bereits reines Wasser absorbiert und streut wellenlängenabhängig die einfallende Strahlung, SMITH et al. [179]. Die Transmission T in [%], aus dem spektralen Reintransmissionsgrad τ abgeleitet, ist nach dem Extinktionsmodul m_n - als spektrale Stoffkennzahl, vgl. [154], die wichtigste das Transportmedium beschreibende Größe. Der Extinktionsmodulus m_n und die Transmission T gestatten eine Aussage über die grundlegenden Eigenschaften des zu behandelnden Wassers bzw. des Transportfluids und haben die Bedeutung eines Leitparameters, vgl. Bild 3-13.

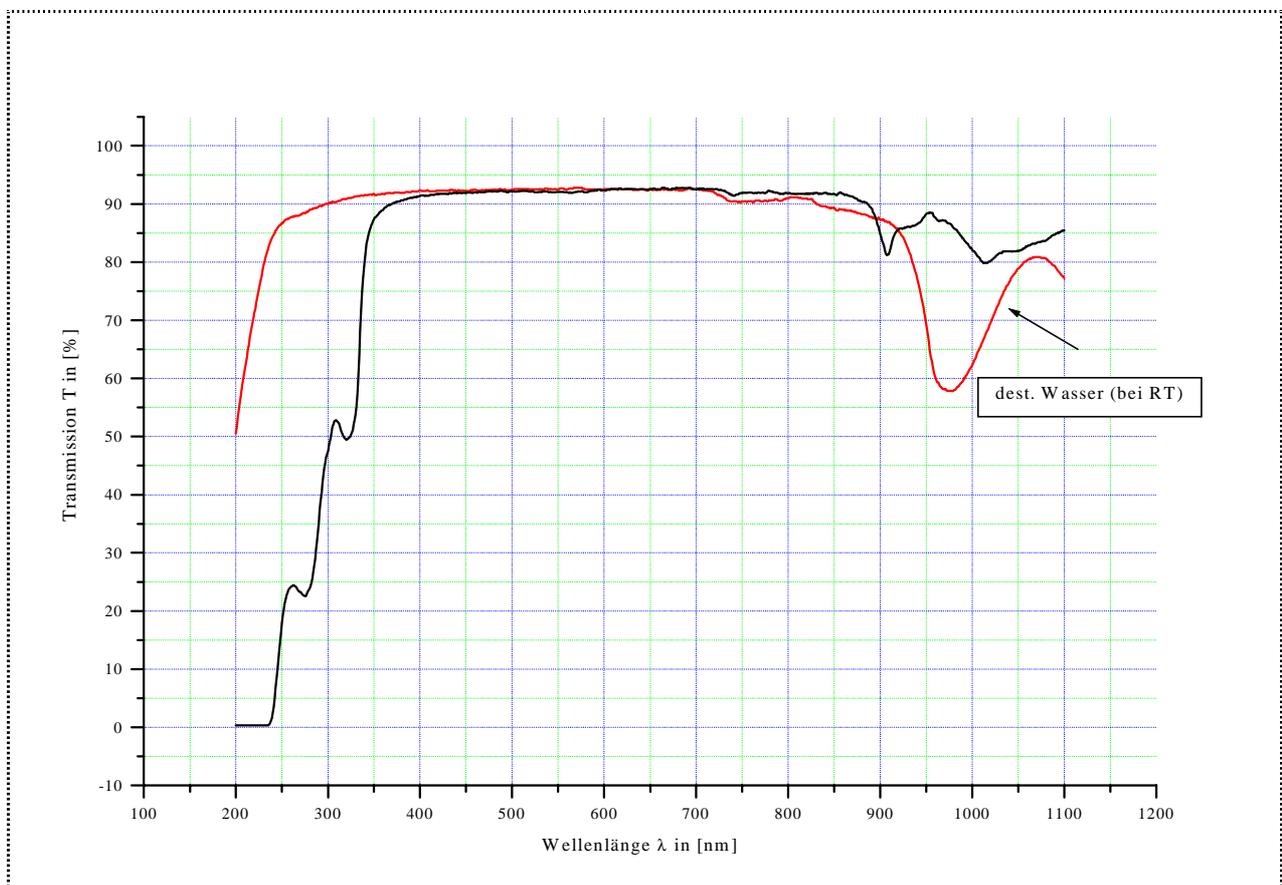


Bild 3-13: Transmission von dest. Wasser im Vergleich mit Ethanol (p.a.)

In der Praxis der Desinfektion von Trinkwasser und bei der Desinfektion von Wasser aus Klärwerken sind weitere messbare Größen zu berücksichtigen, die schließlich entscheiden, ob das vorliegende Rohwasser bereits zur Desinfektion mit der UV-Technologie geeignet ist.

In der Literatur wird von den meisten Autoren die Ansicht vertreten, dass gelöste und suspendierte Partikel durch Absorption, Streuung, Reflexion und Schattenbildung die Wirkung der UV-Strahlung reduzieren; ([13], [15], [16], [28], [31], [32], [38], [43], [56], [69], [75], [80], [82], [83], [84], [86], [91], [92], [94]). Außerdem bieten nach diesen Arbeiten die Partikel den Mikroorganismen die Möglichkeit des Einlagerns und des Anlagerns. Das hat zur Folge, dass sich die Überlebenschancen für die Mikroorganismen während der Bestrahlung verbessern. Auch die für die Verfahrenswirksamkeit nachteilige Effekte, wie die Photoreparatur und die Dunkelreparatur, erreichen hohe Werte. Ursächlich dafür ist der Umstand, dass der bestrahlte Mikroorganismus nicht die erforderliche Bestrahlungsstärke E_{St} und in Verbindung mit der Expositionszeit t_{Ex} nicht die erforderliche Bestrahlung H (Dosis) erhält, die für eine sichere Desinfektion erforderlich ist. Die DNS der Mikroorganismen wird weniger geschädigt, wodurch Reperaturmechanismen schneller erfolgreich sein können. In den Arbeiten von QUALLS et al. ([86], [88], [91]) und SCHÖLER [84] wird die Wirkung der suspendierten Partikel (SSP) auf den Desinfektionserfolg experimentell zu der Partikelgröße korreliert. Die Arbeit von SCHEIBLE [94] verweist darauf, dass die Anzahl der angelagerten Mikroorganismen kleiner ist als die Anzahl der Partikel. Bei anderen Desinfektionsverfahren wirkt sich das Vorhandensein gelöster und suspendierter Partikel ebenfalls nachteilig aus. So führen hohe Werte an suspendierten Partikeln zu einer erhöhten Chlor- bzw. Ozonzehrung. RUDOLPH et al. [38] fordern, die UV-Desinfektion grundsätzlich nach der Filterung anzuwenden und in der Arbeit von GROSS et al. [43] wird experimentell bewiesen, dass mit sinkender UV-Transmission, verursacht durch suspendierte Partikel, die Anzahl der überlebenden Mikroorganismen steigt.

WHITBY et al. [83] und NIEUWSTAD et al. [98] fanden, dass die UV-Transmission und die gelösten und suspendierten Partikel die Photoreparatur nicht beeinflussen. JOHNSON et al. [68] verweisen darauf, dass die Streuung von der Größe der gelösten und suspendierten Partikel abhängt. Außerdem beeinflusst die Größe der Partikel die Streurichtung - eine bevorzugte Streurichtung (Vorwärtsstreuung) kann sich einstellen. Liegen im Vergleich zur Wellenlänge der einfallenden elektromagnetischen Strahlung sehr kleine Partikel vor, tritt eine Abhängigkeit von der Wellenlänge auf (*Rayleigh - Streuung*). Werden die Partikel größer im Vergleich zur Wellenlänge, tritt die *Mie - Streuung* auf; ([105], [106]). Detaillierte Untersuchungen mit definierter Erzeugung suspendierter Partikel ergaben, dass beim Vorhandensein solcher ein physikalischer Sensor zur Kontrolle der Bestrahlungsstärke einen zu großen Extinktionsmodulus (geringe Transmission) nachweist, wodurch der Fehlschluß auf eine zu geringe Bestrahlungsstärke gezogen werden könnte. Durch die Streuung der Strahlung (Einfach- und Mehrfachstreuung) geht diese nicht bedingungslos für die Desinfektion verloren. Die Streustrahlung tötet ebenfalls die Mikroorganismen, da sie in der Summe, sofern die Bestrahlungsstärke E ausreicht, zur Bestrahlung H beiträgt; JOHNSON et al. [68]. Nach KAMIKO et al. [53] wird durch Kaolin - Partikel die UV - Effektivität kaum beeinflusst und in der Arbeit von GELZHÄUSER [51] wird ein Bereich $5,5 \text{ mg/l} \leq \text{SS} \leq 16 \text{ mg/l}$ als ein tolerierbares Maß angegeben. BERNHARDT et al. [41] zählen Suspensa aus Tonen,

Silikaten, und Aluminiumhydroxyd als solche auf, die kaum Einfluss auf den spektralen Schwächungskoeffizienten (SSK) haben. Zur Charakterisierung des Wassers ergänzt der spektrale Schwächungskoeffizient den spektralen Absorptionskoeffizienten (SAK).

(Hinweis: In den entsprechenden Ansätzen kann mit einem modifizierten Extinktionsmodulus m_n gerechnet werden, welcher die beschriebenen Effekte berücksichtigt und dem SAK-Wert bzw. dem SSK-Wert entspricht. Die Ansätze werden in physikalischer und mathematischer Hinsicht nicht beeinflusst. Der entsprechende Wert von m_n ist durch Messung zu bestimmen.)

MARTINY [4] fand, dass bei der Anwesenheit unterschiedlicher Tonminerale die Absorption verschiedene Werte aufweist. Große Absorption bedeutet in diesem Sinne schlechte Desinfektion. Unter dynamischen Bedingungen - strömendes Wasser - verbesserte sich allerdings die Desinfektion. Die Anwesenheit von Kaolin - Partikel löste einen die Desinfektion begünstigenden Effekt aus.

Weitere den Desinfektionserfolg beeinflussende Eigenschaften des Wassers sind seine Färbung, die Trübung und das Vorhandensein von Magnesium, Eisen und Kalk. Letztere begünstigen die Belagbildung am Strahlerrohr bzw. am Strahlerschutzrohr; ([13], [15], [16], [17]).

Die Empfehlung bei der Trinkwasserdesinfektion solche Eigenschaften des Wassers vor der UV - Anwendung zu erzeugen, die durch die Trinkwasserverordnung gefordert werden, haben sich als Normforderungen durchgesetzt; ([15], [16], [17]).

Es steht außer Zweifel, dass es bei den im Reaktorbau verwendeten Materialien - vorzugsweise Edelstahl - zur Strahlungsreflexion kommt. Derzeit wird der Reflexion nur dann Aufmerksamkeit geschenkt, wenn die von den Strahlungsquellen ausgehende Strahlung durch die Anordnung von Reflektoren eine bevorzugte Strahlungsrichtung in das zu desinfizierende Medium erhalten soll. In der Literatur wird sich im Zusammenhang mit der UV-Desinfektion wenig mit dieser Thematik befaßt. MARTINY [4] hebt hervor, dass sich die Reflexion günstig auf die Desinfektionseffizienz auswirkt und nennt die Reflexionskoeffizienten für verschiedene Materialien - Edelstahl reflektiert 25% der auftreffenden Strahlung und poliertes Aluminium 75%. Grundsätzlich wird bei der Betrachtung der Reflexion von diffuser Reflexion (weiße Reflexion) r_w als Verhältnis der reflektierten Φ_{ref} zur senkrecht auftreffenden Strahlung Φ_{rZW} in der Form

$$r_w = \frac{\Phi_{ref}}{\Phi_{rZW}} = f(\lambda) = const \quad (3.36)$$

ausgegangen und die entsprechende Behandlung als ausreichend angesehen. Wenn bei der gegenwärtigen Betriebsweise von UV-Reaktoren, der UV-Sensor die Bestrahlungsstärke an der Reaktorwand überwacht, so wird folglich bei der entsprechenden Einstellung des Schwellwertes die von der Edelstahlwand reflektierte, schwächer werdend (Lichtweg!) Strahlung nicht berücksichtigt.

3.2.2. Fluidmechanik (Reaktor - Hydraulik)

Das Desinfektionsergebnis wird entscheidend von den Eigenschaften des Mikroorganismus selbst und von der Bestrahlung H bestimmt. Die Bestrahlung H ist das Produkt aus Bestrahlungsstärke E_{St} bzw. Intensität D und der Zeit, in welcher der betreffende Mikroorganismus exponiert wird - Expositionszeit t_{Ex} - siehe Gleichung (3.7).

Nach der Einbrennzeit der Strahlungsquelle, z.B. ein Quecksilber - Niederdruckstrahler, stellen sich im Wirkungsbereich des UV-Reaktors Bestrahlungsstärkewerte E_{St} ein, die zwar vom Ort aber nicht von der Zeit abhängig sind. Dabei wird vorausgesetzt, dass die elektrischen Betriebswerte der Strahlungsquelle (Spannung, Stromstärke) zeitlich konstant sind.

In den Arbeiten ([4], [49], [54], [57], [62], [68], [70], [72], [80] [95]) wird der Volumenabschnitt eines Reaktors, in welchen die Strahlung eintritt und auf die Mikroorganismen wirkt, als Reaktionsvolumen V_R bzw. effektives Reaktorvolumen V_{eff} bezeichnet. Zylindrische Reaktoren haben in den meisten Fällen entlang der Längsachse des Reaktorvolumens den gleichen Querschnitt A_R und eine dieser Geometrie angepaßte zylindrische Strahlungsquelle, welche die effektive Reaktorlänge L_{eff} definiert. Dieser Länge entspricht die Länge des effektiven Plasmabereichs der Strahlungsquelle. Die in den zitierten Arbeiten beschriebenen Desinfektionsexperimente werden bei verschiedenen Volumenströmen \dot{V} (Durchsätzen) durchgeführt. Der Volumenstrom \dot{V} und der Reaktorquerschnitt A_{eff} erlauben die Berechnung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit v_m

$$v_m = \frac{\dot{V}}{A_{eff}} \quad (3.37),$$

die eine lineare konstante (Ort und Zeit) Verdrängungsströmung repräsentiert und jedem in die betreffenden Volumenelemente des Wassers eingeschlossen gedachten Mikroorganismus die gleiche Geschwindigkeit verleiht. Die Verdrängungsströmung ist eine Schichtenströmung in der die Volumenelemente in den parallelen Schichten jeweils die gleiche Geschwindigkeit einnehmen. Aus der mittleren Strömungsgeschwindigkeit v_m und der effektiven Reaktorlänge L_{eff} ist die Expositionszeit t_{Ex} nach

$$t_{Ex} = \frac{L_{eff}}{v_m} \quad (3.38)$$

bestimmt. Die Kenntnis der Verdrängungsströmung gestattet über die Berechnung des Strahlungsflusses Φ bezogen auf eine Wellenlänge von $\lambda = 253,7$ nm für einen Quecksilber - Niederdruckstrahler und den als bekannt vorausgesetzten elektrischen Leistungsdaten die einfache Berechnung der Intensität D bzw. der Bestrahlungsstärke E_{St} und damit der Bestrahlung H . Dabei wurde der aus den elektrischen Leistungsdaten der Strahlungsquelle bestimmte Strahlungsfluss Φ auf äquidistante Zylindermantelflächen bezogen, deren Größen durch den Radius bis zum Erreichen der Innenfläche der Reaktorauswand bestimmt sind. Der Wert der Bestrahlung H wird schließlich als Maß für die Auswertung der theoretischen Desinfektionsergebnisse verwendet.

Diese Methode stellt eine grobe Näherung dar, da der Strömungstyp - lineare Verdrängungsströmung - nur unter bestimmten, schwierig einzuhaltenden Voraussetzungen realisierbar ist.

In der Arbeiten ([5], [15] bis [21], [30], bis [34], [40], [45], [51], [56]) wird darauf verwiesen, dass das über den Volumenstrom V (auch Durchsatz Q) bestimmte Strömungsprofil einen wesentlichen Einfluss auf den Desinfektionserfolg hat. Die Arbeiten ([20], [21]) untersuchen die Wirkung verschiedener sich in der Praxis einstellende Strömungsprofile (laminare Strömung, turbulente Strömung) auf die Bestrahlung H und stellen diese der Bestrahlung H beim Vorliegen der linearen Verdrängungsströmung gegenüber. Während dieser Untersuchungen wird die Ortsabhängigkeit des Strahlungsflusses Φ über den Reaktorquerschnitt A_R für einen Desinfektionsreaktor, der mit 18 zylinderförmigen Quecksilber - Niederdruckstrahlern ausgerüstet ist, berechnet und in der Form von Isolinien des Strahlungsflusses $\Phi = \Phi(x,y)$ einer Zylinderwelle im Gebiet des Reaktorquerschnittes dargestellt, Bild 3-12. Die Berechnung der Bestrahlung H auf der Basis einer unendlich langen Linienstrahlungsquelle erfolgt nach der Gleichung

$$H = \frac{\sum_{i=1}^{18} \Phi_0 \cdot e^{-m_n \cdot |\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_{St}|}}{A_{St}} \cdot \frac{L_{eff}}{v_{st}} = f(x, y) \quad (3.39),$$

in welcher die jeweils bestrahlte Fläche A_{St} (äquidistante Zylindermantelflächen) als Funktion des Reaktorradius bis zum Erreichen der Innenseite der Rektoraußenwand eingesetzt wurde. Die Ortsvektoren \mathbf{r} zum Messpunkt und zu den Strahlungsquellen sind entsprechend indiziert. In der Gleichung (3.39) wird das Strömungsprofil über die Ansätze für die Strömungsgeschwindigkeit v_{st} berücksichtigt, der Ausdruck für die Expositionszeit (3.38) ist bereits eingesetzt. Dabei kamen für die turbulente Strömung Potenz - Ansätze und bei der Berücksichtigung des Widerstandsbeiwertes und der fluidmechanischen Rauheit der Bauteile des Reaktors das Gesetz für die logarithmische Geschwindigkeitsverteilung für die turbulente Strömung zur Anwendung. Der Widerstandsbeiwert λ_{Fl} wurde nach der Gleichung von *COLEBROOK* und *WHITE* iterativ bestimmt, *BOLLRICH* et al. [120]. Die Berechnung der Bestrahlung H erfolgte bei gegebenen UV-Reaktorquerschnitt für verschiedene Volumenströme (10 m³/h bis 100 m³/h). Es wird gezeigt, dass sich mit dieser Methode Bestrahlungsprofile, Bild 3-14, über den Reaktorquerschnitt angeben lassen. Im Bereich der größten Strömungsgeschwindigkeit des Strömungsprofils weisen diese die minimale Bestrahlung H , die für die Desinfektionszwecke zur Verfügung steht, auf. Bei einem theoretischen Volumenstrom von 100 m³/h in der betreffenden Reaktorkonstruktion reicht diese gerade aus, um die Spezies *Escherichia coli* sicher abzutöten. In den Bereichen außerhalb des Strömungsmaximums, besonders in der Nähe der Reaktorwand und den Oberflächen der Schutzzyylinder der Quecksilber - Niederdruckstrahler ist die Bestrahlung H relativ groß und somit in der Lage resistenterer Organismen abzutöten. Für die Einschätzung der Leistungsfähigkeit des Reaktors ist jedoch der Bereich der maximalen Strömungsgeschwindigkeit zu bewerten. Hier kann es bei unzureichender Bestrahlung zu Organismen - Durchbrüchen kommen.

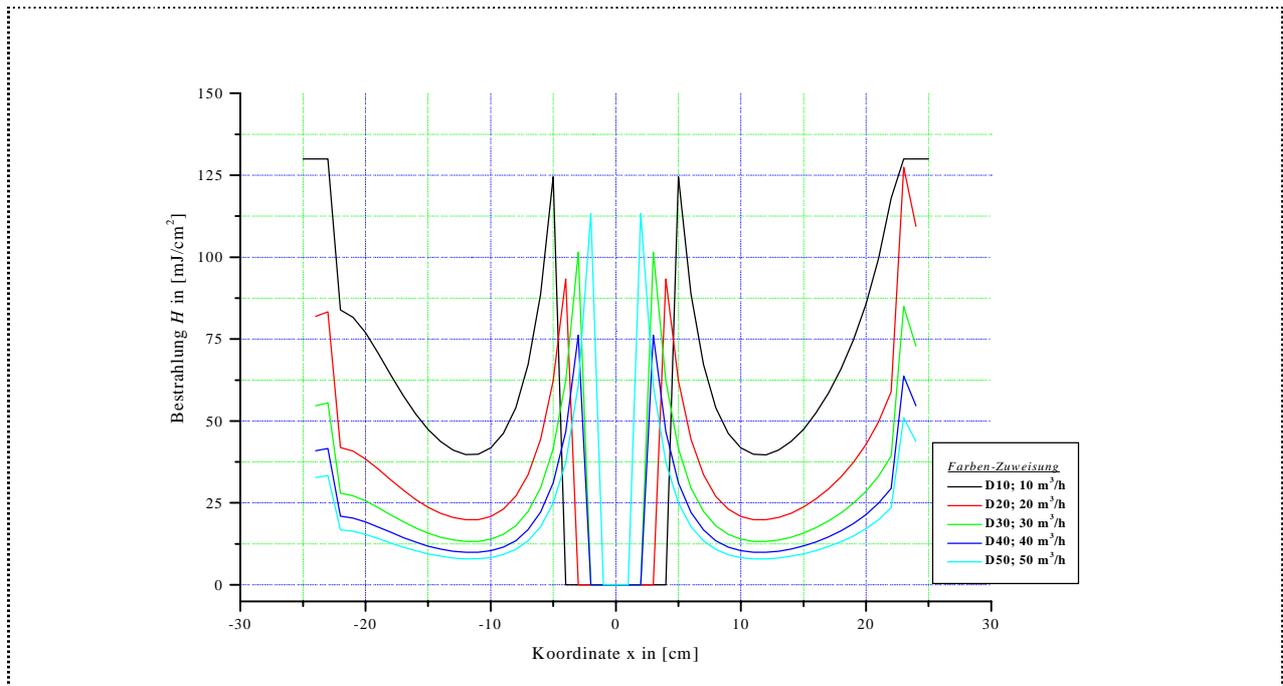


Bild 3-14: Bestrahlung H im Reaktor; verschiedene Durchsätze, turbulenter Strömungsansatz, parallele Strömungsschichten, Arbeiten ([20], [21])

In den Arbeiten KOSCHITZKY et al. [11], BERNHARDT et al. ([12], [41]) SCHLEYPEN et al. [13], ATV Regelwerk [29], RUDOLPH et al. [38], PFEIFFER [42], MORISKE et al. [44], GELZHÄUSER [51], MARTINY et al. [54], WHITE et al. [63] besteht Einigkeit darüber, dass eine turbulente Strömung den Desinfektionserfolg begünstigt und schließlich wird eine intensive Quervermischung im Reaktorinnern von den zitierten Autoren gefordert. Die grundlegenden Untersuchungen von BERNHARDT et al. ([12], [40], [41]) wurden durch fluidmechanisch experimentelle Untersuchungen und deren Ergebnisse möglich, die von KOSCHITZKY et al. erarbeitet und in der Arbeit [11] dargestellt sind. Mehrere Autoren verwenden den Ausdruck *Pfropfenströmung* und verbinden damit die Forderung an ein ideale Quervermischung. Offensichtlich ist dieser Ausdruck der englisch sprachigen Literatur entlehnt - *plug - flow*. Nach WESTERTERP et al. [100] liegt ein *Plug-Flow-Reactor* vor, wenn eine zeitunabhängige Strömung im Reaktor auftritt und der Volumenstrom in jeder Querschnittsfläche des Reaktors gleich ist. Die lineare Strömungsgeschwindigkeit v ist an jedem Punkt der Querschnittsfläche, die senkrecht zur Hauptströmungsrichtung aufgespannt wird, gleich⁴.

Auf der Basis dieser Modellvorstellungen wurde zu deren Untermauerung die Methode der *Residence-Time-Distribution* (RTD - Methode) entwickelt, die sowohl experimentell als auch auf der Basis der Lösung einer homogenen bzw. inhomogenen linearen Differentialgleichung 2. Ordnung der Dispersion in einem Reaktor hergeleitet werden kann; ([80], [90], [93], [94], [98], [99], [101] [102]). Die RTD - Methode beruht auf der Messung der Verweilzeit eines Tracers (z.B. Natriumchlorid - Salzlösung), der in der Form eines Rechteck - Konzentration - Impulses, eines Einschalt- oder eines Ausschalt - Vorganges in das zu beurteilende System eingegeben wird. Misst man im Fall des Ausschaltens des Tracers dessen Konzentration C_{Tr} über der Zeit t

⁴ In der Originalarbeit wird sich auf den Massenstrom bezogen - entspricht dem Volumenstrom oder Durchsatz.

(negative Werte werden ausgeschlossen) am Ausgang des Systems und stellt den Zusammenhang grafisch dar, führt dies zu einer Abklingkurve. Im Fall der Einspeisung eines Konzentrationsimpulses in das System wird eine Messwertverteilung am Systemausgang nachgewiesen, die einer *Gaußschen Verteilung* der Tracerkonzentration

$$C_{Tr} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.40)$$

mit dem Mittelwert μ

$$\mu = \sum_i \frac{t_i}{n} \quad (3.41)$$

und der Standardabweichung σ der Grundgesamtheit

$$\sigma^2 = \sum_i \frac{(t_i - \mu)^2}{n} \quad (3.42)$$

entspricht. Die Differentiation der Messresultate nach dem Einschalt- bzw. Ausschaltvorgang des Tracers führt ebenfalls zu einer solchen Messwertverteilung, die der Verweilzeit des Tracers im System entspricht und deren Parameterdiskussion und die übrigen in der Anlage 2, „*RTD - Methode*“, angegebenen Verhältniszahlen, Schlüsse auf die Strömungsverhältnisse und den *plug-flow* erlauben. In den Arbeiten ([80], [93], [94]) werden leicht abweichende Parameterwerte angegeben, die in die Tabelle A2-1 in der Anlage 2 unter Angabe der Literaturverweise eingearbeitet wurden.

Die Messungen sollten durch automatische Probennahme und beispielsweise über die Leitfähigkeitsmessung mittels einer Messzelle *on line* durchgeführt werden; MEREDITH [96].

STOVER et al. [80] zitieren die Arbeit von LEVENSPIEL aus dem Jahre 1972 in welcher die RTD - Methode als ein Ergebnis der Lösung der Differentialgleichung, die die Dispersion der Tracerkonzentration C_{Tr} in der effektiven Querschnittsfläche entlang der Hauptströmungsrichtung - *plug-flow* nach [100] - beschreibt,

$$\frac{E}{v_m L_{eff}} \frac{d^2 C_{Tr}}{dx^2} - \frac{dC_{Tr}}{dx} = t_m^i \quad (3.43)$$

abgeleitet wird (vergleiche auch LEVENSPIEL [102]). Mit den Formeln

$$t_m^i = \frac{\int_0^{\infty} C_{Tr} \cdot t dt}{\int_0^{\infty} C_{Tr} dt} \quad (3.44)$$

als Ausdruck für die mittlere Verweilzeit t_m^i oder

$$t_m = \frac{\sum_i t_i C_{Tri} \Delta t_i}{\sum_i C_{Tri} \Delta t_i} \quad (3.45)$$

als Ausdruck für die mittlere diskrete Verweilzeit t_m , die experimentell bestimmt wurde, liefert die Differentialgleichung (3.43) die Lösung für $C_{Tr} = C_{Tr}(x)$ mit

$$C_{Tr} = C_{Tr}(x) = \left(C_{Tr0} - t_m \frac{E_D}{v_m L_{eff}} \right) + t_m \left\{ \frac{E_D}{v_m L_{eff}} e^{\left(\frac{v_m L_{eff}}{E} \right) x} - x \right\} \quad (3.46)$$

In diese Gleichung gehen der Dispersionskoeffizient E_D , die effektive Reaktorlänge L_{eff} , die Dispersionszahl d

$$d = \frac{E_D}{v_m L_{eff}} \quad (3.47)$$

und die Strömungsgeschwindigkeit der Verdrängungsströmung v_m nach Gleichung (3.37) ein.

LEVENSPIEL [102] setzt einen Impuls als Eingangssignal an. Die Lösung als Funktion der Verweilzeit lautet:

$$C = C(t_m) = \frac{1}{2(\pi d)^{\frac{1}{2}}} e^{-\frac{\left(1 - \frac{t}{t_m}\right)^2}{4d}} \quad (3.48)$$

Die Diskussion der Dispersionszahl d

$$d = \frac{E}{v_m L_{eff}} \left\{ \begin{array}{l} = 0 \\ < 0,01 \\ = 0,01 \text{ bis } 0,1 \\ > 0,1 \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} \text{ohne Dispersion} \\ \text{geringe Dispersion} \\ \text{mittlere Dispersion} \\ \text{hohe Dispersion} \end{array} \right\}$$

ermöglicht Aussagen zur Strömungssituation im Reaktor und der wahrscheinlichen Desinfektionseffizienz.

Die originale Arbeit von DANKWERTS [101] geht von einer Massenbilanz über einen allgemeinen Reaktor aus, in welchem eine chemische Reaktion stattfindet. Über die Definitionen von verschiedenen Funktionen, die das Ereignis (in der Reaktionszone, am Ausgang der Reaktionszone), das „Alter“ der Reaktionprodukte bzw. deren Verweilzeiten im Reaktor sowie dessen Eintreffen am Ausgang des Reaktors beschreiben, leitet DANKWERTS die RTD - Methode für Rohrleitungen, Festbettreaktoren, Reaktoren und Mischer ab. Für den Fall der Reaktoren wird abweichend vom Ansatz der Gleichung (3.43) eine homogene Differentialgleichung 2. Ordnung der Dispersion der Konzentration aufgestellt, gelöst, diskutiert und für praktische Anwendungsfälle als eine Näherung gewertet.

Die vorstehend beschriebenen Ansätze stellen wertvolle Werkzeuge zur Optimierung von UV-Reaktoren zur Verfügung und ermöglichen ein besseres Verständnis der komplexen Vorgänge. Allerdings gestattet der Ansatz zur Berechnung der Expositionszeit t_{Ex} nach Gleichung (3.38) über die mittlere Geschwindigkeit v_m - bei einer angenommenen Verdrängungsströmung - und die effektive Reaktorlänge L_{eff} nur eine relativ grobe und ungenaue Aussage.

Die RTD - Methode gestattet die Einschätzung der Effizienz eines jeden Reaktors unabhängig von dessen Bauart. Für die experimentelle Untersuchung ist die *on - line* Messung von Tracern über eine von der Industrie lieferbare und bewährte Sensorik (z.B. Leitfähigkeitsmessung, optische Untersuchung, etc.) effizient möglich; MEREDITH [96]. Es ist jedoch zu bedenken, dass ein Injektionsimpuls, der die örtlich konstante Konzentration eines Tracers über die effektive Querschnittsfläche des Reaktors A_{eff} zum Zeitpunkt t_0 erzeugt, experimentell schwer zu realisieren ist. Die Gestaltung eines Zuschalt- bzw. Ausschaltvorgangs für einen Tracer ohne Zeitverzögerung und unmittelbar vor dem zu untersuchenden Reaktor ist ebenfalls schwer möglich und ohne Berücksichtigung der Fluidmechanik am Schaltort fehlerhaft. Komplexe Strömungen am Ort der Tracerinjektionen beeinflussen die RTD - Verteilung und machen Fehlschlüsse wahrscheinlich. Grundsätzlich werden die Probleme des experimentellen Versuchsaufbaus als lösbar angesehen, so dass in gewissen Grenzen zuverlässige Daten erzielt werden könnten. Der Ansatz einer turbulenten Strömung, die derart beschaffen ist, dass eine Vermischung nur in einer senkrecht zur Hauptströmungsrichtung aufgespannten Fläche auftritt, ist eine Verallgemeinerung, die in der Praxis nicht realisiert werden kann und somit nur ein Hilfsmittel bei der Modellbildung darstellt. Die RTD - Methode und die Bewertung der Dispersionszahl d finden in den Unterlagen des DVGW ([15], [16], [17]), der FIGAWA ([19], [30]), des ATV [29] und der ÖNORM [18] leider keine Erwähnung. Entsprechend der Vorschrift zur Beurteilung der Desinfektionsreaktoren und der Typprüfung wird eine Messung des Desinfektionspotentials mit Testorganismen auf Prüfständen durchgeführt. Dabei entspricht der betreffende injizierte Testorganismus im Prinzip einem Tracer. Gleichwohl wird die Anwendung der RTD - Methode nicht empfohlen und nicht gefordert, obwohl bereits die Testorganismen selbst und die UV-Strahlung absorbierende Substanz eine Untersuchung nach der RTD - Methode anbietet. Partiiell würde deren Anwendung eine qualitativ besser Aussage gestatten, da neben dem mikrobiologischen Befund auch fluidmechanische Verhältnisse im Reaktor einer Beurteilung, wenn auch in Schranken, zugänglich wären.

Damit könnte neben dem Desinfektionspotential die Desinfektionseffizienz des Reaktors besser bestimmt werden.

3.3. Stand der Technik

3.3.1. Analyse der Konstruktionen im UV Reaktorbau - Systematik und Fluidmechanik

Im Zusammenhang mit den Arbeiten ([20] bis [22]) wurden einerseits Recherchen in der Literatur zum allgemeinen Stand der Leistungsfähigkeit der UV - Technologie durchgeführt und andererseits deren speziellen Anwendbarkeit für die Aufbereitung von typischen Schwimmhallenwässern (Schwimmerbeckenwasser, Nichtschwimmerbeckenwasser und Kiesbettfilter-Rückspülwasser) untersucht und beurteilt. Diese Untersuchungen wurden im Zusammenhang mit der hier vorgelegten Arbeit fortgesetzt. Alle erfaßten Firmen griffen und greifen bei der Herstellung ihrer UV - Reaktoren auf Halbzeuge zurück, so dass ein wirtschaftlich effizientes Produzieren möglich war und ist. Nach der Festlegung der Reaktorkonstruktionen und deren grundlegenden Erprobungen wurde diese von den Firmen häufig prinzipiell beibehalten. Allerdings erfolgte eine anwendungsspezifische Änderung der Konstruktions- und Betriebsparameter hinsichtlich des Durchsatzes und der erforderlichen Dosis. Erkenntnisse aus der Forschung, z.B. Wirbelbleche nach KOSCHITZKY et al. [11] und BERNHARDT [12], wurden eingearbeitet. Eine Klassifizierung in Reaktortypen erfolgte bislang in der Literatur, in den Forderungen und Empfehlungen der FIGAWA und in den Firmenunterlagen nicht. Ansätze hierzu enthalten allerdings die Empfehlungen, Richtlinien und Arbeiten FIGAWA [19], ATV Regelwerk [29], HOYER [31], RUDOLPH et al. [38] STOVER et al. [80], NIEUWSTAD et al. [98]. Hinsichtlich einer fluidmechanischen Optimierung ist eine solche Klassifizierung, durch Heranziehen fluidmechanisch entscheidender Parameter, einerseits möglich und andererseits nützlich, da die allgemein erfolgreichsten Konstruktionen entsprechend häufig in der Praxis anzutreffen sein dürften, wo sie sich im harten Alltag seit Jahren bewähren.

Aus allgemein technischer und fluidmechanischer Sicht ist es zweckmäßig acht Ordnungsparameter zu wählen, die durch Merkmale genauer spezifiziert werden. Diese Methode gestattet es, ähnlich dem taxonomischen System in der Biologie, die UV - Reaktoren einer Systematik zuzuführen. Die detaillierte Darstellung der Arbeitsweise und der Ergebnisse ist umfangreich und befindet sich aus praktischen Gründen in der Anlage 3 der Arbeit. An dieser Stelle soll nur die prinzipielle Arbeitsweise dargestellt werden, welche zur Aufstellung der Systematik führte.

Anhand der bislang ausgewerteten Literatur der durchgeführten Datenbankrecherchen und den Firmenunterlagen sind alle UV - Reaktoren in zwei Klassen

- Klasse {A} geschlossene UV - Reaktoren
- Klasse {B} (einseitig) offene UV - Reaktoren

einteilbar. Einseitig offene UV - Reaktoren sind solche, bei denen beispielsweise eine Flüssigkeit im UV - Reaktor mit einem Gas, im einfachsten Fall mit der Atmosphäre, ungehindert und nicht

erzwungen in Kontakt treten kann; Gerinne - Reaktoren, rinnenförmige Reaktoren. Geschlossene Reaktoren sind solche, bei denen dies nicht möglich ist und das betreffende Fluid vollständig vom Reaktormaterial umschlossen wird und das Fluid Kontakt mit dem Wandmaterial des UV-Reaktors hat (Haftbedingungen!).

Die einzelnen Klassen gliedern sich ihrerseits in Gruppen. Die Gruppeneinteilung erfolgt nach der Hauptgeometrie - dem ersten Ordnungsparameter - wie folgt:

- **Klasse {A}** geschlossene UV - Reaktoren
 1. Gruppe „Zylinderförmige UV - Reaktoren“
 2. Gruppe „Quaderförmige UV - Reaktoren“

- **Klasse {B}** (einseitig) offene UV - Reaktoren
 1. Gruppe „Rinnenförmige UV - Reaktoren“
 2. Gruppe „Kaskadenförmige UV - Reaktoren“
 3. Gruppe „Beckenförmige UV - Reaktoren“

Die Anwendung des Verfahrens erfolgte bei der Analyse von bislang 69 verschiedenen UV-Reaktormodellen, die sich im Produktionsprogramm der Hersteller befinden. Als Ordnungsparameter wurde gewählt:

- | | | |
|----|--|---------------------------|
| 1. | Hauptgeometrie (des Reaktorgrundkörpers)
(Gruppenparameter) | <Merkmal - Code 1-2, 1-3> |
| 2. | Hauptströmungsrichtung | <Merkmal - Code 1-2> |
| 3. | Zufluss | <Merkmal - Code 1-4> |
| 4. | Abfluss | <Merkmal - Code 1-6> |
| 5. | Arbeitsrichtung | <Merkmal - Code 1-3> |
| 6. | Strahlungsquelle | <Merkmal - Code 1-5> |
| 7. | Anzahl der Strahlungsquellen | <Merkmal - Code 1-2> |
| 8. | Anordnung der Strahlungsquellen | <Merkmal - Code 1-6> |

Setzt man aus der Klasseneinteilung und dem Merkmalscode, der die Gruppeneinteilung an erster Stelle automatisch enthält, die neunstellige Kennung zusammen (ein Buchstabe, eine Kennzahl aus 8 Ziffern) und ordnet diese der Größe nach, ergibt sich eine praktisch leicht handhabbare Einteilung - eine Systematik der UV - Reaktoren. Der in der Arbeit verwendete Ausdruck „**Klasse-Gruppe-Typ**“ eines Reaktors setzt sich aus der Klassenbezeichnung, dem ersten Ordnungsparameter „Hauptgeometrie“ (Gruppenparameter) und den der Größe nach (Zahlengröße!) geordneten Merkmalen zusammen. Demnach ist der **Reaktor A-1-3** (Kennung {A11121111} = Gruppe + <Kennzahl>) ein UV-Reaktor aus der Klasse der geschlossenen, zylindrischen Reaktoren mit geradem Zufluss in Richtung der Hauptströmungsrichtung und seitlichem Abfluss.

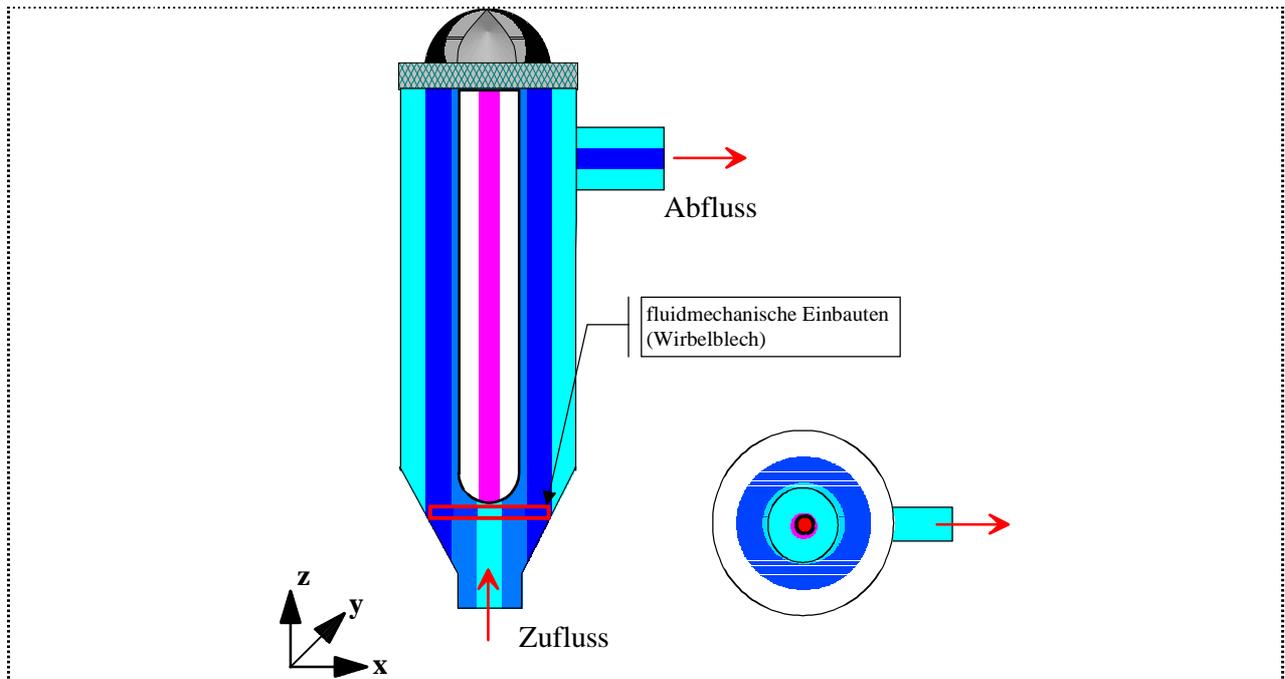


Bild 3-15: Darstellung des Reaktors {A-1-3}

Je kleiner die Kennzahl - im vorstehenden Fall $\langle 11121111 \rangle$ - ist, desto näher steht der betreffende Reaktor der theoretisch abgeleiteten idealen Reaktorform ({A-1-3} - Platz drei nach dem idealen Reaktor {A-1-0}); vgl. Bild 3-16. Das Verfahren erwies sich als sehr nützlich bei der Analyse der Recherche-Ergebnisse und deren Verwaltung in einer Datenbank

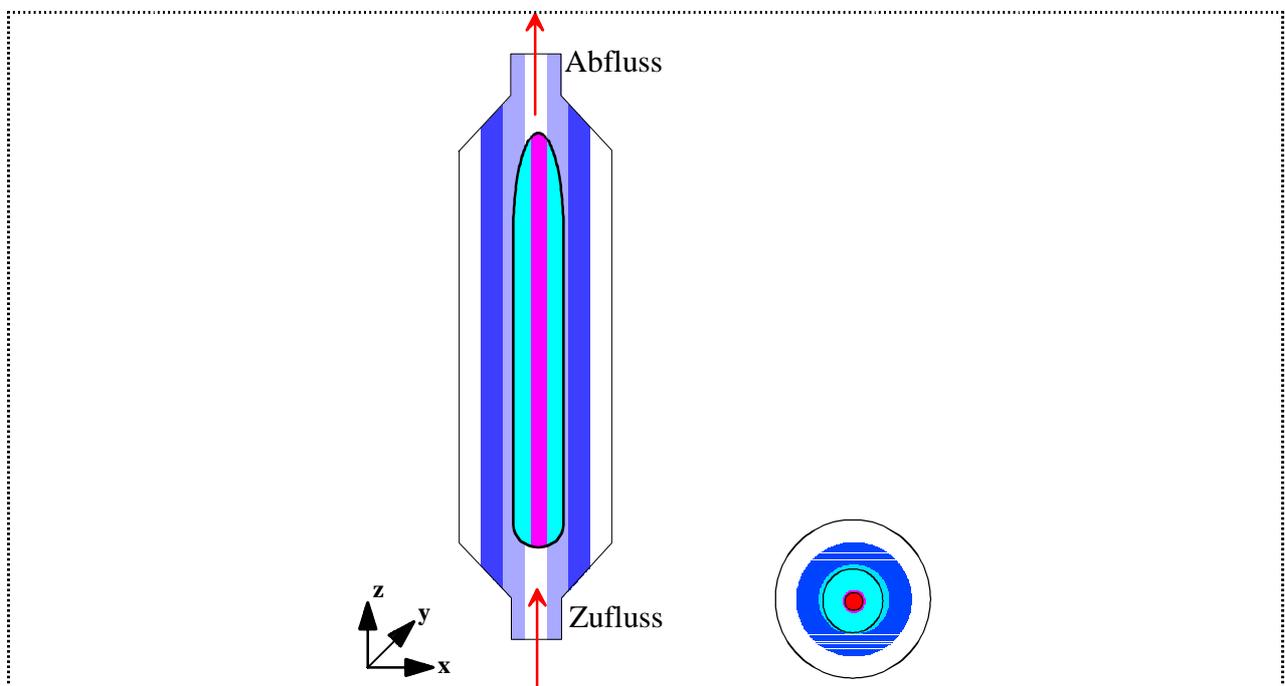


Bild 3-16: Darstellung des Reaktors {A-1-0}

Es sei darauf verwiesen, dass die entwickelte Systematik jederzeit erweitert werden kann.

In der Klasse {A} „Geschlossenen Reaktoren“ sind insgesamt 27 verschiedene Reaktorkonstruktionen bekannt. Diese teilen sich in zwei Gruppen {1} und {2}, von denen die Gruppe der „Zylinderförmigen Reaktoren“ {1} über 25 und die Gruppe der „Quaderförmigen Reaktoren“ {2} über 2 verschiedene Konstruktionen verfügt. In der Klasse der (einseitig) offenen Reaktoren {B} sind insgesamt 5 verschiedene Reaktorkonstruktionen bekannt. Die Gruppen der „Rinnenförmigen Reaktoren“ {1} und der „Kaskadenförmigen Reaktoren“ {2} verfügen über je 2 grundlegende Konstruktionen, während in der Gruppe der „Beckenförmigen Reaktoren“ {3} lediglich eine grundlegende Konstruktion bekannt ist. Alle untersuchten und in der Arbeit erwähnten Konstruktionen befinden sich im Praxiseinsatz und haben sich dort bewährt.

Tabelle 3-6: Systematik der UV - Reaktor- Konstruktionen

Klasse	Anzahl	Gruppe	Anzahl
	Prozentsatz		Prozentsatz
Klasse {A}	27 (84,4 %)	Gruppe {1}	25 (78,15%)
		Gruppe {2}	2 (6,25%)
Klasse {B}	5 (15,6%)	Gruppe {1}	2 (6,25%)
		Gruppe {2}	2 (6,25%)
		Gruppe {3}	1 (3,12%)
Anzahl d. Klassen	Anzahl d. Konstruktionen	Anzahl d. Gruppen	Anzahl d. Konstruktionen
2	32	5	32

Unter der Gesamtheit der in der Arbeit untersuchten Reaktorkonstruktionen sind einerseits solche, auf die von den Herstellern nur wenige zurückgreifen wird. Andererseits sind solche Reaktorkonstruktionen bestimmbar, auf die oft von den verschiedenen Herstellern zurückgegriffen wird. Dabei handelt es sich um in der Praxis bewährte Konstruktionen, deren Zuverlässigkeit und Effizienz durch ihre häufige Verwendung belegt ist, vgl. Tabelle 3-7.

Tabelle 3-7: Bewährte UV- Reaktorkonstruktionen

	Klasse	Gruppe	Typ	Kennung	Kennzahl	Anzahl
						Häufigkeit
1.	Klasse {A}	Gruppe {1}	Typ-7	{A11221111}	<11221111>	7
						11,111%
2.	Klasse {A}	Gruppe {1}	Typ-3	{A11121111}	<11121111>	5
			Typ-11	{A11223111}	<11223111>	7,937%
3.	Klasse {A}	Gruppe {1}	Typ-8	{A11221123}	<11221123>	4
						6,349%

Die vollständigen Angaben zu vorstehenden und den übrigen Reaktorkonstruktionen sind den Tabellen der Anlage 3 entnehmbar. In dieser Anlage befinden sich auch die schematischen Darstellungen aller untersuchter UV-Reaktorkonstruktionen.

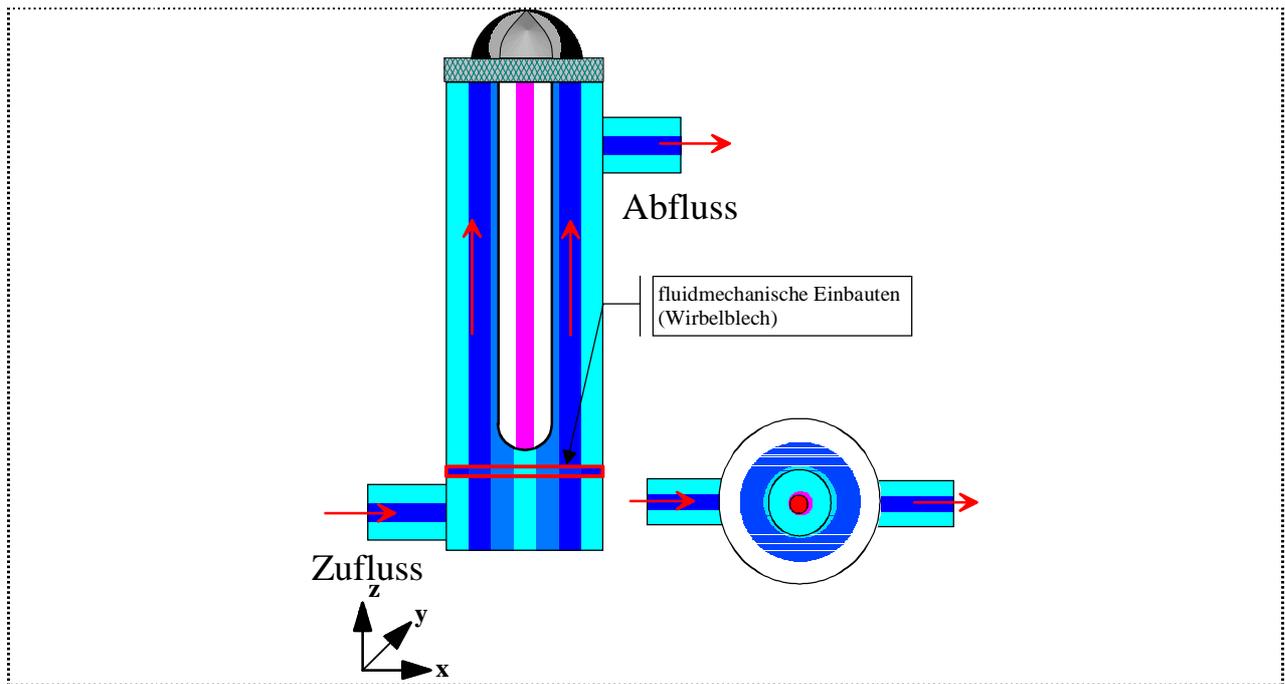


Bild 3-17: Häufigste Reaktorkonstruktion, Reaktor {A-1-7}; {A<11221111>}

Unter den zur Auswertung herangezogenen Herstellern von UV - Reaktoren und Anbietern von UV - Technologien gibt es solche, die eine außerordentliche breite Palette von UV - Reaktorkonstruktionen in ihrem Angebot haben, vgl. Tabelle 3-8.

Tabelle 3-8: Firmenvergleich

	Firma	Anzahl Konstruktionen	Anteil bezogen auf die Gesamtheit der Konstruktionen
1.	WEDECO Katadyn	9	14,29 %
2.	TROJAN	7	11,11%
3.	VitaTech UV - Systeme	6	9,52%

Die entsprechenden Angaben zu den verbleibenden Herstellern von UV - Reaktoren enthält ebenfalls die Anlage 3. Den Unterlagen der dort aufgeführten Quellen zufolge, arbeiten in der Praxis 67,9% aller untersuchten UV - Reaktorkonstruktionen gegen die Wirkung der Schwerkraft und 32,1% der Reaktoren arbeiten senkrecht zur Wirkung der Schwerkraft. In keinem Fall werden die Reaktoren parallel zur Wirkrichtung der Schwerkraft betrieben; vgl. Tabellen Anlage 3. In physikalischer und ingenieurtechnischer Hinsicht bietet der Betrieb eines UV-Reaktors gegen die Wirkung der Schwerkraft einige Vorteile, die sich in der Verhinderungen von Störfällen und in einer leichteren Handhabbarkeit (auch theoretisch / rechentechnisch) bemerkbar machen.

Aus physikalisch-theoretischer Sicht ermöglicht der Betrieb gegen die Schwerkraft die Ausbildung eines Strömungsfeldes ohne eine Verstärkung der Reibung zwischen den Strömungsschichten in Abhängigkeit von der Masse der Fluidsäule über der betrachteten Schicht. Besonders bei der Behandlung von *nicht-Newtonschen Flüssigkeiten* ist dieser Umstand wesentlich für die theoretische Betrachtung, da das Modell einfacher gestaltet und in der Handhabung vorteilhafter ist. Die Ausbildung des Geschwindigkeitsfeldes wird nicht unnötig kompliziert. Ein Geschwindigkeitsgradient von der unteren zur oberen Schicht des strömenden Fluid tritt nicht auf. Mathematische Ansätze für zylindersymmetrische bzw. rotationssymmetrische Reaktoren sind ohnehin relativ einfach und reduzieren den Aufwand für numerische Simulationsrechnungen. Aus ingenieurtechnischer Sicht sprechen folgende Argumente für die vorstehend spezifizierte Arbeitsrichtung und Geometrie des Reaktors:

1. Das Entfernen von Gaseinschlüssen während der Befüllung der Apparatur ist mit einfachen technischen Mitteln (Hähne, Verschluss-Schrauben, automatische Entlüftungsventile) leicht möglich.
2. Das Entfernung des Fluids für Inspektionszwecke ist mit einfachen technischen Mitteln leicht möglich.
3. Automatische Entlüftungsventile können zweckmäßig und unkompliziert in die Konstruktionen eingefügt werden und verbessern die Funktionssicherheit des Reaktors.
4. Die beschriebene Hauptgeometrie ist im Apparatebau häufig in der Anwendung, somit liegen zahlreiche Produktionserfahrungen vor.
5. Komplikationen bei der Oberflächenbearbeitung und Vergütung treten nicht auf und die Reaktorfertigung aus Edelstahl wird in der Industrie beherrscht.

In der Arbeit wird sich, im Fall von vergleichenden Testrechnungen auf einzelne ausgewählte und in der Praxis häufig anzutreffende UV-Reaktoren bezogen. Es handelt sich dabei um die UV-Reaktoren {A-1-0}, {A-1-3} und {A-1-7} sowie {A-1-7}b, siehe weiter unten. Nach der Erprobung der fluidmechanischen Modelle in Fallbeispielen können alle übrigen Reaktoren nach dem Verfahren theoretisch erprobt und optimiert werden.

3.3.2. Analyse von Konstruktionen im UV-Reaktorbau - Strahlertechnik

Die für die gewünschte mikrobiologische Wirkung notwendige Strahlung sollte zweckmäßig von einer solchen Strahlungsquellen zur Verfügung gestellt werden, die über nachstehenden Haupteigenschaften verfügt:

- Emission von Licht bzw. Strahlung eines solchen Wellenlängenbereiches oder exakt einer solchen Wellenlänge, in welchem oder durch welche die größte mikrobiologische Wirkung erzielt wird.
- Emission dieser Strahlung mit größtem Wirkungsgrad; das heißt die zugeführte (elektrische) Energie ist möglichst vollständig in Strahlung des benötigten Spektralbereiches umzusetzen -

große Lichtausbeute in dem bereits diskutierten Wellenlängenbereich des UV-C Strahlungsreiches.

- Die Physik der Strahlungsquelle gestattet deren effektive Herstellung und ist kompatibel mit den fluidmechanischen Forderungen bei dem Einsatz der Strahlungsquelle/en in von einem Fluid (hauptsächlich Wasser) durchströmten UV - Reaktor.

Strahlungsquellen, die diese Anforderungen sehr gut erfüllen, sind die Quecksilberdampfstrahler und unter diesen besonders die Quecksilber - Niederdruckstrahler. Neben diesen gibt es die Quecksilber - Mitteldruckdruckstrahler, die Quecksilber - Hochdruckstrahler und die Quecksilber - Höchstdruckstrahler. Derzeit findet man eine industrielle Weiterentwicklung der Quecksilber - Niederdruckstrahler in der Form von *multi-wave* Strahlern oder hochleistungs Quecksilber - Niederdruckstrahler, die durch eine Dotierung der Gasfüllung erreicht wird. Alle Quecksilber - Niederdruckstrahler sind Gasentladungslampen, in denen die auf freie Elektronen - zufällig vorhandene oder gezielt erzeugte - wirkende elektrische Spannung ausreicht, diese derart zu beschleunigen, dass sie ihrerseits in der Lage sind, die Quecksilberatome durch unelastische Stöße in einen quantenmechanisch angeregten Zustand zu versetzen, vgl. Bild 3-18.

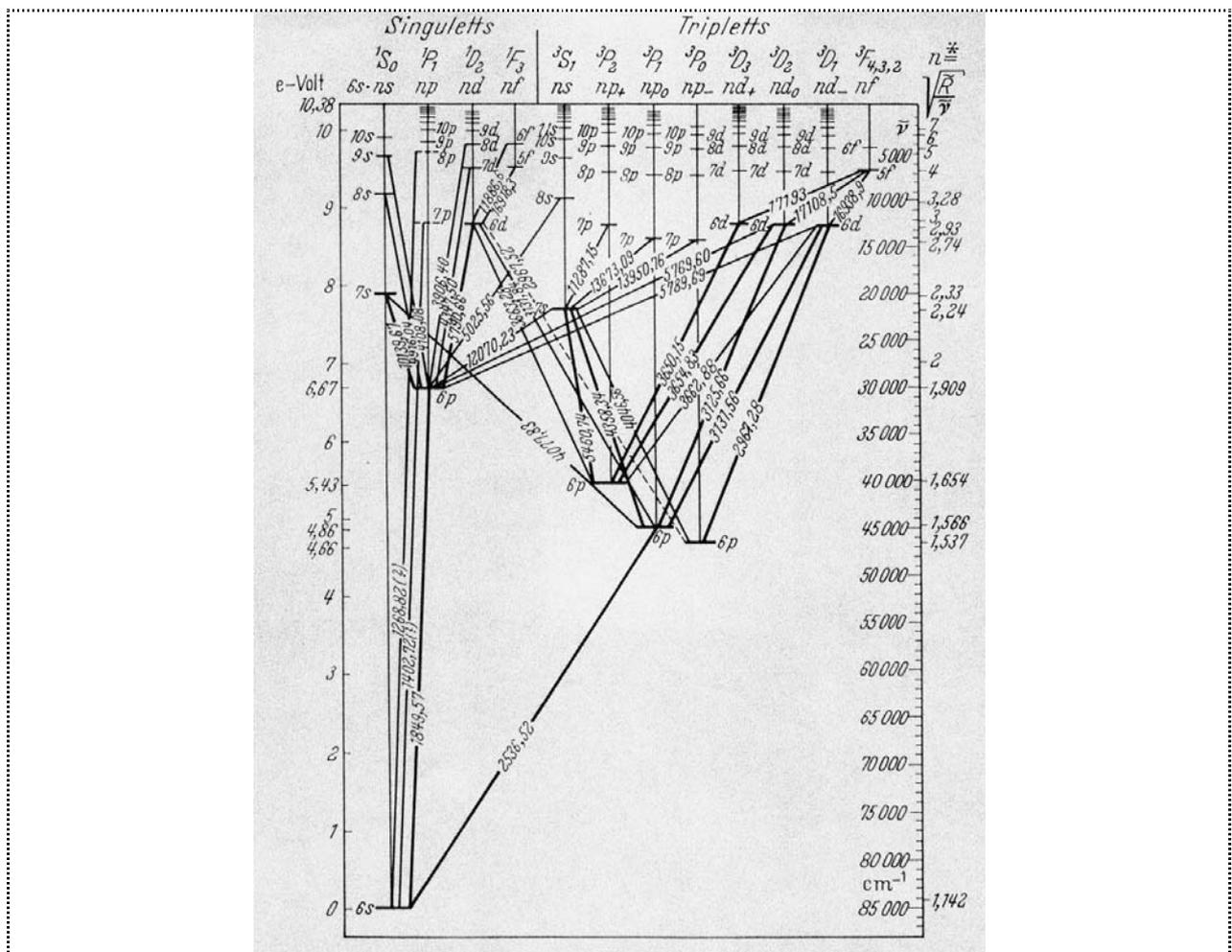


Bild 3-18: Vollständiges Emissionsspektrum des Quecksilbers, nach HELLWEGE „Einführung in die Physik der Atome“

Das im höheren energetischen Niveau befindliche Elektron nimmt spontan seinen ursprünglichen Zustand wieder ein, indem die aufgenommene Energie in Form eines Lichtquants definierter Wellenlänge abgegeben wird. Die historisch grundlegenden Versuche zur Quantenmechanik von James Franck und Gustav Hertz belegen unter anderem, dass die Anregungsspannung von 4,9 V bei Quecksilberdampf dazu führt, dass Licht der Wellenlänge von 253,7 nm emittiert wird; ([107], [108], [107], [108], [111]). Nach SCHPOLSKI [107] beträgt die theoretische Wellenlänge 252 nm und AHRENS et al. [114] geben eine gemessene Wellenlänge von 253,6519 nm an. In der Literatur GERTHSEN [105], v. ARDENNE et al. [106] und hauptsächlich in Firmenprospekten wird die Nennwellenlänge von 254 nm verwendet und bevorzugt angegeben.

Wegen des Absorptionsmaximums der DNS in der Nähe der Emissionslinie der Quecksilber - Niederdruckstrahlern, bei der etwa 40% der zugeführten elektrischen Energie in Strahlung umgewandelt wird, werden diese Strahler derzeit zu idealen Strahlungsquellen. Die Tabelle 3-9 stellt die technischen Daten verschiedener Strahler für Vergleichszwecke zusammen.

Tabelle 3-9: Vergleich von Strahlungsquellen - Quecksilber - (~)druckstrahlern

Strahler Bezeichnung	Quecksilber - Niederdruckstrahler	Quecksilber - Mitteldruckstrahler	Quecksilber - Hochdruckstrahler	Quecksilber - Höchstdruckstrahler
Füllung	Quecksilber	Quecksilber	Quecksilber	Quecksilber
Dotierung	Argon	Argon		
Innendruck (bei RT) [bar]	0,01 - 1,0	1,0 - 10,0	10; 100 in Betrieb nach [105], [106]	20 - 80, 100
Emissionswellenlänge	253,7 nm (185 nm) Linienspektrum	200 nm bis 600 nm kont. Spektrum	kont. Spektrum	kont. Spektrum
Wirkungsgrad $\lambda=253,7\text{nm}$ $\lambda = 185\text{nm}$	40 % (5 - 10 %)	15 %		
Wandtemperatur	40 °C	600 - 900 °C	ca. 800°C [108]	
Betriebsspannung	40V-162V	145V - 1750V		
Lampenstrom	0,35A - 0,41A	7,5A - 9,5A		
Zündspannung , -frequenz	220V / 2 - 5 kV	250V - 2700V		
Plasmalänge	200mm - 817mm	108mm - 1010mm	20 mm - 100 mm	0,5mm - 5 mm
Leuchtdichte				
Strahlergeometrie	zyl. Rohr	zyl. Rohr	zyl. Rohr	zyl. Rohr m. kugel- förmiger o. ellipsoi- der Erweiterung
Rohrdurchmesser	15mm	19mm, 22mm, 25mm		
Wandmaterial	Quarzglas, synth. Quarzglas (SUPRASIL)	Quarzglas	Quarzglas	Quarzglas
Nutzungsdauer	ca. 10 000 h	> 1500 h	3000 - 12 000h (65%)	200 h
Züandsicherheit - Temperaturbereich				

Die *multi-wave* Strahler und Hybridstrahler werden als Quecksilberhochleistungsstrahler bezeichnet, vgl. oben. Allerdings laufen bei diesen keine qualitativ neue physikalischen Prozesse ab. Anstelle der positiven Säule, in welcher unter niedrigen Druckbedingungen (Quecksilber - Niederdruckstrahler) die unelastischen Elektronenstöße dazu führen, dass die Elektronen der Gasmoleküle aus dem Grundzustand in angeregte Energieniveaus gehoben werden, tritt bei Quecksilber - Mitteldruckstrahlern, Quecksilber - Hochdruckstrahlern und Quecksilber - Höchstdruckstrahlern ein Plasma, welches Ionen und freie Elektronen enthält. Die sogenannte *gebundene - gebundene* Strahlung (gg - Übergang) wird durch die *frei - frei* Strahlung (ff - Übergang) und *frei - gebundene* Strahlung (fg - Übergang) ersetzt. Diese Vorgänge gehen optisch mit der Ablösung des Linienspektrums durch ein kontinuierliches Emissionsspektrum einher; vgl. Bild 3-3, Bild 3-4, Bild 3-9 und Tabelle 3-9 und 3-10.

Tabelle 3-10: Vergleich von Hochleistungsstrahlungsquellen

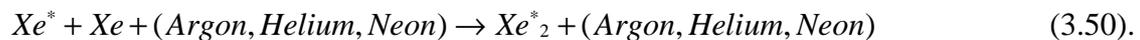
Strahler Bezeichnung	<i>Quecksilber Amalgam Strahler</i>	<i>Hybrid Strahler</i>	<i>Excimer Strahler (vergl. Tab. 3-10)</i>
Füllung	Quecksilber	Quecksilber	Edelgasdimere
Dotierung	Argon + Amalgam	Edelgase + Dotierung	He ₂ , Ne ₂ , Ar ₂ , Kr ₂ , Xe ₂ , auch Hg ₂ F ₂ , Cl ₂ , Br ₂
Innendruck (bei RT) [bar]	0,01 - 1,0		
Emissionswellenlänge	253,7nm, 440 nm, 550 nm, (185 nm) Linienspektrum	Max. bei 253,7nm, 265nm, 280nm, 300nm, 315nm kontinuierl. Spektrum	172nm, 222nm, 308nm Linienspektrum
Wirkungsgrad $\lambda=253,7\text{nm}$ $\lambda = 185\text{nm}$	30% (5 - 10%)	ca. 15 %	22,5 % auf der betreffenden Linie [117]
Wandtemperatur	90°C		Kühlung 20 °C
Betriebsspannung	30V - 115V		< 4000V
Lampenstrom	0,75A - 2,3A		
Zündspannung , -frequenz	220V / 2 - 5 kV		4 kV + 230 - 300 kHz
Plasmalänge	198 - 1062mm		330 mm, 635 mm
Leuchtdichte			
Strahlergeometrie	zylindrisches Rohr	zylindrisches Rohr	zylindrisches Rohr
Rohrdurchmesser	10mm, 15mm, 19mm		
Wandmaterial	Quarzglas, synth. Quarz- glas - (SUPRASIL)	Quarzglas	Quarzglas, synth. Quarz- glas - (SUPRASIL)
Nutzungsdauer	10 000h		> 1500 h, >4000 [117]
Züandsicherheit - Temperaturbereich			

Um für bestimmte Anwendungsfälle UV-Strahlung einer gewünschten Wellenlänge zur Verfügung zu haben, die mit einer hohen Intensität aber ohne thermische Einflüsse wirkt, wurden die EXCIMER-Strahler (*excited dimere*) entwickelt, Tabelle 3-10. Von diesen wird ein Effekt genutzt, der darin besteht, dass Quecksilber (Hg^{*}₂), die Edelgasdimere, Xenon (Xe^{*}₂), Argon (Ar^{*}₂), Krypton (Kr^{*}₂), die Halogendimere Chlor (Cl^{*}₂), Brom (Br^{*}₂), Jod (J^{*}₂) und bestimmte Edelgas -

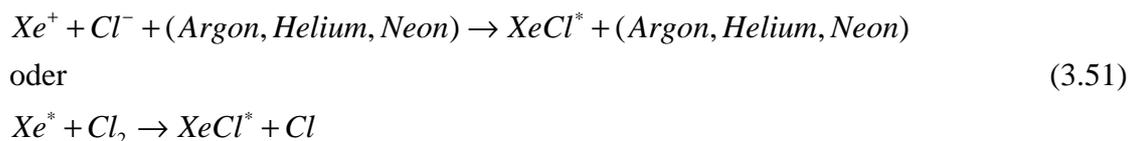
Halogen - Verbindungen (KrCl^* , KrF^* , XeJ^* , XeBr^* u.a.; siehe HIPPLER et al. [111], Seite 346, EXIPLEXE; BOYD et al. [117], KOGELSCHATZ et al. [118]) in der Lage sind, im angeregten Zustand stabile Bindungen des betreffenden Systems zu bilden (Excimer - Zustände). Wird der Grundzustand eingenommen, geht dies mit der Dissoziation der Moleküle und der Emission von Lichtquanten einher; *gebundene - frei Strahlung* (gf - Übergang) v. ARDENNE et al. [106], RUTSCHER et al. [108], HIPPLER et al. [111], ROMPE et al. [113]. In der Praxis sind EXCIMER-Strahler, die eine Strahlung mit einer Wellenlänge von 172 nm - nach [111] 175 nm - (ArCl^*), 222 nm (KrCl^*), 308 nm (XeCl^*) und keine Infrarotstrahlung emittieren im Einsatz (Werksangaben der HERAEUS - Noblelight GmbH, Hanau [K10], vgl. Anlage 3). Nach HIPPLER et al. [111] werden von XeJ^* und XeBr^* die Wellenlängen 253 nm bzw. 283 nm emittiert. BOYD et al. [117] demonstriert die Dimer - Bildung am Beispiel des Xenons und des Chlors in den Anregungsfällen:



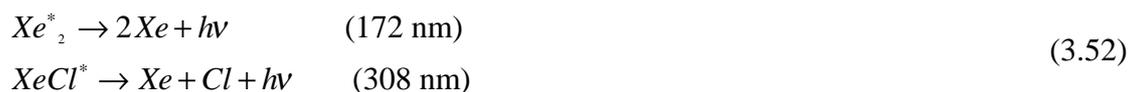
Die Bildung der Edelgasdimere Xe^* werden als Dreikörperproblem zwischen einem angeregten Xe - Atom, einem nicht angeregten Xe -Atom und einem Buffergasatom/molekül (Argon, Helium, Neon) erklärt



Bei den XeCl^* - Exiplex-Bildung (*excited complexe*) liegt der Reaktionsmechanismus



vor. Da die energetisch angeregten Dimere und Komplexe labil sind, gehen sie in den Grundzustand unter Emission von Strahlung



über, weitere Details vgl. BOYD et al. [117] und KOGELSCHATZ et al. [118]. Obwohl zwei Mechanismen der Strahlungsentstehung nachgewiesen sind - *excited dimere* und *excited complexe* - hat sich die Bezeichnung EXCIMER - Strahler übergreifend durchgesetzt.

Um die Ozonbildung zu vermeiden und um eine technisch vernünftige Wirkungsweise zu erreichen, wird zwischen Strahlungsquelle und zu bestrahlendem Objekt oft eine Stickstoffatmo-

sphäre geschaffen. Bekannte Einsatzfälle der EXCIMER-Strahler sind beispielsweise die Aufspaltung und Mineralisierung von organischen Schadstoffen, die Modifikation und Verbesserung von Siliziumdioxidschichten, die Oberflächenaktivierung, die Verwendung in Trocknungssystemen für Farbstoffe von Aufdrucken in der Verpackungsmittelindustrie.

Da es auf Grund der gezielt erzeugbaren monochromatischen Spektren sehr nahe liegt, die EXIMER - Strahler für die Desinfektion von Wasser einzusetzen, wurde die Tabelle 3-11 erarbeitet, vgl. BOYD et al. [117], KOGELSCHATZ et al. [118]. Allerdings sollte bei der Untersuchung der Verwendbarkeit der Strahlungsquelle, die Eigenschaften des Mediums Wasser -Extinktion nicht vernachlässigt werden. Die Untersuchungen an Kiesbettfilter - Rückspülwasser demonstrieren den Einfluss biologischen Materials (Mikroorganismen, geflockte Mikroorganismen, Huminstoffe) auf die Extinktion bei definierten Wellenlängen; vergleiche [20] bis [23]. Auch die Absorption des reinen Wassers ist ab einer Schwellenwellenlänge nicht mehr zu vernachlässigen, OPPENLÄNDER [27], MASSCHELEIN [28], SMITH et al. [179].

Tabelle 3-11: EXCIMER-Strahler für Desinfektionszwecke und Extinktionswerte in [1/cm]; [117], [118] und [20] bis [23]

Strahlungs-Quelle	Hg - ND $\lambda=253,7$ nm	KrBr* $\lambda=207$ nm	KrCl* $\lambda=222$ nm	KrF* $\lambda=248$ nm	XeI* $\lambda=253$ nm	Cl ₂ * $\lambda=259$ nm	XeBr* $\lambda=283$ nm
Energie [eV]	4,90	5,95	5,58	5,01	4,91	4,79	4,41
dest. Wasser	0,0444	0,2753	0,1223	0,0467	0,0457	0,0438	0,0409
Trinkwasser	0,14	1,1003	0,5482	0,151	0,1414	0,1322	0,1024
WL-Spülung	2,5005	2,5005	2,5005	2,5005	2,5005	2,5005	2,2346
W-Spülung	0,6128	2,3287	1,3032	0,6473	0,616	0,5846	0,4715

Ein weiterer Vorteil der EXIMER-Strahler besteht darin, dass ihre Geometrie im Grunde genommen frei wählbar ist und diese künftig fluidmechanischen und reaktoroptischen Forderungen, nach Überwindung technologischer Schwierigkeiten, optimal angepasst werden können. Wird ein EXCIMER-Strahler beispielsweise in Wasser betrieben, so ist bei der Anwendung energiereicherer Strahlung -kürzere Wellenlängen- die Ozonbildung aus dem Sauerstoff zufällig auftretender Luftblasen zu beachten und gegebenenfalls zu unterdrücken. Andererseits kann dieser Umstand, sofern er insgesamt in das angestrebte technologische Verfahren passt, gezielt eingesetzt werden. Weiterhin besteht ein zu lösendes technisches Problem darin, die Anregungsenergie -Betriebsenergie- in die betreffende Reaktorkonstruktionen -Klassen {A} und {B}- einzukoppeln.

Elektrodenlose Niederdruck - Glimmentladungen wurden erstmals in den Jahren 1705/06 in elektrostatisch aufgeladenen Glasgefäßen von F. Hawksbee nachgewiesen. Nach RUTSCHER et al. [108] stammen erste Quecksilber - Niederdruckstrahler nach P. Cooper-Hewitt aus dem Jahre 1900 und Quecksilber - Hochdrucklampen aus dem Jahr 1930. Nach ROMPE et al. [110] hat bereits Crooks 1879 in Weiterführung der Faradayschen Hypothese angenommen, den „vierten Ag-

gregatzustand oder die strahlende Materie“ in seinem Entladungsrohr entdeckt zu haben. Rompe und Steenbeck haben dies in ihrem aus dem Jahr 1936 stammenden Aufsatz nur als „Vorahnung des Plasmazustandes“ gelten lassen. Nach HIPPLER [111] geht das wissenschaftlich Konzept des Plasmas auf Langmuir im Jahre 1926 (1923 LANDAU et al. [112]) zurück. JAWORSKI et al. [109] unterscheidet nach dem Ionisierungsgrad zwischen schwach ionisiertem Plasma, mittelstark ionisiertem Plasma und vollständig ionisiertem Plasma. Die klassische Versuchsanordnung von Franck und Hertz erzeugt keine Ionen sondern versetzt die Quecksilberatome in einen quantenmechanisch angeregten Zustand.

Folglich ist eine Unterscheidung von Strahlungsquellen nach solchen auf der Basis der Gasentladung und nach solchen auf der Basis eines Plasmas gerechtfertigt. Auf Grund der natürlichen Radioaktivität sind in der Gasfüllung der Gasentladungslampen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit immer freie Elektronen und Ionen vorhanden.

Verschieden Autoren, GOLDSTON et al. [107], RUTSCHER et al. [108], stellen es als Ansichtssache dar, bei welcher Konzentration an freien Ladungsträgern ein schwach ionisiertes Gas in ein Plasma übergeht. Dem aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisstand in der Plasmaphysik ([105], [106], [107], [108]) folgend, sind auch Glimmentladungen (positive Säule der Glimmentladungen) dem Plasma zuzuordnen, so dass man den allgemeinen Begriff Plasmastrahlungsquellen physikalisch exakt verwenden kann; ([110], [111]). Schließlich hilft die natürliche Anwesenheit von freien Ladungsträgern beim in Gang setzen - Zünden - der Gasentladung und beim Betrieb der Gasentladungsstrahlungsquellen. Wird die Strahlungsquelle unmittelbar bzw. mittelbar nur für Beleuchtungszwecke eingesetzt, bezeichnet man diese technische Konstruktion in dieser Anwendung als Gasentladungslampe. Im Zusammenhang mit der mikrobiologischen Anwendung und bei der Anwendung in der modernen Technik (fotochemische Verfahren, Herstellung von elektronischen Bauelementen etc.) handelt es sich um Strahler.

In der Praxis des Strahlungsquellenbaus und bei ihrer Anwendung sind einige plasmaphysikalische Zusammenhänge und Phänomene zu berücksichtigen. Diese sind tiefgründig erforscht und können unmittelbar in ingeniertechnische Arbeiten einfließen; ([105], [106], [108], [115], [116], [117]). Finden diese in der Konstruktions- und Fertigungsphase Berücksichtigung und werden diese bei der Definition der Betriebsbedingungen dieser Strahlungsquellen (Quecksilber-Niederdruckstrahler, Mitteldruckstrahler, Hochdruckstrahler, Höchstdruckstrahler Hochleistungsstrahler und auch EXCIMER-Strahlungsquellen) beachtet, so ist ein optimaler Betrieb der betreffenden Strahlungsquelle möglich; Strahlungsausbeute, Wandtemperatur der betreffenden Strahlungsquelle, Zündspannung etc., vgl. Tabellen 3-9, 3-10, 3-11. Auch die Festlegung der viel diskutierten idealen Betriebsweise der Plasmastrahlungsquellen und damit des UV-Reaktors - *die Senkrechte, entgegen den Vektor der Schwerkraft gerichtete*-, ist durch die entsprechenden Schlußfolgerungen aus der Plasmaphysik der Strahlungsquellen und der Fluidmechanik des UV-Reaktors möglich.

3.3.3. Allgemeine Leistungsanforderungen an den UV - Reaktorbau - Normen, Arbeitsblätter, technische Mitteilungen, Merkblätter -

Während in Österreich die ÖNORM 5873 [18] die „Anforderungen an Anlagen zur Desinfektion von Wasser mittels Ultraviolett - Strahlen“ regelt, ist in der Bundesrepublik Deutschland das DVGW Arbeitsblatt W293 „UV - Anlagen zur Desinfektion von Trinkwasser“ aus dem Jahr 1994 [15] und das DVGW Arbeitsblatt W294 „UV - Desinfektionsanlagen für die Trinkwasserversorgung - Anforderungen und Prüfung“ aus dem Jahr 1997 [16] und die aktuellen Entwürfe [17] heranzuziehen. Die in dem DVGW Arbeitsblatt W294 [16] aufgestellten technischen Regeln lehnen sich eng an die ÖNORM an. Beispielsweise unterscheidet sich der Aufbau eines Messstandes zur Prüfung des Reaktors hinsichtlich seines Desinfektionspotentials nur unwesentlich vom österreichischen Vorbild, vgl. Bild 3-19. Das DVGW - Arbeitsblatt W294 [16] beschränkt seine Definitionen und Forderungen auf Wasserversorgungsanlagen nach DIN 2000 und DIN 2001. Dabei handelt es sich ausschließlich um die Bereiche zentrale Trinkwasserversorgung und Einzeltrinkwasserversorgung. Andere Einsatzgebiete, die es zweifelsfrei gibt, sind ausdrücklich nicht Gegenstand dieses Arbeitsblattes. Die ÖNORM empfiehlt an dieser Stelle die sinnngemäße Anwendung der Festlegungen auf zu desinfizierende Wässer, die nicht Trinkwässer sind. Somit ist der Geltungsbereich der ÖNORM weiter gefaßt.

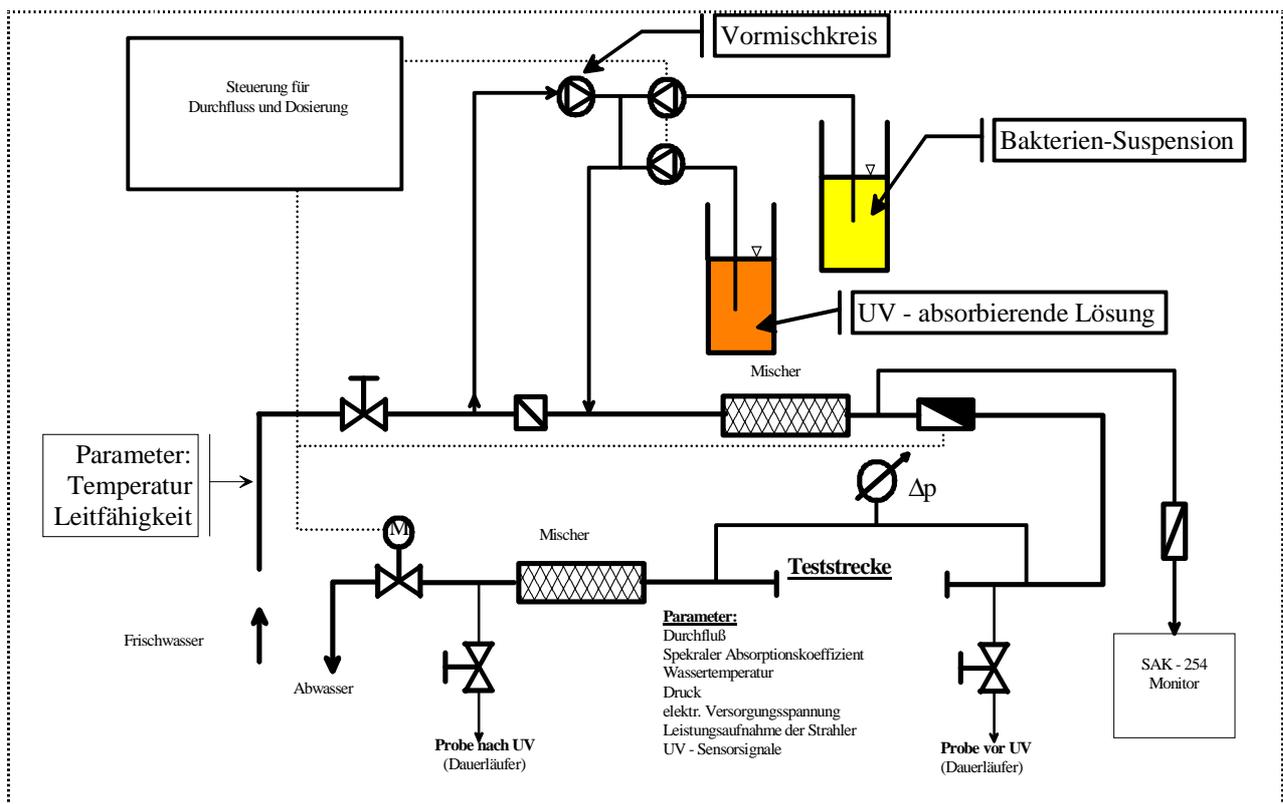


Bild 3-19: Schema des Mess- und Prüfstandes für UV - Reaktoren

In der Bundesrepublik Deutschland empfiehlt sich außerdem die Anwendung und Berücksichtigung der Technischen Mitteilung 20/98 der FIGAWA „UV-Bestrahlung in der Trinkwasser- und Abwasserbehandlung zu Desinfektionszwecken“ [19] und das zu Rate ziehen des ATV Merkblattes ATV-M205 „Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser“ [29].

Das DVGW Arbeitsblatt W294 [16] und die ÖNORM 5873 [18] stellen an die UV Reaktorkonstruktionen nachstehende allgemeine Anforderung (Zitate):

Arbeitsblätter DVGW (W 293 [15]) W294 [16]	ÖNORM 5873 [18]
UV - Anlagen zur Trinkwasserdesinfektion müssen ein Desinfektionspotential aufweisen, das einer mikrobizid wirkenden Raumstrahlung von 400 J/m ² entspricht.	Es muss sichergestellt sein, dass durch die Behandlung des Wassers in der Desinfektionsanlage eine reduktionsäquivalente Bestrahlungsdosis von 400 J/m ² (40 mJ/cm ²) bezogen auf Strahlung mit einer Wellenlänge von 253,7 nm erreicht wird.

Wie im Abschnitt 3.1. unter 3.1.1., 3.1.2. und im Abschnitt 3.3. unter 3.3.2. zum Ausdruck gebracht und durch die dort genannten Literaturstellen belegt wird, ist die Nennung der Wellenlänge der Quecksilberresonanzstrahlung dem Umstand geschuldet, dass diese in der Nähe des Absorptionsmaximums der DNS liegt (ÖNORM: $\lambda_{\text{DNS}} = 265 \text{ nm}$). Auch in den anderen Bereichen des UV - C Bereiches ist, wie bereits dargelegt, eine mikrobiozide Wirkung nachweisbar. Ein Umstand der in den Arbeitsblättern des DVGW eindeutig erfaßt wird. Einschränkungen hinsichtlich des Vertrauens und der Gültigkeit auf der Grundlage des gegenwärtigen wissenschaftlichen Erkenntnisstandes hinsichtlich allgemeiner mikrobiologische Anforderungen werden in den zum Vergleich herangezogenen Dokumenten wie nachstehend zitiert dargestellt:

Arbeitsblätter DVGW (W 293 [15]) W294 [16]	ÖNORM 5873 [18]
Dies soll ... mit einem Testorganismus überprüft werden, der bei einer homogenen Bestrahlung von 400 J/m ² ... eine Reduktion von mindestens 99,99 % bzw. 4 lg - Stufen aufweist.	Bei dieser Dosis ist nach dem Stand der Wissenschaft eine 6-log-Reduktion von wasserhygienisch relevanten Bakterien bzw. eine 4-log-Reduktion von wasserhygienisch relevanten Viren sichergestellt.

Abgesehen von der erforderlichen gleichen Lesart des dekadischen Logarithmus, verweist das DVGW Arbeitsblatt W294 [16] darauf, dass derzeit kein die Anforderungen erfüllender Testorganismus bereitsteht. Bis dieser gefunden ist, empfiehlt das Arbeitsblatt die mikrobiologische Prüfung mit zwei unterschiedlich widerstandsfähigen Organismen, *Escherichia coli* und Sporen von *Bacillus subtilis*. Die ÖNORM legt die Testorganismen nicht direkt fest, sondern verweist auf den Beispielorganismus *Bacillus subtilis*. Sowohl die ÖNORM [18] als auch das DVGW Arbeitsblatt W 294 ([16], [17]) das einer Weiterentwicklung des Arbeitsblattes W 293 [15] gleichkommt, stellen detailliert dar, welche Forderungen von einer UV Anlage erfüllt und welche Prüfungen bestanden werden müssen, um eine sicher Desinfektion von Trinkwasser während des Betriebes der betreffenden Anlage zu gewähren. Dabei werden sehr genau technische und organi-

satorische Details spezifiziert, die von geforderten Überwachungseinrichtungen (Durchflussüberwachung, UV - Strahlungsmessung, Betriebsstundenzähler, etc.) über Forderungen an die elektrischen Einrichtungen bis zur Verpflichtung zur Vorlage bauteilrelevanter Unterlagen und der Gestaltung von werkseitig auszufüllenden und zu bestätigenden Prüfbescheinigungen reichen.

Ein auffallend große Bedeutung wird mit Recht der sensorischen UV - Strahlungsmessung zugewiesen. Neben der Begründung der Forderung erfolgen detaillierte Festlegungen, wie der Sensor in welcher Position am Reaktor zu installieren ist (Anbaumethode, Öffnungswinkel, Selektivität, Stabilität etc.).

Weiterhin werden in der ÖNORM [18] als auch durch das DVGW Arbeitsblatt W 294 [16] Forderungen an Prüfeinrichtungen und Prüfmittel erhoben. Die praktische Prüfung von Einzelreaktoren bzw. von Reaktortypenreihen umfaßt nach DVGW Arbeitsblatt W 294 [16] ([17]) folgende Schwerpunkte:

- Prüfung der Unterlagen
- physikalische Prüfung der UV Sensoren
- technische Funktionsprüfung
- mikrobiologische Prüfung des Desinfektionspotentials.

Die Durchführung der Prüfungen ist nur solchen Laboratorien (Prüflaboratorien) gestattet, die mindestens die ebenfalls im Arbeitsblatt definierten Anforderungen erfüllen.

In der ÖNORM [18] und im DVGW Arbeitsblatt W 294 ([16], [17]) stellt die mikrobiologische Prüfung des Desinfektionspotentials - die biodosimetrische Prüfung - die Hauptprüfung dar, gefolgt von den Forderungen zur online Kontrolle der UV-Strahlung (Bestrahlungsstärke). In den übrigen technischen Mitteilungen ([19], [29], [30], [31]) wird stets der fachliche Bezug auf die Forderungen des DVGW Arbeitsblatt W 294 [16], zur ÖNORM [18] und ergänzend zum DVGW Arbeitsblatt W 293 [15] hergestellt.

Von großer Bedeutung für den Aufbereitungserfolg sind neben der mikrobiologischen Ausgangssituation im aufzubereitenden Wasser dessen physikalische und chemische Eigenschaften. Diese entscheiden beispielsweise über den spektralen Schwächungskoeffizienten (SSK), welche wirksame Eindringtiefen die UV Strahlung bei einer bestimmten Ausgangsleistung hat und welche Maßnahmen gegen Belagsbildung (Ursache Eisen und Mangan im Rohwasser, nach FIGAWA [19]) auf dem UV - Strahler - Hüllrohr ergriffen werden müssen. Alle vorstehend genannte Quellen, DVGW Regelwerk [15] und [16], Österreichisches Normungsinstitut - ÖNORM - [18], FIGAWA [19] und ATV Regelwerk [29], formulieren dazu klare Forderungen und geben konkrete Hinweise.

In der mikrobiologischen Prüfung des Desinfektionspotentials wird dem Rechnung getragen, indem eine Zusatzlösung (z.B. Natriumthiosulfat nach [16]) in den Testwasserstrom injiziert wird, die den spektralen Absorptionskoeffizienten vergrößert. Auch die Prüfung des Desinfektionspotentials mit einem „gealtertem“ Strahler ist im Prüfungsverfahren vorgesehen, DVGW Regelwerk [16]. Die ÖNORM [18] fordert die Prüfung mit einer Strahlerleistung die von dem Strahler

am Ende seiner Betriebszeit erreicht wird. Dieser Zustand des Strahlers - Reduktion der Strahlerleistung um 30 % - ist durch Eingriffe in die elektrische Versorgung des Strahlers während der Prüfung vorzunehmen. Trotz dieser Maßnahmen ist von den zu prüfenden Reaktoren eine zufriedenstellende Desinfektion zu erreichen und damit ein sicheres Desinfektionspotential in der Prüfung nachzuweisen.

Vor dem Hintergrund der in der Arbeit bereits weiter vorne abgeleiteten physikalischen Sachverhalte wurden gezielt die Forderungen der Norm und die Empfehlungen der Fachvereinigungen hinsichtlich der fluidmechanischen Parameter (Strömungsprofil, Strömungsgeschwindigkeit, Druck etc.) und auf Hinweise zur Behandlung des Problems untersucht und nachstehende Ergebnisse erhalten.

In der ÖNORM [18], in den DVGW Arbeitsblättern W 293/294 ([15], [16], [17]) und in den übrigen technischen Mitteilungen ATV Regelwerk [29] und FIGAWA Arbeitskreis „UV-Wasserbehandlung“ [30] wird stets darauf verwiesen, dass die vom Hersteller berechneten und eingestellten Durchflüsse einzuhalten sind und Minimalwerte und Maximalwerte des Volumenstromes bei der Prüfung heranzuziehen sind. Das DVGW Arbeitsblatt [15] fordert, dass die UV-Anlage nach der Wasserbeschaffenheit und dem Volumenstrom zu dimensionieren ist. Die Einrichtungen, welche zur Aufrechterhaltung der gewünschten Strömungsverhältnisse dienen, dürfen nicht verändert oder verstellt werden und sind extra zu kennzeichnen. Die kontinuierliche Überwachung des Durchflusses während des Reaktorbetriebes und Bestimmung des Druckverlustes über den Reaktor bei minimalen und maximalen Volumenstrom während der Baumusterprüfung werden vom DVGW Arbeitsblatt [16] direkt gefordert. Von diesem und der ÖNORM [18] ist auch die Baumusterprüfung unter ungünstigen Einbauverhältnissen - nach einem Rohrwinkelstück (90° Bogen nach DIN 2605 - explizit gefordert) vorzunehmen. Hinsichtlich des Volumenstroms fordert die ÖNORM [18], dass das Verhältnis von minimalen zum maximalen Volumenstrom bei gleicher Transmission sich höchstens wie 1:20 verhält. Nach der Technische Mitteilung 20/98 der FIGAWA [19] beruht die Dimensionierung von UV-Anlagen im wesentlichen auf drei Parametern. Diese sind die maximale Durchflussmenge (m³/h), einer der optischen Kennwerte des Wassers bei der Wellenlänge von 254 nm (z.B. Transmission unter Angabe der Schichtdicke) und die mikrobiologischen Anforderung (Bestrahlung). Das Merkblatt ATV - M 205 [29] weicht in seinen Ausführungen von der Nomenklatur der DVGW - Arbeitsblätter etwas ab, fordert jedoch, dass für das UV - Verfahren „...jedes Wasserteilchen mit gleicher Intensität und gleicher Einwirkdauer behandelt wird. Bei...“. In den jeweils dargestellten Grundlagen des Verfahrens fordert man, dass möglichst eine „ideale Pfropfenströmung“ mit „idealer Quervermischung“ erreicht wird, vgl. Unterabschnitt 3.2.2.. Unter den Hinweisen zur Auslegung, zum Angebot und zur Abnahme der Anlage wird empfohlen, dass die Festlegung der verfahrens- und konstruktionsunabhängigen Mindestraumbestrahlung unter Berücksichtigung

- des maximalen Volumenstroms,
- der minimalen UV - Transmission,
- des maximal zu erwartenden Gehaltes an suspendierten Stoffen,
- der erforderlichen Reduktion,

- des im Ablauf mit statistischer Sicherheit einzuhaltenden maximalen Gehaltes an Leitorganismen

vorzunehmen ist. Die biosimetrische Einzelprüfung des Einzelreaktors bzw. des Reaktors eines Baumusters durch ein zertifiziertes Labor ist im Grunde genommen eine experimentelle Prüfung der von den jeweiligen Herstellern erzielten theoretischen und konstruktiven Ergebnisse. Hinweise, wie die komplexen fluidmechanischen Verhältnisse in der Vielfalt der Reaktorformen zu berücksichtigen sind, enthalten die ÖNORM, die offiziellen Arbeitsblätter und die Merkblätter der Fachvereinigungen - obwohl diese in vielerlei Hinsicht sehr tief in die Details gehen - nicht.

4. Entwicklung gekoppelter fluidmechanischer Modelle

4.1. Grundgedanke - Gekoppeltes Fluidmechanisches Modell (GFM)

Durch die gezielte Anwendung elektromagnetischer Strahlung einer bestimmten Wellenlänge bzw. eines bestimmten Wellenlängenbereiches auf einen dem Menschen gegenüber pathogen wirkenden Mikroorganismus, wird dieser auf biomolekularer Ebene unschädlich gemacht. Die Desinfektionseffizienz, als Reduktionsfaktor RF ausgedrückt, ist in einem UV - Reaktor durch den Einfluss der Bestrahlung H und durch die UV - Resistenz der Einzelspezies k^* - Sensibilität - bestimmt; Gleichungen (3.12), (3.13) und (3.14). Die speziesabhängige Konstante k^* muss für die Anwendung in diesen Gleichungen zuvor im Experiment gemessen werden. Dabei sind die Einflussfaktoren zu berücksichtigen, die im Unterabschnitt 3.1.3. der Arbeit genannt wurden; vgl. auch Bild 3-1. Unter konstanten mikrobiologischen Bedingungen ist die Sensibilität k^* eine Funktion der Wellenlänge λ , $k^* = k^*(\lambda)$. Da die Desinfektion in einem Fluid -Wasser- abläuft, ist der Einfluss dieses Mediums auf die Strahlung, bevor diese auf die Mikroorganismen trifft, zu berücksichtigen. Dies erfolgt durch die Anwendung des *Lambert-Beerschen-Gesetzes*. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis des spektrale Extinktionsmodulus $m_n = m_n(\lambda)$ (spektraler Absorptionskoeffizient SAK) oder die Transmission $T = T(\lambda)$, die jeweils experimentell gemessen werden bzw. durch Rechnung wechselseitig bestimmt werden können.

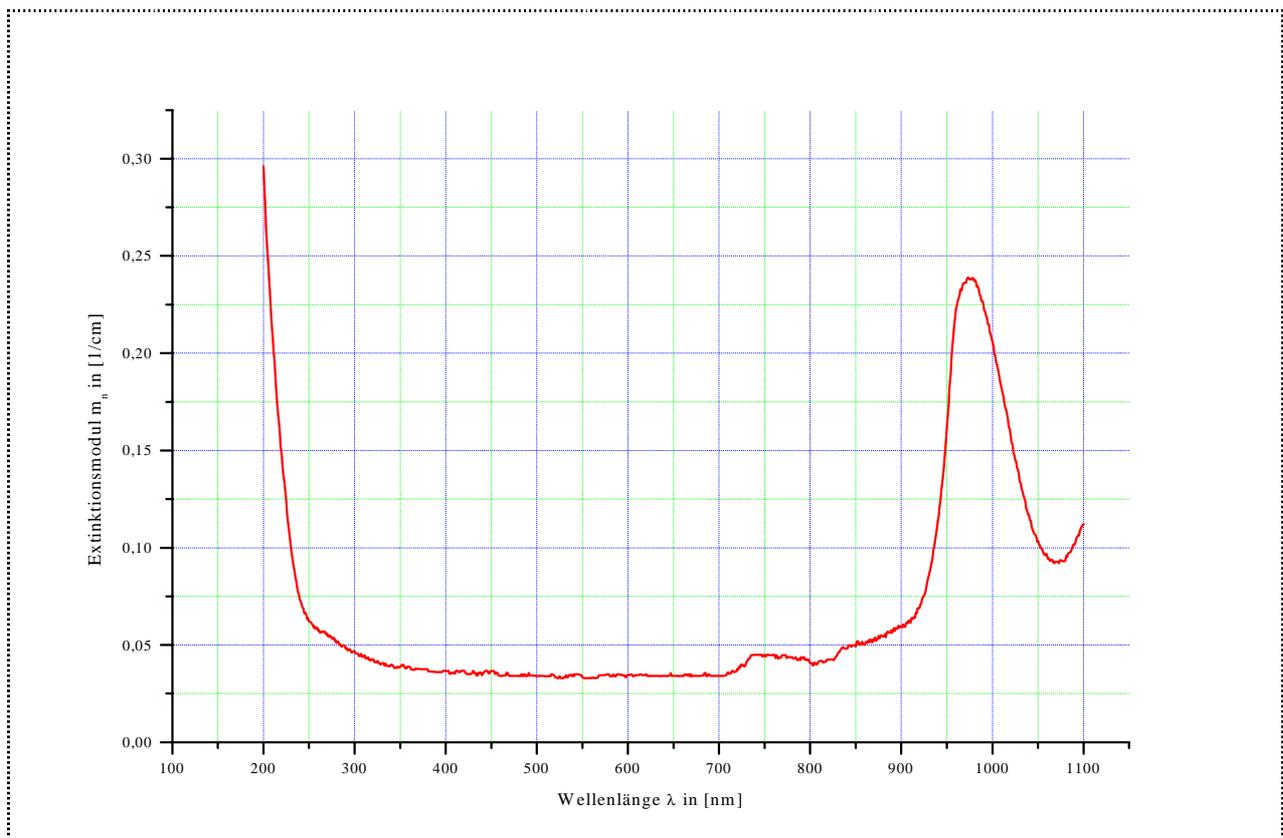


Bild 4-1: Extinktion von dest. Wasser

Diese Parameter sind wellenlängenabhängig. Das Bild 4-1 verdeutlicht, dass eine Absorption der Strahlung durch Wassermoleküle im langwelligen Bereich und im kurzwelligen Bereich stattfindet.

det. Ursachen hierfür sind Schwingungen des Wassermoleküls, angeregt durch den Energieeintrag im betreffenden Wellenlängenbereich; langwelliger Bereich. Der hier interessierende Bereich der ultravioletten Strahlung (UV-C Bereich) zeigt zunächst eine geringe Strahlungsabsorption, in reinem Wasser bedingt durch Absorption und die molekulare Streuung, die in Richtung $\lambda \leq 200\text{nm}$ deutlich ansteigt; vgl. auch SMITH et al. [179]. Dabei wird im für die UV-Desinfektion betrachteten Spektralbereich Wasser nicht in einen solchen Zustand versetzt, dass bereits dadurch eine Desinfektionswirkung erreicht wird, [27], [28] u.a.. Nach OPPENLÄNDER [27] unterscheidet man Vibrations-Anregung, Photo-Anregung und Photo-Ionisation. Bei einer elektromagnetische Strahlung der Wellenlänge $\lambda = 240\text{ nm}$ (Schwellen-Wellenlänge) entspricht die Photonenenergie der Bindungsenergie des Wassers, welches in Photolysis-Reaktionen aufbricht. Die Photo-Ionisation des Wassers wird durch Strahlung der Wellenlänge $\lambda \leq 190\text{ nm}$ bewirkt (Vakuum-UV, Röntgen-Strahlung, γ -Strahlung). Die linke Seite des Absorptionsspektrums in Bild 4-1 und in Bild 4-2, zeigt dieses Verhalten bereits tendenziell, obwohl hier nur bis zu einer Wellenlänge $\lambda=200\text{nm}$ gemessen wurde. Bei einer Wellenlänge von $\lambda = 172\text{ nm}$ hat der Extinktionsmodulus den Wert $m_n = 1266,421801\text{ [1/cm]}$, vgl. WEEKS et al. nach OPPENLÄNDER [27] und Tabelle 3-11. Die zuletzt genannten Strahlungsbedingungen sind absolut nicht geeignet eine effiziente Desinfektion von Wasser in einem UV-Reaktor bekannter Bauart durchzuführen. Allerdings liegen bereits sehr gute Ergebnisse in diesem Wellenlängenbereich zur Mineralisierung von Schadstoff in entsprechend ökologisch belasteten Wässer vor, OPPENLÄNDER [27], MASSCHELEIN [28].

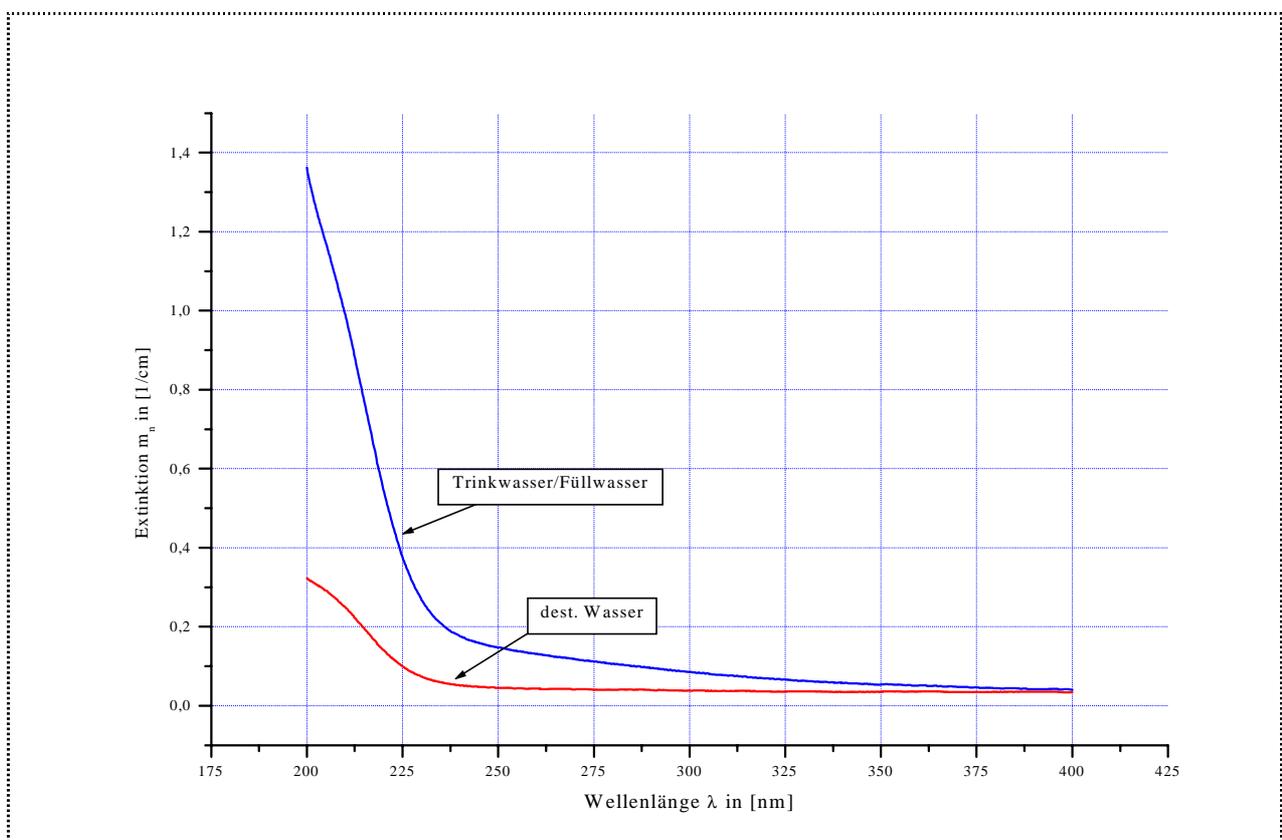


Bild 4-2: Vergleich der Extinktionsmoduli destilliertes Wasser/Trinkwasser

Befinden sich neben den Mikroorganismen weitere Inhaltstoffe im Wasser, die ebenfalls die Strahlung beeinträchtigen, tritt der spektrale Schwächungskoeffizient (SSK) an die Stelle der genannten Parameter. Mathematisch braucht dieser Vorgang nicht berücksichtigt zu werden, da sich die Ansätze und die Verwendung von m_n nicht verändern, Kapitel 3. Allerdings beeinflusst der Extinktionsmodulus m_n bzw. der SSK-Wert wesentlich das numerische Ergebnis, wie man bereits im Bild 4-1 und im Vergleich dest. Wasser / Trinkwasser im Bild 4-2 erkennen kann, siehe auch Tabelle 3-10. Die Bestrahlung H ist sowohl durch Messung (aktinometrisch) als auch durch Berechnungen bestimmbar. Aktinometrische Messungen sind für dynamische Verhältnisse stets mit Fehlern behaftet und können die realen Vorgänge in einem UV-Reaktor nur teilweise erfassen.

Die Gesamtheit der über die Expositionszeit t_{Ex} wirkende Bestrahlungsstärke E_{St} bezogen auf eine bestimmte Wellenlänge λ oder auf einen bestimmten Wellenlängenbereich legt die Bestrahlung $H = H(\tau, t_{Ex}, \lambda)$ fest, die die entscheidende Größe für Berechnung des Reduktionsfaktors RF ist. Zur Bestimmung der Bestrahlung H wird die Grundgleichung (3.7) aus dem Kapitel 3. verwendet. Führt man die Bestrahlungsstärke E_{St} und die Intensität D ein, folgt die Schreibweise

$$H = \int_{t_1}^{t_2} E_{St} \cdot dt \quad (4.1),$$

in welcher bei senkrechtem Auftreffen der Strahlung auf die Bezugsfläche für die Bestrahlungsstärke $E_{St} = D$ gesetzt werden darf

$$H = \int_{t_1}^{t_2} D \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\Phi}{A} \cdot dt \quad (4.2)$$

und somit prinzipiell die Grundgleichung des Verfahrens aufgestellt ist. Bestimmt man die Expositionszeit t_{Ex} aus dem Volumenstrom (Durchsatz) V über die aus diesem folgenden mittleren Strömungsgeschwindigkeit v_m einer linearen Verdrängungsströmung, so lässt sich nach Ausführung der Integration nach (4.2) die Gleichung

$$H = \frac{\Phi}{A} \cdot (t_2 - t_1) = \frac{\Phi}{A} \cdot t_{Ex} = \frac{\Phi}{A} \cdot \frac{S}{v_m} \quad (4.3)$$

angeben. Daraus ergibt sich bei Beachtung von

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= \mathbf{r}(S(t)) \\ \frac{d\mathbf{r}}{dt} &= \frac{d\mathbf{r}}{dS} \cdot \frac{dS}{dt} = \mathbf{t} \cdot \frac{dS}{dt} = \mathbf{v} \\ |\mathbf{v}| &= \frac{dS}{dt} \\ dS &= |\mathbf{v}| \cdot dt \end{aligned} \quad (4.4)$$

mit dem Tangenteneinheitsvektor \mathbf{t} durch Verallgemeinerung die Gleichung

$$H = \int_A^B \frac{\Phi(\mathbf{r}(S))}{A} \cdot \frac{1}{|\mathbf{v}(\mathbf{r}(S(t)))|} \cdot dS \quad (4.5),$$

wobei man sich auf ein rechtwinkliges kartesisches Koordinatensystem bezieht. Die Integrationsgrenzen A und B kennzeichnen symbolisch den Eintritt und Austritt des Volumenelementes bzw. der *Elementarzelle* - ein Volumenelement, welches einen Mikroorganismus einschließt - in das effektive Volumen des UV-Reaktors entlang der Bahnkurve S ; Bahn-Ausschnitt Bild 4-3.

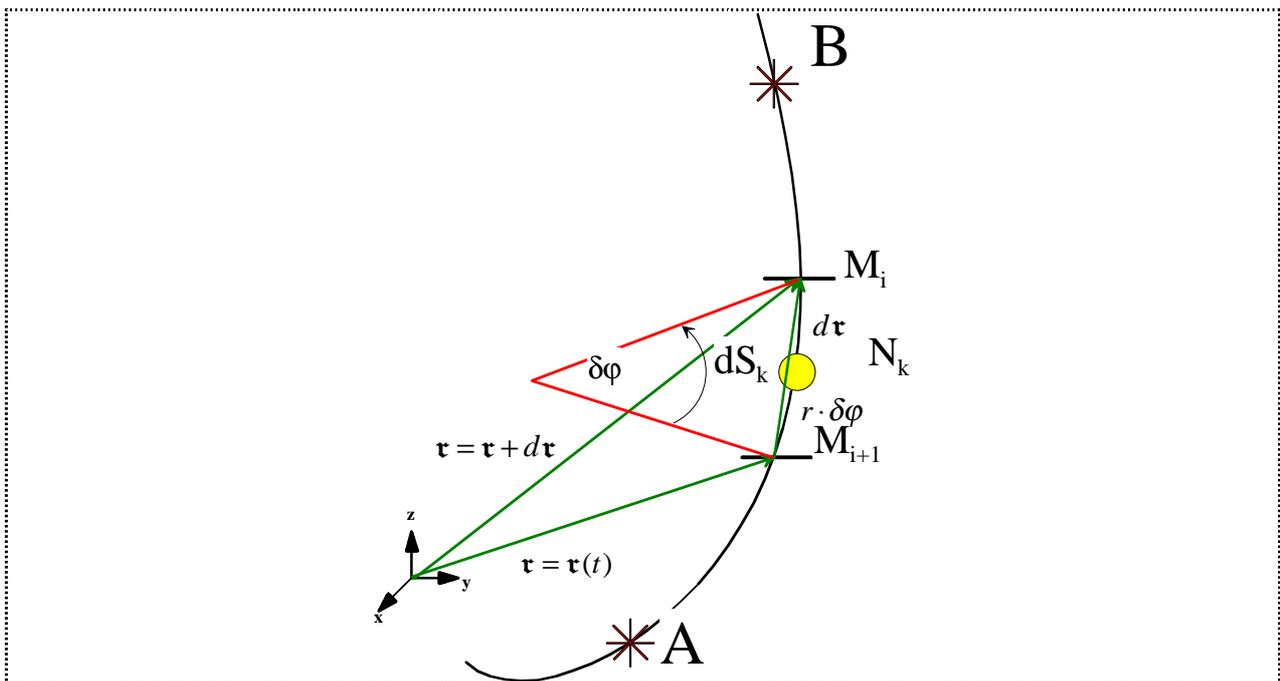


Bild 4-3: Hypothetische Bahnkurve des Volumenelementes durch V_{eff} des UV-Reaktors

Die Bestrahlung H , bestimmt aus dem auf die Fläche A bezogenen Strahlungsfluss Φ und der Expositionszeit t_{Ex} , die sich aus der Weglänge S und der Geschwindigkeit \mathbf{v} unter dynamischen Bedingungen ergibt, gestattet somit bei Berücksichtigung der Sensibilität $k^* = k^*(\lambda)$ der Spezies, sowohl die Berechnung der Anzahl N der überlebenden Organismen nach der *Chick-Watson-Relation* (Gleichungen (3.13), (3.14)) als auch die Berechnung des Reduktionsfaktor RF (Gleichung (3.12)) sowie schließlich die Einschätzung der Desinfektionseffizienz.

4.2. Gekoppelte Fluidmechanische Modelle - Entwicklung

Es ist zweckmäßig einige allgemeine Annahmen voranzustellen. Diese betreffen den Mikroorganismus, das Transportfluid, die Strahlungsquelle und den UV - Reaktor selbst.

Bei dem Transportfluid handelt es sich um Wasser, welches sich einerseits gemäß den Darstellungen des Kapitels 3, Abschnitt 3.2., Unterabschnitte 3.2.1. und 3.2.2. und Abschnitt 3.3., Unterabschnitt 3.3.3. charakterisieren lässt und andererseits in der beschriebenen Art und Weise auf

den Desinfektionsprozess vorbereitet werden sollte. Darüber hinaus sei es homogen und isotrop. Wasser entspricht mit seinen fluidmechanischen Eigenschaften der allgemeinen Modellvorstellung einer *Newtonschen Flüssigkeit*, wodurch sich folgerichtig die entsprechenden Konsequenzen für die Simulationsrechnungen ergeben (Normalbedingungen nach [120], [123], [124], [132] bis [136]). Die Geometrie des Reaktors und die Geometrie der Strahlungsquelle definieren wechselseitig die Geometrie die Lösungsdomäne und die räumlichen Randbedingungen.

Die Plasmastrahlungsquelle befindet sich im Innern des UV- (Modell-) Reaktors. Die Geometrie dieser Quelle sei zunächst die eines geraden Kreiszyinders. Erweiterungen dieser Annahme bestehen darin, dass dieser gerade Kreiszyinder einen elliptischen Querschnitt hat bzw. über einen Querschnitt verfügt, welcher durch eine oder mehrere zusammengesetzte gegebene analytische Funktion/en angenähert werden kann. Die Einzelheiten dazu werden in den nachfolgenden Unterabschnitten dargestellt und einzeln diskutiert. Die Strahlungsquelle verfügt in Anlehnung an die technische Entwicklung der modernen Strahlungsquellen nicht ad hoc über einen Schutzzyinder. Die Strömung des Wassers erfolge zunächst parallel zur Erzeugenden der Mantelfläche des Zyinders aber entgegen der Richtung des Vektors \mathbf{g} der Erdbeschleunigung; vergleiche auch Kapitel 3., Abschnitt 3.3., Unterabschnitt 3.3.1.. Die Strömung wird als die Bewegung von Volumenelementen angesehen, die den betreffenden Mikroorganismus in sich einschließen. Die aus der Mikrobiologie bekannten Abmessungen der Spezies gestatten diese Verallgemeinerung; vgl. Tabelle 3-5. Die mögliche Rotation dieses Volumenelementes um seine eigenen Achsen wird nicht berücksichtigt, da es fortan ohne belang sein soll von welcher Seite der Mikroorganismus der Strahlung ausgesetzt ist. Somit liegen drei Freiheitsgrade vor und die Bewegung des Mikroorganismus ist über die Angaben der Ortskoordinaten (x,y,z) und des Ortsvektors als Funktion der Zeit $\mathbf{r}=\mathbf{r}(t)$ und seinen Ableitungen im *Lagrangeschen* Sinne charakterisierbar und ausreichend beschreibbar.

Die betrachteten Mikroorganismen seien pathogen wirkende Bakterien und/oder Viren und beeinträchtigen die Homogenität und die Isotropie des Mediums nicht. Es wird somit eine kugelförmige *Elementarzelle* angenommen, auf welche die Strahlung unabhängig von der Gestalt des Organismus folglich immer senkrecht auftrifft.

Die Strahlungsquelle ist eine Plasmastrahlungsquelle entsprechend den Ausführungen nach Kapitel 3., Abschnitt 3.3., Unterabschnitt 3.3.2.. Zunächst wird diese als eine lineare Strahlungsquelle (gerader Kreiszyinder, zylindersymmetrisch -> Linienstrahlungsquelle) angenommen, die UV-Strahlung monochromatisch der Wellenlänge $\lambda=253,7$ nm emittiert. Die Emission der Strahlung erfolge zeitlich konstant. Sich an technischen Gegebenheiten orientierende Erweiterungen werden in den entsprechenden folgenden Abschnitten und Unterabschnitten diskutiert und kommentiert.

Weiterhin wird die Modellvorstellung, die die Ableitung der PSS - Methode gestattete, vergleiche Kapitel 3, Abschnitt 3.2., Unterabschnitt 3.2.1., erweitert, indem angenommen wird, dass die Oberfläche der Strahlungsquelle durch eine geeignet gewählte Anzahl von linearen Strahlungsquellen überzogen wird, die ihrerseits wiederum durch eine Reihe von Punktstrahlungsquellen angenähert werden; vgl. Bild 3-10 und Bild 4-4.

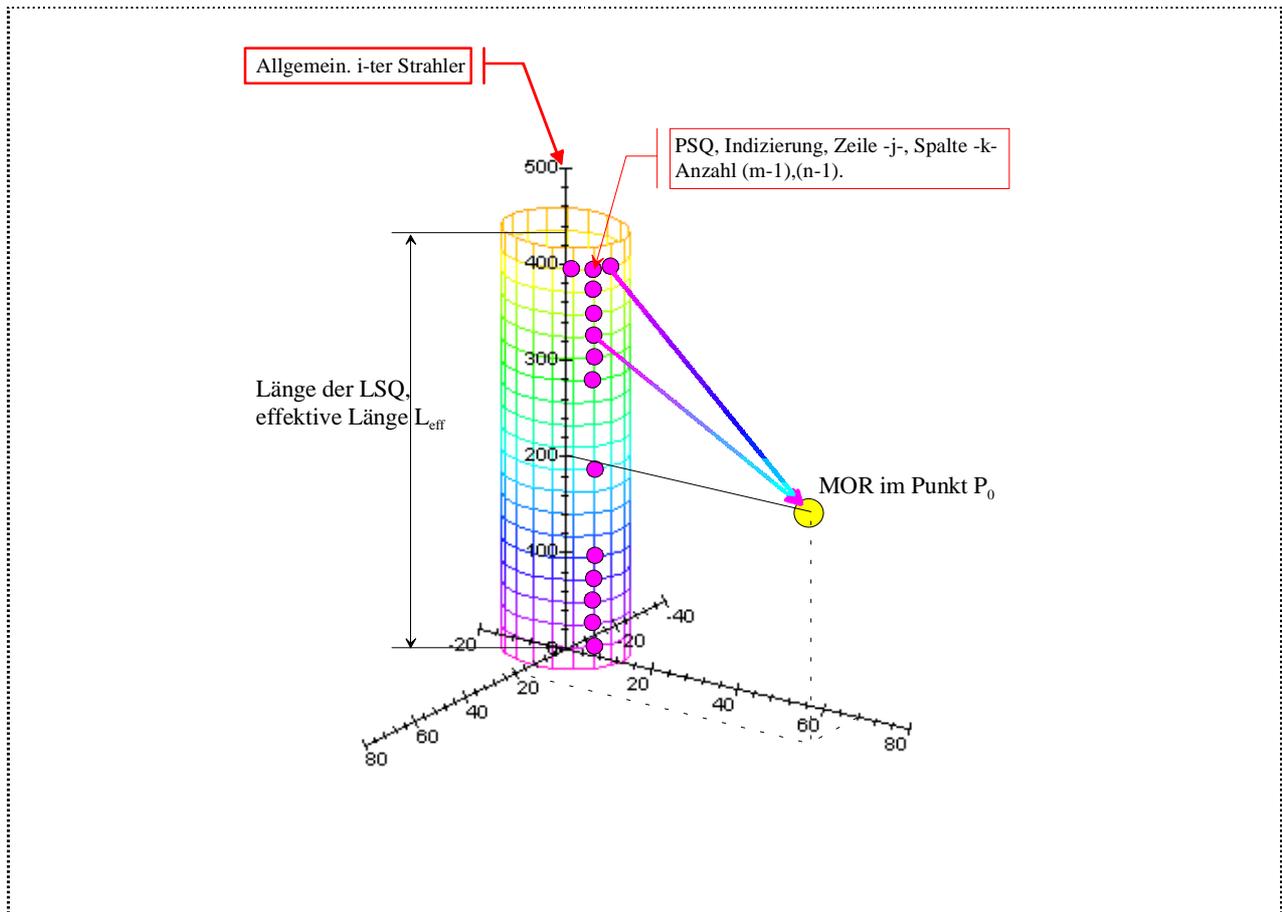


Bild 4-4: Zylindrische Strahlungsquellen, (multiple) MPSS - Methode

Somit entsteht ein Netz von Punktstrahlungsquellen, welches die Geometrie der Strahlungsquelle und deren Emission nachbildet.

4.2.1. Reaktoroptische Komponente (*Tangentenmethode*)

Die Gleichung (4.5) stellt inhaltlich eine Verfahrensgleichung dar, welche den physikalischen Untersuchungsang - Bestimmung der Bestrahlungsstärke E_{St} bzw. der Intensität D , Bestimmung der Expositionszeit t_{Ex} - nahelegt. Dieser Einteilung folgend werden nachstehend die reaktoroptischen Komponenten des gekoppelten Modells aufgestellt.

Für die nachfolgenden Ableitungen wird für den Reaktor eine zylindrische Geometrie vorausgesetzt. Entlang der Mittellinie des Reaktors denke man sich die ebenfalls zylindrische Strahlungsquelle zentriert angeordnet. Die Länge der ebenfalls zylindrischen Plasmaausbildung zwischen den Elektroden definiert die effektive Länge L_{eff} des Reaktors und mit den übrigen Abmessungen des UV-Reaktors das effektive Volumen V_{eff} ; Bild 4-4.

Die zylindrische Strahlungsquelle wird durch das bereits oben eingeführte Netz von Punktstrahlungsquellen angenähert. Um es einer bequemen mathematischen Behandlung zugänglich zu machen, wird es derart definiert, dass dieses aus Linien parallel zur Mittellinie und Kreislinien besteht, die analog einem geodätischen Netz die Mantelfläche des Zylinders der Strahlungsquelle überziehen. Diese Linien schneiden sich folglich unter einem Winkel von 90° und haben Längen

die durch die effektive Länge L_{eff} der Strahlungsquelle und den über den Radius r_q der Strahlungsquelle bestimmten Umfang definiert sind. Nun wird angenommen, dass die $m \cdot n$ Schnittpunkte auch die Befestigungsorte der hypothetischen Punktstrahlungsquellen sind. Dies hat zur Folge, dass in den Randbereichen der betrachteten strahlenden Fläche der Strahlungsquelle Teile der auf dem Rand befindlichen Punktstrahlungsquellen zu berücksichtigen sind und eine Zuweisung der Punktstrahlungsquelle auf die durch die Schnittlinien begrenzten finiten Flächenstücken unbequem ist. Eine Verschiebung des Netzes der Schnittlinien bzw. eine Neudefinition derart, dass die Schnittpunkte der neuen Schnittlinien in den $(m-1) \cdot (n-1)$ durch das ehemalige eingegrenzte finite Flächenstück zu liegen kommt, hat den Vorteil, dass zwischen Befestigungsorten der Punktstrahlungsquellen auf der Oberfläche der Strahlungsquelle und diesen Flächenstücken in der mathematischen Behandlung nach Neuindizierung kein wesentlicher Unterschied besteht. Weiterhin wird angenommen, dass sich die Grundfläche der Strahlungsquelle in Mittelpunktlage in der x-y-Ebene eines dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem befindet.

Der Ort des Mikroorganismus im freien Volumen des UV - Reaktors werde durch Ortskoordinaten x_0 y_0 und z_0 beschrieben. Aus vorstehender Vereinbarung ist ebenfalls die Indizierung der Ortskoordinaten für beliebige Punkte auf der Oberfläche der Strahlungsquelle ableitbar. Da es sich um ein Netz von Punktstrahlungsquellen handelt, liefert jede betrachtete Punktstrahlungsquelle einen eigenen Anteil zur Bestrahlung des in einer *Elementarzelle* eingeschlossenen Mikroorganismus. Unter Beachtung des fotometrischen Entfernungsgesetzes für Punktstrahlungsquellen und dem *Lambert-Beerschen-Gesetz* für den Medien erfüllten Raum lassen sich die Strahlungsflussanteile $\Phi_{j,k}$ und schließlich die Bestrahlungsstärke E_{St} nach

$$E_{St} = \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\Phi_{0j,k}}{4\pi \left(\left| \mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_{j,k} \right| \right)^2} \cdot e^{-m_n \left| \mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_{j,k} \right|} \quad (4.6),$$

für den Fall, dass die Oberfläche mit $(n-1) \cdot (m-1)$ Punktstrahlungsquellen besetzt ist und die einzelnen Punktstrahlungsquellen über die Indizes j , k durchnummeriert wurden, angenähert ermitteln. Bei dieser *Mehrfachen - Punktstrahlungsquellen - Summations - Methode* (MPSS - Methode) ist der Strahlungsfluss Φ_0 für jede Punktstrahlungsquelle j , k zu ermitteln. Tritt der Fall auf, dass weitere l Strahlungsquellen, die über die gleichen geometrischen und strahlungsphysikalischen Eigenschaften verfügen sollen wie die bereits beschriebene, um diese angeordnet sind, folgt allgemein mit

$$E_{St_i} = \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\Phi_{0i,j,k}}{4\pi \left(\left| \mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_{i,j,k} \right| \right)^2} \cdot e^{-m_n \left| \mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_{i,j,k} \right|} \quad (4.7)$$

die Gleichung für die Gesamtbestrahlungsstärke des Mikroorganismus

$$E_{St} = \sum_{i=1}^l E_{St_i}$$

$$E_{St} = \sum_{i=1}^l \left(\sum_{j=1}^{m-1} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\Phi_{0i,j,k}}{4\pi \left(|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_{i,j,k}| \right)^2} \cdot e^{-m_n |\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_{i,j,k}|} \right) \quad (4.8).$$

Dabei ist zu beachten, dass die Strahlung durch eine vorhanden Strahlungsquelle eine vernachlässigbare Wirkung auf den Strahlenfluß ausübt.

Ein weiterer Verallgemeinerungsschritt besteht darin, die definierten Punktstrahlungsquellen aus den Netzschnittpunkten derart zu verschieben, dass diese in einem Flächenausschnitt, welcher durch 4 benachbarte Schnittpunkten definiert ist, angeordnet erscheinen; Bild 4-4. Die Fläche erhalte die Bezeichnung $\Delta\sigma$ und sei im mathematischen Sinne klein. Die Einführung einer homogenen Strahlungsflussdichte Φ_{0FD} auf der Basis der diskreten Strahlungsflussdichte Φ_{0jk} bezogen auf das Mantelflächelement der linearen zylindersymmetrischen Strahlungsquelle liefert

$$\Phi_{0FD} = \frac{\Delta\Phi_{0jk}}{\Delta\sigma_{jk}} \quad (4.9).$$

Mit dem Grenzübergang zu infinitesimalen Größen

$$\Phi_{0FD} = \lim_{\Delta\sigma \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi_0}{\Delta\sigma} \quad (4.10)$$

ist die Strahlungsflussdichte Φ_{0FD} bezogen auf die Oberfläche der Strahlungsquelle definiert. Somit gilt

$$\Phi_0 = \lim_{\Delta\sigma \rightarrow 0} \sum_{\sigma} \Phi_{0FD} \Delta\sigma = \iint_{\sigma} \Phi_{0FD} d\sigma \quad (4.11)$$

für einen Strahlungsbereich, der aus der Oberfläche der Strahlungsquelle herausgeschnitten wird. Die Strahlungsflussdichte Φ_{0FD} ist über die aufgenommene elektrische Leistung P_{el} bestimmbar, weil der auf eine Wellenlänge λ bezogene Wirkungsgrad η_{253} als technische Strahlerangabe von den Strahlerproduzenten durch Messung bestimmt und dem Anwender zur Verfügung gestellt wird. Schließlich ist dieser einer der wichtigsten technischen Parameter überhaupt; vgl. Gleichungen (3.31) und (3.32) und Tabelle 3-9 und Tabelle 3-10.

Mit der Strahlungsflussdichte Φ_{0FD} bezogen auf die Mantelfläche

$$\Phi_{0FD} = \frac{\Phi_0}{2\pi r_q L_{eff}} = \eta(\lambda) \frac{P_{el}}{2\pi r_q L_{eff}} \quad (4.12)$$

folgt für die Bestrahlungsstärke eines Oberflächenausschnitts bezüglich eines ausgewählten Ortes P_0 (Ort des Mikroorganismus)

$$E_{StVac} = \iint_{\sigma} \frac{\Phi_{0FD}}{4\pi (|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|)^2} \cdot d\sigma = \iint_{\sigma} \frac{\Phi_0}{8\pi^2 r_q L_{eff} (|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|)^2} \cdot d\sigma \quad (4.13)$$

im Vakuum.

In einem Medium gilt unter Ansatz des *Lambertschen Gesetzes* für die Bestrahlungsstärke

$$E_{St} = \iint_{\sigma} \frac{\Phi_0}{8\pi^2 r_q L_{eff} (|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|)^2} \cdot e^{-m_n \cdot (|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|)} \cdot d\sigma \quad (4.14).$$

Sind weitere l Strahlungsquellen zu berücksichtigen, folgt in Anlehnung an Gleichung (4.8)

$$E_{St} = \sum_{i=1}^l \left(\iint_{\sigma} \frac{\Phi_{0i}}{8\pi^2 r_q L_{eff} (|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|)^2} \cdot e^{-m_n \cdot (|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|)} \cdot d\sigma_i \right) \quad (4.15),$$

sofern die Strahlungsquellen hinsichtlich der Strahlungsentstehung und der Konstruktion gleich sind. Trifft das nicht zu, so muss nach einer erweiterten Indizierung und unter Verwendung der entsprechenden technischen Daten gerechnet werden.

Der Integrand in den Gleichungen und (4.13) und (4.15) kann angesichts der Tatsache, dass der Lichtweg umkehrbar ist, als eine Funktion aufgefasst werden, welche der Oberfläche der betreffenden Strahlungsquelle eine durch diese definierte Eigenschaft zuweist. Durch Integration über das Flächenelement auf der Oberfläche ist die Gesamtheit der vom Mikroorganismus empfangenen Bestrahlungsstärke E_{St} in den Grenzen des Bereiches der Oberfläche bestimmbar. In Anlehnung an die Definition des *Riemannsches Integrals* und hinsichtlich der Ausführung von Integrationen über gekrümmte Oberflächen, folgt nach geeigneter Wahl der Integrationsvariablen auf den hier vorliegenden Fall, zylinderförmige Strahlungsquelle parallel zur Mittellinie eines zylindrischen UV-Reaktors, für die Bestrahlungsstärke E_{St} bezüglich der *Elementarzelle* der Ausdruck

$$E_{St} = 2 \cdot \int_0^{L_{eff}} \int_0^{x_{p1}} \frac{\Phi_0}{8\pi^2 r_q L_{eff} (|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|)^2} \cdot e^{-m_n \cdot (|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|)} \cdot \sqrt{1 + p^2 + q^2} \cdot dx_1 \cdot dz_1 \quad (4.16),$$

mit $(|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}|)^2 = \left((x_0 - x_1)^2 + \left(y_0 - \sqrt{r_q^2 - x_1^2} \right)^2 + (z_0 - z_1)^2 \right)$

wobei hier aus Platzgründen auf die unmittelbare Darstellung der Vektoren mit ihren Komponenten verzichtet und die Abkürzungen p und q nach

$$\frac{\partial f(x, z)}{\partial x} = p \quad \text{und} \quad \frac{\partial f(x, z)}{\partial z} = q \quad (4.17)$$

verwendet wurden. Rechnet man p und q aus, folgt der Ausdruck

$$\sqrt{1 + \left(\frac{\partial f(x, z)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(x, z)}{\partial z}\right)^2} = \frac{r_q}{\sqrt{r_q^2 - x^2}} \quad (4.18),$$

welcher in die Gleichungen (4.16) und (4.19) unter entsprechender Indizierung $x=x_i$ einzusetzen ist.

Bei der Betrachtung mehrerer zylindrischer Strahlungsquellen, die einander gleich sind aber hinsichtlich des Ortes verschieden, folgt

$$E_{St} = 2 \cdot \sum_{i=1}^l \left(\int_0^{L_{eff}} \int_0^{x_{P1i}} \frac{\Phi_{0i}}{8\pi^2 r_q L_{eff} (|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|)^2} \cdot e^{-m_n \cdot (|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|)} \cdot \sqrt{1 + p^2 + q^2} \cdot dx_{1i} \cdot dz_{1i} \right) \quad (4.19)$$

für die von der *Elementarzelle* empfangene Gesamtbestrahlungsstärke E_{St} .

Bei der Verwendung der Gleichungen (4.16) und (4.19) ist zu bedenken, dass der Ort des Mikroorganismus auf der Bahnkurve S bekannt ist und seine Koordinaten (x_0, y_0, z_0) zur Verfügung stehen, vergleiche auch N_k zwischen M_{i+1} und M_i in Bild 4-3. Außerdem gilt die mathematisch und physikalisch sinnvolle Forderung, dass sich der Mikroorganismus nicht im Innern der Strahlungsquelle aufhalten kann. Somit wird der mögliche Bereich für Werte die P_0 annehmen kann, durch das effektive Volumen V_{eff} des Reaktors eingeschränkt.

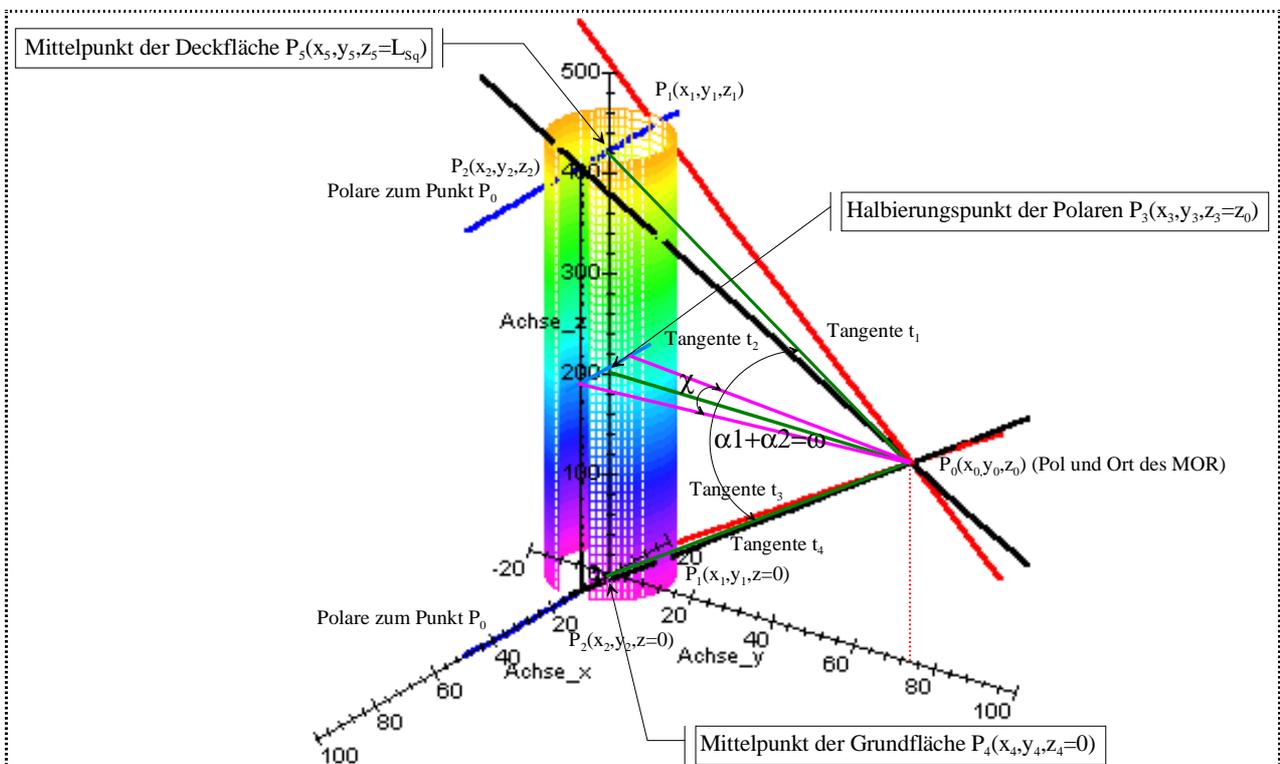


Bild 4-5: Integration über die definierte Oberflächeneigenschaft der Plasma-Strahlungsquelle (und Tangentenmethode)

Die Integrationsgrenzen werden nach einer Methode bestimmt, die sowohl für die Lösung über die Integration als auch für die diskrete Lösung (diskrete Anzahl von Punktstrahlungsquellen) über die MPSS - Methode gilt. Die Funktion $f=f(x,z)$ repräsentiert symbolisch die zylindrische Oberfläche der Strahlungsquelle mit der Grundfläche in der x-y-Ebene (Mittelpunkt - Lage) und deren Länge L_{eff} , die parallel zur z-Achse verläuft und durch die Länge des Plasmas festgelegt ist. In den Gleichungen wurden die Hälfte des Integrationsbereiches aus Symmetriegründen (Zylindersymmetrie und $x_0=0$) gewählt. Die Multiplikation mit dem Faktor 2 ergibt den Gesamtbetrag im betrachteten Fall und der Index 1 der Integrationsvariablen x_1 betrifft die x - Koordinate des Schnittpunktes P1 bzw. dessen z - Koordinate z_1 ; vgl. Bild 4-5.

Kann die Zylindersymmetrie nicht genutzt werden, wie beispielsweise im Anwendungsfall eines zylindrischen Plasmastrahlers, der aus fluidmechanischen Gründen mit einem elliptischen Querschnitt gestaltet wurde, so ist nach den üblichen Regeln der Analysis das Integrationsgebiet zu unterteilen und die Integration über die Teilbereiche einzeln durchzuführen.

Aus der Sicht der sich auf der Bahnkurve $S=S(t)$ befindlichen *Elementarzelle*, deren Aufenthaltsort zum Zeitpunkt t $P_0(x_0,y_0,z_0)$ sein möge, beteiligt sich lediglich ein Ausschnitt der Oberfläche an der Bestrahlung und damit an der zu berechnenden Bestrahlungsstärke E_{Sr} .

Bedingungen für die Definition des Bereiches liefert die Optik ([146], [147], [148]) indem in Anlehnung an die Definition eines *Lambertschen Strahlers* vereinbart wird, dass die Strahlung der Punktstrahlungsquelle in den Halbraum erfolgt. Von der durch die betreffende Punktstrahlungsquelle bzw. das betreffende Flächenelement $\Delta\sigma$ gezogen Normale der zylindrischen Oberfläche der Strahlungsquelle darf die Strahlung höchstens in einem Winkel von 90° zur Flächennormalen emittiert werden. Diese Festlegung entspricht der Tangente an den Zylinder vom Punkt P_0 aus. Somit begrenzen die Gesamtheit der anlegbaren Tangenten bezüglich des Aufenthaltsortes des Mikroorganismus den gesuchten Bereich von der Grundfläche bis zur Deckfläche des strahlenden Zylinders.

Die Untersuchung zur Bestimmung dieses Bereiches kann durch die Analyse der Verhältnisse in der x-y-Ebene und der anschließenden Erweiterung auf den R^3 durchgeführt werden. Betrachtet man die Oberfläche der Strahlungsquelle als eine Kurve im R^3 , folgt eine Tangentialebene, die den Schnittpunkt mit der Polaren enthält. Dieser ist zugleich der betreffende Tangenten-Berührungspunkt. In der Tangentialebene ist die Tangente in jede Richtung drehbar, so dass die räumlichen Schnittpunkte durch eine Ergänzung der Schnittpunkte aus dem R^2 (x-y-Ebene) um die z-Koordinate bestimmt werden können. Somit wird der strahlende Bereich durch zwei Tangenten-Berührungslinien und dem Abschluß (Grundflächenkreis, Deckflächenkreis) der zylindrischen Oberfläche der Strahlungsquelle festgelegt; Bild 4-5. Die Werte des Schnittpunktes und die durch die Strahlerkonstruktion gegebene Länge L_{SQ} , die der effektiven Länge L_{eff} entsprechen mögen, legen den Integrationsbereich fest.

Anmerkung: Mit einem worksheet des CAS MAPLE wurde eine Rechnung auf der Basis von Kegelschnitten und der Rücktransformation Berechnungsergebnisse über eine Drehung und eine Translation des Bezugssystems in den Raum derart gestaltet, dass für eine festliegende Geometrie der Strahlungsquelle und somit des Reaktors die Menge der Tangenten-Berührungspunkte

bestimmt werden konnte. Für jeden Punkt im effektiven Volumen des Reaktors ist es durch die Variation des Aufenthaltsortes des Mikroorganismus möglich den Integrationsbereich zu berechnen und zu visualisieren.

Für die Anwendung der Gleichung (4.6) legt der durch vorstehende Methodik festgelegte Bereich die Anzahl der Punktstrahlungsquellen fest, die in der Berechnung der Bestrahlungsstärke zu berücksichtigen sind. Bei rotationssymmetrischen Verhältnissen kann jeweils eine für die Berechnung mit dieser diskreten Methode günstige, die Arbeit erleichternde Position gefunden werden. Stets ist zu bedenken, dass der Ort des Mikroorganismus den Bereich, der sich an seiner Bestrahlung beteiligt, festlegt.

Die Betrachtung verschiedener Grundgeometrien, die sich in der Gestalt der Leitlinien widerspiegelt, ist durchaus sinnvoll. Im Fall der senkrecht zur Oberfläche angeströmten Strahlungsquellen treten erhebliche mechanische Kräfte auf und verursachen Schwingungen, deren Größe und Entstehungsmechanismen von Bedeutung sind, vgl. POLACK et al. [137]. Diesem Umstand wird gegenwärtig ingenieurmäßig durch Herstellerfirmen keine Aufmerksamkeit geschenkt, obwohl für die Reaktoren der Klasse {A}, Gruppe 1, Typ 23 und Typ 24, Klasse {A}, Gruppe 2, Typ 2, und Klasse {B}, Gruppe 1, Typ 2 hinsichtlich des hydraulischen Widerstandes und mechanischen Stabilität Vorteile zu erwarten wären.

Erweist es sich als zwingend erforderlich einen *Lambert - Strahler*, der nach einen vollständigen diffusen Strahler darstellt, anzunehmen, so gilt für die Strahlungsstärke I

$$I = I_0 \cdot \cos(\varepsilon_1) \quad (4.20)$$

mit dem Emissionswinkel ε_1 zum Lot der betrachteten Fläche.

Der Emissionswinkel ε_1 - bezogen auf ein infinitesimales Flächenelement - ist gleich dem Winkel zwischen dem Vektor der Flächennormalen im betrachteten Punkt auf der Oberfläche der Strahlungsquelle innerhalb des durch die *Tangentenmethode* festgelegten Definitionsbereich und dem Vektor von diesem Punkt aus zum Punkt P_0 . Die Berechnung des Winkels ε_1 kann sowohl mit den bekannten Methoden der analytischen Geometrie der Ebene - Schnittwinkel zweier Geraden - oder vektoriell durchgeführt werden. Der Cosinus des Emissionswinkel ε_1 als Funktion des Ortes des Mikroorganismus ist im Bedarfsfall in die entsprechenden Gleichungen als Faktor einzufügen.

Prinzipiell kann auch über den vertikalen Öffnungswinkel ω und dem horizontalen Öffnungswinkel χ integriert werden, wobei sich der letztere aus dem Winkel φ (Leitlinie der Strahlungsquelle über Parameterdarstellung mit r_q) ergibt, vgl. Bild 4-5. Dieser Weg ist allerdings langwieriger und bezieht sich ebenfalls auf die *Tangentenmethode*. Gleichwohl soll eine Grafik das Verhalten dieser Winkel als Funktion der effektiven Länge L_{eff} und des Abstandes y_0 (wenn $x_0 = 0$ gilt) von der Oberfläche der Strahlungsquelle demonstrieren; Bild 4-6.

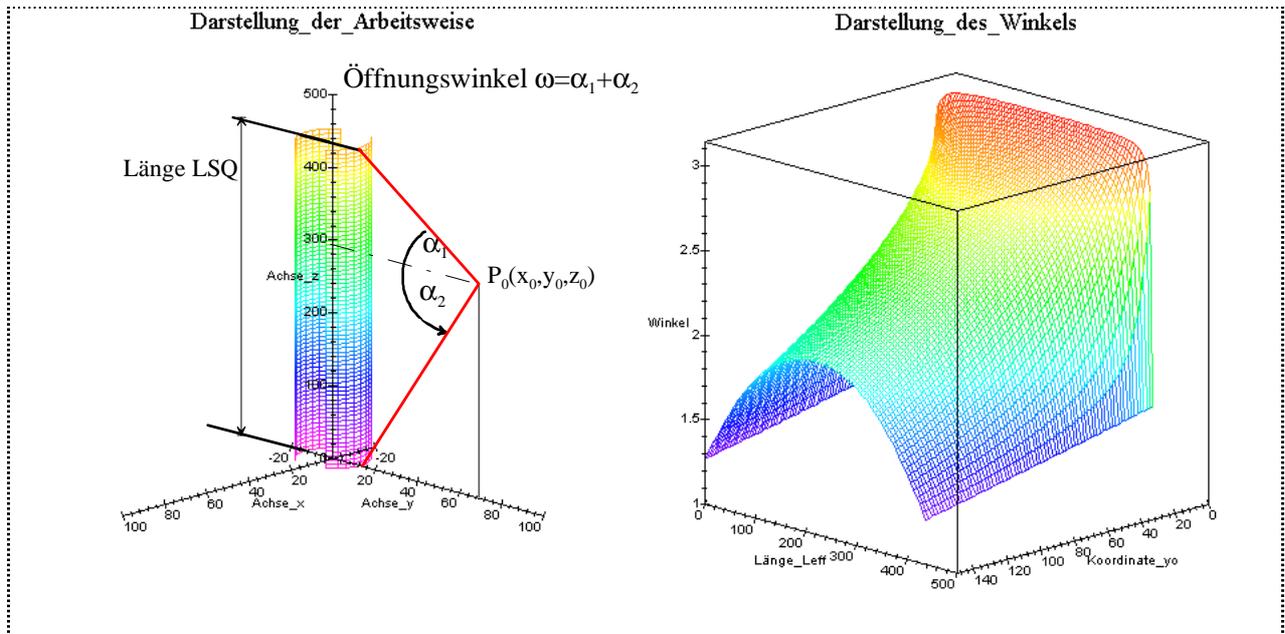


Bild 4-6: Vertikaler Öffnungswinkel ω und Teilöffnungswinkel α in \mathbb{R}^3

Der Rechenweg wurde mit dem weiter unten (Kapitel 5) beschriebenen *Computer Algebra System (CAS)* MAPLE in verschiedenen Testrechnungen unter verschiedenen Bedingungen erfolgreich erprobt. Dabei war es vorteilhaft, den Integranden der betreffenden Gleichung in eine Reihe zu entwickeln und anschließend numerisch zu integrieren. Die Rechnungen nach dieser Methode erwiesen sich stets als zuverlässig bei akzeptablen CPU - Zeiten. Beispielhaft zeigen die Bilder 4-(7, 8, 9) die Berechnungsergebnisse für eine Bestrahlungsstärke E_{St} , bestimmt über Dichte der Bestrahlungsstärke E_{StFD} , auf einen Mikroorganismus ($P(x,y,z)$) für einen Anwendungsfall bei variierten hypothetischen Aufenthaltsorten der *Elementarzelle* im effektiven Volumen V_{eff} dieses UV-Reaktors (Reaktor III nach ABU GHARARAH et al. [99], vgl. Anlage 4). Die Integrationsergebnisse für den Fall, in welchem bei gleicher Wasserqualität ($m_n=0,022$ [1/mm]) in diesem Reaktor der Aufenthaltsort der *Elementarzelle* entlang der y-Achse verschoben wurde, zeigt das Bild 4-7. Wenn der Aufenthaltsort des Mikroorganismus entlang der z-Achse verschoben wird, ergeben sich Bestrahlungswerte, die durch das Bild 4-8 visualisiert werden. Den Einfluss verschiedener Extinktionsmoduli ($m_n = 0,044, = 0,022, = 0,011$ jeweils in [1/mm]) repräsentiert das Bild 4-9. Weitere Einzelheiten werden im Kapitel 5. diskutiert.

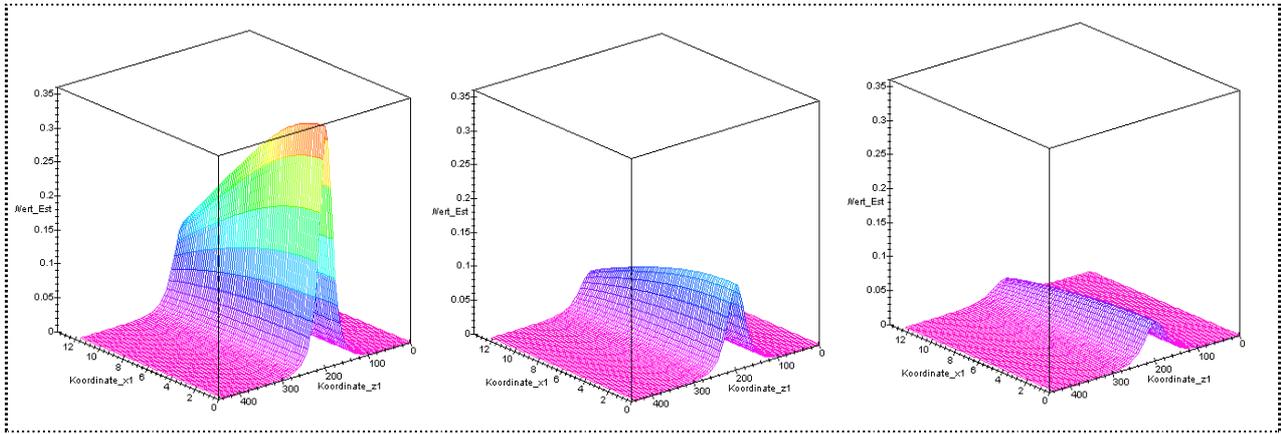


Bild 4-7: Bestrahlungsstärke E_{St} ; $m_n=0,022[1/mm]$, $x_0=0$, $y_0=(33/43/53)$, $z_0=200$ [in mm]

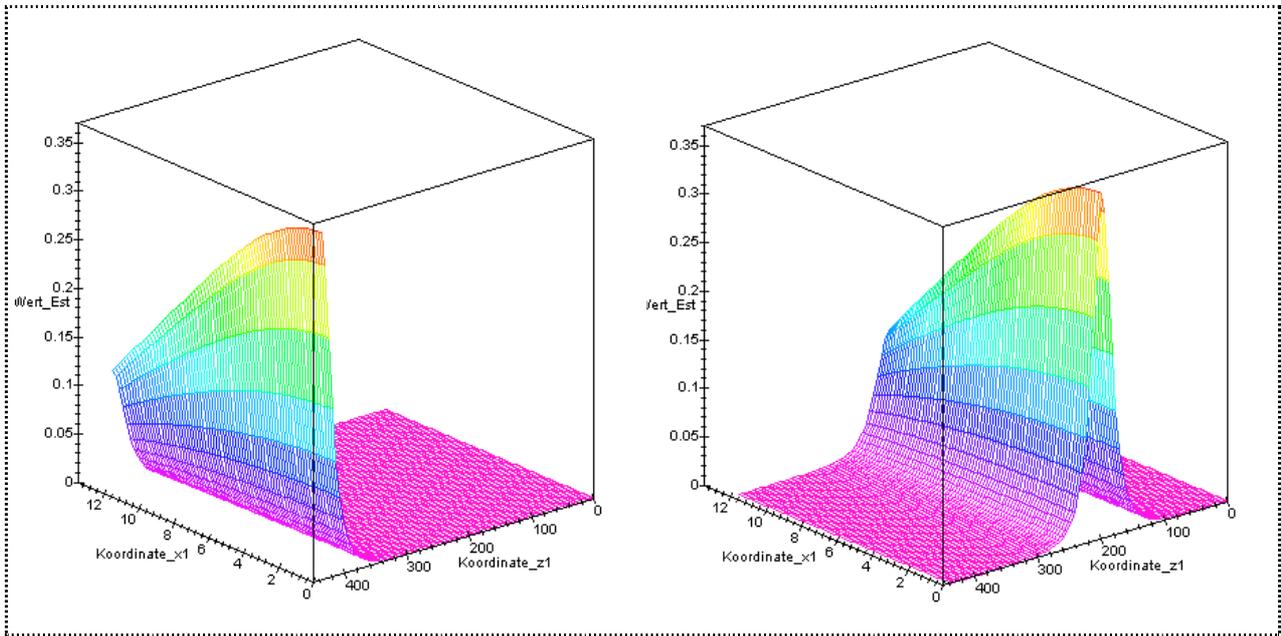
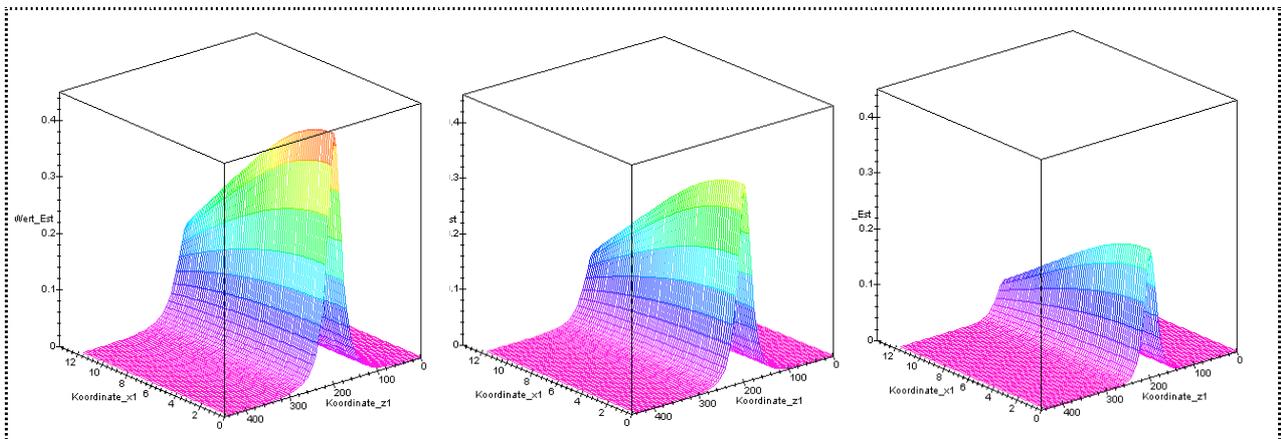


Bild 4-8: Bestrahlungsstärke E_{St} ; $m_n=0,022[1/mm]$, $x_0=0$, $y_0=33$, $z_0=(438/200)$ [in mm]



**Bild 4-9: Bestrahlungsstärke E_{St} ; $m_n=(0,011/0,022/0,044)[1/mm]$,
 $x_0=0$, $y_0=33$, $z_0=200$ [in mm]**

4.2.2. Fluidmechanische Komponente

Grundsätzlich ist man nun in der Lage, über die Bewegung der *Elementarzelle* durch das effektive Volumen V_{eff} bzw. entlang der effektiven Länge L_{eff} eines Reaktors unter der trivialen Annahme einer geradlinig gleichförmigen Bewegung, die Bestrahlung H zu berechnen. Diese Bewegungsform liegt bei einer Verdrängungsströmung, einer laminaren Strömung und einer turbulenten Strömung nach den Potenzansätzen (reine Schichtenströmung) modellmäßig vor. Hierbei wird die Bahnkurve der *Elementarzelle* in kleine Abschnitte unterteilt und dem Mittelpunkt diese Bahnkurvenabschnitte die mittlere Geschwindigkeit v_m dieses Abschnittes zugewiesen, Bild 4-1. Die Gleichungen (3.37) und (3.38) demonstrieren den Weg zur Berechnung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit v_m bzw. u und der Expositionszeit t_{Ex} aus dem betriebstechnisch eingestellten Volumenstrom (Durchsatz). Es liegt auf der Hand, dass bereits unter Anwendung der *Tangentenmethode* des Abschnitts 4.2.1. für diese einfache Modellvorstellung ein Vorteil hinsichtlich der Genauigkeit bei der Berechnung der Bestrahlung H bezüglich der *Elementarzelle* erzielt wird, da die funktionalen Abhängigkeiten der Bestrahlungsstärke E_{St} vom Ort des Mikroorganismus nun in zweifacher Hinsicht Berücksichtigung finden.

In den seltensten Fällen kann eine Strömung in einem technisch realen Reaktor als eine Verdrängungsströmung oder laminare Strömung angesehen werden. Der Begriff „Pfropfenströmung“, der vom Begriff *plug-flow* abgeleitet ist, sollte streng nur in Verbindung mit den Modellvorstellungen verwendet werden, für welche dieser auch geprägt wurde; vgl. Unterabschnitt 3.2.2. und WESTERTERP et al. [100]. Die Berechnung der kritischen *REYNOLDS-Zahl* Re_{krit} über den hydraulischen Radius, die das Umschlagen der Strömung in eine turbulente ($Re_{krit} > 2320$ [120], [124]) markiert, verdeutlicht, dass unter allgemeinen und in der Technik üblichen UV-Reaktorbedingungen hauptsächlich turbulente Strömungen vorliegen. Für eine Reihe von Reaktoren - {A-1-0}, {A-1-3} nach SCHENCK aus den Arbeiten BERNHARDT [12] unter Verwendung der Verbesserungen nach KOSCHITZKY et al. [11], {A-1-7} Praxisreaktor nach der UEBERALL Umweltschutz GmbH [K-14], Anlage 3 und {A-1-7} b(ig) Praxisreaktor mit vergrößertem Durchmesser - wurden die Berechnungen der *REYNOLDS-Zahl* durchgeführt und die Ergebnisse in der Anlage 5 tabellarisch zusammengefaßt. Über die gesamte Reaktorenlängen liegen jeweils bei einem praxisüblichen Durchsatz von 2000 dm³/h (eigene Erfahrungen und Herstellerangaben) sicher turbulente Verhältnisse vor. Die für diesen Fall berechneten mittleren Strömungsgeschwindigkeiten finden auch weiter unten für Testzwecke Eingang in die numerischen Berechnungen (Anfangsbedingungen) und dienen der Fallunterscheidung (verdrängend, laminar, turbulent). Somit steht außer Zweifel, dass für die exaktere Modellbildung die entsprechenden Gleichungen der Fluidmechanik heranzuziehen sind, die kontinuumsmechanisch mit vielen Bezügen zur Elastomechanik abgeleitet werden. Dieses Vorgehen wird mit der Absicht der Verbesserung der Modellvorstellungen zur *Elementarzelle* gewählt und nachstehend dargestellt.

In der Kontinuumsmechanik wird sich vom üblichen Massebegriff (Punktmasse, Systeme von Punktmassen, etc.) abgewandt und eine Masseverteilung $\mu = \mu(\tau, t)$, ein Massestrom $J = J(\tau, t)$ und ein Geschwindigkeitsfeld $v = v(\tau, t)$ eingeführt, wodurch die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \mu(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} (\mu(\mathbf{r}, t) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{r}, t)) = 0 \quad (4.21)$$

für ein betrachtetes Volumenelement $d\tau$ als Äquivalent zur Masseerhaltung mit

$$\begin{aligned} dJ &= j(\mathbf{r}, t) d\tau \\ dm &= \mu(\mathbf{r}, t) d\tau \end{aligned} \quad (4.22)$$

aufgestellt werden kann. Die konsequente Anwendung kontinuumsmechanischer Vorstellung auf die Ableitung der Newtonsche Bewegungsgleichung hat unter Berücksichtigung der Ableitung der Geschwindigkeit \mathbf{v} nach der Zeit t die Grundgleichung der Fluidmechanik

$$\mu(\mathbf{r}, t) \left[\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \circ \right] \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{k}(\mathbf{r}, t) \quad (4.23)$$

zur Folge. Die vorstehende Behandlung der Geschwindigkeit berücksichtigt sowohl die Geschwindigkeitsänderung von zwei um δt entfernten Orten während eines Zeitpunktes als auch die Geschwindigkeitsänderung an einem Ort bei den um δt versetzten Zeitpunkten. Der Ausdruck $\mathbf{k} = \mathbf{k}(\mathbf{r}, t)$ stellt eine auf das Volumenelement $d\tau$ bezogene Kraftdichte und $\mu = \mu(\mathbf{r}, t)$ eine Massedichte dar. Die rechte Seite der Gleichung (4.23) ist insofern zu erweitern, dass neben den volumenbezogenen Kräften (Schwerkraft, Fliehkraft) auch die auf die Oberfläche des Volumenelementes wirkenden Kräfte (Normalspannungen, Tangentialspannungen) berücksichtigt werden. Unter Anwendung der Tensorschreibweise für diese genauer zu bestimmenden Kräfte erhält man die Gleichung

$$d\mathcal{K} = \sum^{d\tau} \mathcal{K} = \mathbf{k}(\mathbf{r}, t) d\tau + \oint_{d\tau} df \mathbf{P} \quad (4.24),$$

in welcher \mathbf{P} die Gesamtheit der Oberflächenkräfte, die auf das betrachtete Volumenelement $d\tau$ wirken, beschreibt. Durch Anwendung des *Gaußschen Satzes* der Integralrechnung und der Berücksichtigung des Umstandes, dass das Volumenintegral über einen infinitesimalen Bereich keinen Beitrag leisten möge, folgt

$$\mu(\mathbf{r}, t) \left[\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \circ \right] \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{k}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \mathbf{P} [\mu, \mathbf{v}] \quad (4.25)$$

als Bewegungsgleichung des Volumenelementes. Entwickelt man den Tensor \mathbf{P} in eine Reihe nach der Geschwindigkeit \mathbf{v}

$$\mathbf{P} [\mu, \mathbf{v}] = \mathbf{P} [\mu, \mathbf{v} = 0] + \overset{\vee}{\mathbf{P}} [\mathbf{v}] \quad (4.26),$$

welcher sich nach dem Abbruch nach der ersten Ableitung als Summe aus einer geschwindigkeitsunabhängigen und einer linear geschwindigkeitsabhängigen Komponente darstellen lässt. Treten keine Geschwindigkeiten auf, hat dies zur Folge, dass keine Tangentialspannungen auf die Oberfläche des Volumenelementes wirken und

$$\begin{aligned} P_{12} = P_{23} = P_{31} = 0 &\rightarrow \text{keine Tangentialspannungen} \\ P_{11} = P_{22} = P_{33} = -p &\rightarrow \text{Normalspannungen} \end{aligned} \quad (4.27)$$

gilt, was unter Verwendung der Schreibweise

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \mathbf{P} &= -\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} I p = -I \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} p = -\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} p \\ \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \mathbf{P} &= -\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} p = -\text{grad } p \end{aligned} \quad (4.28)$$

für den Druckanteil des Tensor $\mathbf{P}[\mu, \mathbf{v}]$ in die Gleichungen (4.26) und (4.25)

$$\begin{aligned} \mathbf{P}[\mu, \mathbf{v}] &= -I p + \overset{\vee}{\mathbf{P}}[\mathbf{v}] \\ \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \mathbf{P}[\mu, \mathbf{v}] &= -\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} I p + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \overset{\vee}{\mathbf{P}}[\mathbf{v}] \end{aligned} \quad (4.29)$$

eingesetzt werden kann. Der zweite Tensor der rechten Seite in Gleichung (4.26) ist von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig und repräsentiert den Anteil der Reibung (Reibungstensor). Dieser ist vereinbarungsgemäß nur dann von Null verschieden, wenn durch die Strömung verursachte Kräfte auf das Volumenelement wirken und dieses verformen. Bestehen die Verrückungen des Volumenelementes lediglich aus Translation und Rotation, so ist dieser Term Null. Eine Verrückung $\delta \mathbf{s}$ setzt sich im allgemeinen aus Translation, Rotation und Verzerrung oder Deformation zusammen.

Da aus der Elastomechanik bekannt ist, dass nur der symmetrische Tensor die Deformation des Volumenelementes beschreibt, sind diese Überlegungen hier adäquat zu berücksichtigen. Aus der Beschreibung der Spannung \mathbf{P} bei einer kleinen Verrückung $\delta \mathbf{s} = \mathbf{v} \delta t$ und den dabei auftretenden Verzerrungen \mathbf{E} lässt sich über

$$\delta \mathbf{E} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \circ \delta \mathbf{s} + \delta \mathbf{s} \circ \frac{\overset{\leftarrow}{\partial}}{\partial \mathbf{r}} \right) = \delta t \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \circ \delta \mathbf{v} + \delta \mathbf{v} \circ \frac{\overset{\leftarrow}{\partial}}{\partial \mathbf{r}} \right) \equiv \overset{\vee}{\mathbf{E}} \delta t \quad (4.30)$$

als symmetrischen Anteil der Verzerrung und unter Berücksichtigung von

$$\begin{aligned} \check{\mathbf{E}} &\neq 0 \\ \check{\mathbf{P}} &= \check{\mathbf{P}} \left[\check{\mathbf{E}} \right] \quad \text{und} \quad \check{\mathbf{E}} = \check{\mathbf{E}} [\mathbf{v}] \end{aligned} \quad (4.31)$$

für den Reibungs- und Verzerrungstensor sowie unter Analogieschlüssen aus der Gleichung der Elastomechanik

$$\mathbf{P} = \frac{E}{1+\mu} \left\{ \mathbf{E} + \frac{\mu}{1-2\mu} \text{I Sp} \mathbf{E} \right\} \quad (4.32)$$

mit dem Elastizitätsmodul E und der Querkontraktionszahl μ schreiben - in ihrer Zusammenfassung auch als *Lame'schen Parameter* χ und λ bezeichnet - und die Gleichung

$$\check{\mathbf{P}} [\mathbf{v}] = 2\eta \check{\mathbf{E}} + (\eta' - 2\eta) \text{I Sp} \check{\mathbf{E}} \quad (4.33)$$

ableiten, wenn unter Verwendung von η als Koeffizient der Wirbelreibung und η' als Koeffizient der inneren Reibung (Kompressionsreibung) die Gleichung (4.32) bearbeitet und umgeschrieben wird. Die Koeffizienten repräsentieren auch die Viskosität des Fluids.

In der Bewegungsgleichung (4.25) tritt die Divergenz des Reibungstensors auf. Deshalb werden die Ableitungen der Gleichung (4.33)

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \check{\mathbf{P}} = 2\eta \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \check{\mathbf{E}} + (\eta' - 2\eta) \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \text{I Sp} \check{\mathbf{E}} \quad (4.34)$$

gebildet.

Unter Verwendung bekannter Beziehungen aus der Vektoranalysis,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \check{\mathbf{E}} &= \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \circ \mathbf{v} + \mathbf{v} \circ \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \circ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{r}} \right) = \frac{1}{2} \left(\Delta \mathbf{v} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \circ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{r}} \right) \\ \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \text{Sp} \check{\mathbf{E}} &= \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{r}} \right) \\ \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \times \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \times \mathbf{v} \right) &= \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \circ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{r}} - \Delta \mathbf{v} \end{aligned} \quad (4.35)$$

folgt

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \check{\mathbf{P}} &= 2\eta \left(\frac{1}{2} \left(\Delta \mathbf{v} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{r}} \right) \right) + (\eta' - 2\eta) \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{r}} \\ \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \check{\mathbf{P}} &= \eta \Delta \mathbf{v} + (\eta' - \eta) \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{r}} \end{aligned} \quad (4.36)$$

und schließlich mit der letzten Beziehung in (4.35) der nachstehende analytische Ausdruck

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \overset{\vee}{\mathbf{P}} = \eta' \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \circ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{r}} - \eta \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \times \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \times \mathbf{v} \right) \right) \quad (4.37).$$

Die Bewegungsgleichung der Fluide (4.25) nimmt unter Verwendung von (4.26), (4.28) und (4.37) die Gestalt

$$\mu(\mathbf{r}, t) \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \circ \right) \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{k}(\mathbf{r}, t) - \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} p - \eta \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \times \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \times \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) \right) \right) + \eta' \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \circ \frac{\partial \mathbf{v}(\mathbf{r}, t)}{\partial \mathbf{r}} \quad (4.38).$$

an - unter Berücksichtigung ihrer Komponenten sind diese die *Navier-Stokesschen* partiellen Differentialgleichungen. Diese Gleichungen beschreiben alle wirklichen, d.h. sowohl die laminare als auch die turbulenten Strömungsvorgänge kompressibler und inkompressibler Fluide; ALBRING [128]. Weitere Anregungen und Details über die Behandlung von Flüssigkeitsströmungen aus kontinuumsmechanischer und elastomechanischer Sicht findet man in den Büchern zur Theoretischen Physik von SOMMERFELD, MACKE, LANDAU und LIFSCHITZ und auch bei KNESCHKE, SMIRNOV und FICHTENHOLZ.

Vorstehende Ableitung beweist, dass die im Abschnitt 4.1. geforderte Isotropie und Homogenität des Raumes und die Einführung der *Elementarzelle* als eine Erweiterung des Begriffs des Volumenelementes eine notwendige und hinreichende Bedingung für die konsequent kontinuumsmechanische Behandlung des Problems unter Verwendung der Kontinuitätsgleichung und der *Navier-Stokesschen* Gleichungen ist. Zusätzlich wird auf der Basis der kontinuumsmechanischen Ableitung gefordert, dass die auftretenden Schubspannungen, die die Verformung der *Elementarzelle* verursachen, derart sein sollen, dass sie die Zellwände des Mikroorganismus lediglich verformen, aber nicht zerreißen (Erhaltung der Zellwände der *Elementarzelle*!).

Die Isotropie und Homogenität des Fluids im Reaktor gestattet auch, dass die Wirbelreibung η und Kompressionsreibung η' vor die Differentialoperatoren gezogen werden können, was in der *Navier-Stokesschen* Gleichung (4.38) bereits ausgeführt ist.

Gewöhnlich werden die *Navier-Stokesschen* partiellen Differentialgleichung bei pragmatischer Herangehensweise über die Einführung der entsprechenden Kräfte in die jeweilige Kräfte-Bilanzgleichung abgeleitet, vgl. BOLLRICH et al. [120], TRUCKENBRODT [122], SCHETZ et al. [123]. Auch auf diesem Weg werden Verallgemeinerungen getroffen, die sowohl aus reaktoroptischer Sicht als auch aus reaktorhydraulischer Sicht erfüllt sein sollen und den vorstehend aufgestellten Forderungen entsprechen. Allerdings ist bei dieser Herangehensweise die Ableitung des Erhaltungssatzes der Zellwände der *Elementarzelle* nicht enthalten.

Die *Navier-Stokesschen* partiellen Differentialgleichungen sind nur für einen begrenzten Problembereich und unter einschränkenden und vereinfachenden Annahmen für die Probleme der Potentialströmung, der schleichende Strömung, der Grenzschichtströmung, bei stationärer voll aus-

gebildeter Schichtenströmung in Druckrohren und einigen Spezialfällen der Wirbelströmung analytisch geschlossen lösbar.

Da im Zusammenhang mit der Arbeit die Desinfektion von Wasser betrachtet wird und dieses den beschreibenden Parametern nach als *Newtonsche Flüssigkeit* anzusehen ist, kann auf die Kompressionsreibung η' verzichtet werden. Das Vorliegen einer *Newtonsche Flüssigkeit*, zu denen nach SCHETZ et al. [123] neben Wasser auch die Mineralöle zu zählen sind, impliziert Dünflüssigkeit und hat eine weitere Konsequenz, die in der Form der Linearität der Abhängigkeit der Tangentialspannungen über die Viskosität und den Geschwindigkeitsgradienten vereinfachend in die Rechnungen eingehen kann. BOLLRICH et al. [120] weisen darauf hin, dass Verunreinigungen, die z.B. als Sand eingetragen werden, zu quasiviskosem Verhalten führen und den *Newtonschen Ansatz* ungeeignet machen. Auch gelöstes Salz beeinflusst die Viskosität, die wenig vom Druck, aber merklich von der Temperatur T abhängt.

Aus den *Navier-Stokesschen* partiellen Differentialgleichungen werden erst dann die *Eulerschen* partiellen Differentialgleichungen, wenn die Reibung insgesamt in der Herleitung keine Rolle spielt. Da Wasser als inkompressibel angenommen und die Massendichte μ somit zeitlich und räumlich konstant ist, folgt aus der Kontinuitätsgleichung (4.21) die Bedingung

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = \text{div}(\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)) = 0 \quad (4.39),$$

die in der *Navier-Stokesschen* partiellen Differentialgleichungen angewendet und unter Verwendung der 3. Zeile von (4.35) die Vereinfachung

$$\mu(\mathbf{r}, t) \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \circ \right) \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{k}(\mathbf{r}, t) - \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} p + \eta \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) \quad (4.40)$$

erlaubt. In der Literatur wird für den beschriebenen Fall auch die Darstellung verwendet, die über die Beziehung

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}, t) \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \circ \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \frac{(\mathbf{v}(\mathbf{r}, t))^2}{2} - \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) \times \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \times \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) \right) \quad (4.41)$$

aus der Vektoranalysis auf die Form

$$\mu \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \frac{(\mathbf{v}(\mathbf{r}, t))^2}{2} = \mathbf{k}(\mathbf{r}, t) - \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} p + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) \times \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \times \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) \right) \quad (4.42)$$

der *Navier-Stokesschen* partiellen Differentialgleichungen für den Fall der inkompressiblen *Newtonschen Flüssigkeit* führt; ([121], [120], [122], [123] u.a.).

Der Ansatz einer *Newtonschen Flüssigkeit* in einem UV-Reaktor hat nur dann Gültigkeit, wenn die Anzahl der Mikroorganismen und deren fluidmechanischen Eigenschaften im effektiven

Volumen des Reaktors diese zur Definition der *Newtonschen Flüssigkeit* herangezogenen Bedingungen nicht stören. Im Umkehrschluß ist also ein Verklumpen der *Elementarzellen*, eine Schwarmbildung bei Auftreten einer allgemeinen Wechselbeziehung der einzelnen benachbarten Spezies und eine Schleimbildung der Bakterien, der über die Oberflächenverhältnisse die fluidmechanischen Widerstandsbeiwerte beeinflusst, nicht im Rahmen des Modells. Sollten die erschwerenden Betriebsbedingungen des UV-Reaktors eine adäquate Berücksichtigung erforderlich machen, so ist reaktoroptisch eine Korrektur über den spektralen Schwächungskoeffizienten, der leicht den Extinktionsmodul m_n ersetzen kann, zu wählen und hinsichtlich der Reaktorhydraulik sind die entsprechenden beschreibenden Parameter nach Diskussion in die vollständigen Gleichungen einzusetzen. Grundsätzlich darf ein UV-Reaktor in keiner Weise „verkeimen“. Experimentelle Untersuchungen in der zuletzt genannten Hinsicht sind in der insgesamt ausgewerteten Literatur nicht enthalten, vgl. Kapitel 8. In der Arbeit von KREYSIG [174] wird die Bildung und Existenz von Biofilmen, welche sich vorzugsweise auf Oberflächen ungünstig gewählter Materialien und schlecht gepflegter Rohrleitungssysteme bilden, aus chemischer und mikrobiologischer Sicht dargestellt. Konsequenzen für die fluidmechanischen Ansätze sind aus dieser Arbeit nicht ableitbar. Das Ablösen einer zusammenhängenden Menge von Mikroorganismen wird nicht erwähnt.

Für kompressible Fluide öffnet LANDAU und LIFSCHITZ [121] eine Querverbindung zur Thermodynamik, indem der Druck in der *Navier-Stokesschen* partiellen Differentialgleichungen einer speziellen Untersuchung über die Hauptsätze der Thermodynamik unterzogen wird. Die Einführung des Impulsstromes gestattet die Definition des Kontrollvolumens und die Behandlung entsprechender Probleme mit dem Impulsstrom, der nach Anwendung des Impulssatzes folgt. Die Probleme der Energiedissipation treten nur bei zähen Flüssigkeiten auf und sind im vorliegenden Fall nicht relevant.

Allerdings liegt, wie vorstehend durch Praxisrechnungen belegt wurde und wie es aus dem technischen Sachverhalt nicht anders ableitbar ist, eine mit Sicherheit vollständige turbulente Strömung vor. Diese wird den Modellvorstellung nach *Osborne Reynolds* folgend, als eine Strömung mit Störungen aufgefaßt, die durch die Geschwindigkeitskomponenten v'_x, v'_y, v'_z , repräsentiert werden, welche um einen Mittelwert v_{Mx}, v_{My}, v_{Mz} schwanken; vergleiche ([120], [121], [122], [123], [127], [126], [128], [132], [133] und [136]). Der Mittelwert selbst steht dem Geschwindigkeitswert, der durch die Gleichungen (4.40) und (4.42) beschrieben wird, gleich und wird jeweils mit kleinen Fluktuationen (Störungen) versehen; (u', v', w', p'). Es gilt folglich

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= v_x \rightarrow v_{Mx} + v'_x \text{ oder } u = U + u' \\
 \dot{y} &= v_y \rightarrow v_{My} + v'_y \text{ oder } v = V + v' \\
 \dot{z} &= v_z \rightarrow v_{Mz} + v'_z \text{ oder } w = W + w' \\
 p &= p \rightarrow p_0 + p' \text{ oder } p = P + p'
 \end{aligned}
 \tag{4.43},$$

wobei nach *Reynolds* für die Mittelwertbildung -Mittelwert M- das Verfahren

$$M = \frac{1}{8\xi\eta\zeta\tau} \int_{x-\xi}^{x+\xi} \int_{y-\eta}^{y+\eta} \int_{z-\zeta}^{z+\zeta} \int_{t-\tau}^{t+\tau} \dots dx dy dz dt$$

mit $M(u') = M(v') = M(w') = M(p') = 0$ (4.44)

und $M(u) = u, M(v) = v, M(w) = w, M(p') = p$

für kleine Entfernungen vom untersuchten Punkt zu wählen ist; HAMEL [127]. Analog gilt dies für die ersten Ableitungen, aber nicht für die Produkte aus diesen und deren Quadrate. Mit der Definition der Standardabweichung des Mittelwertes

$$M_u = (u'_M)^2 = \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} (u')^2 dt$$
 (4.45)

folgt nach Anwendung auf alle Geschwindigkeitskomponenten nach SCHETZ et al. [123]

$$T = \frac{1}{v_{Mx}} \left[\frac{M_u + M_v + M_w}{3} \right]^{\frac{1}{2}}$$
 (4.46)

als Maß für die Turbulenz einer voll entwickelten turbulenten Strömung.

Verwendet man den Turbulenzansatz (4.43) und fordert Isotropie, Homogenität und Inkompressibilität der Grundströmung, so folgt für die Kontinuitätsgleichung

$$\operatorname{div}(\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)) + \operatorname{div}(\mathbf{v}'(\mathbf{r}, t)) = 0$$
 (4.47)

und für die *Navier-Stokesschen* partiellen Differentialgleichungen

$$\mu(\mathbf{r}, t) \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v}_M(\mathbf{r}, t) \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \circ \right) \mathbf{v}_M(\mathbf{r}, t) = \mathbf{k}(\mathbf{r}, t) - \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} p + \eta \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \mathbf{v}_M(\mathbf{r}, t) + \mathbf{P}_T$$
 (4.48),

in welcher die zusätzlichen durch die Turbulenz verursachten Spannungen durch \mathbf{P}_T vertreten sind. Damit ist ein halb empirischer Ansatz für die weitere Behandlung des Phänomens gegeben. Nach HAMEL [127] hat bereits *Boussinesq* in „*Théorie de lécoulement tourbillonnant*“ für den Fall der ebenen Strömung zwischen parallelen Platten einen Ansatz unter Einführung der turbulenten Viskosität η_T gemacht, der sich formal an den *Newtonschen Reibungsansatz* anlehnt, jedoch die Größe ε enthält, die keine Materialkonstante ist, sondern von der mittleren freien Weglänge der Turbulenz abhängig ist. Diese Vorstellungen wurden weiter entwickelt und führten zur Transportgleichung der turbulenten kinetischen Energie

$$\frac{\partial}{\partial t} (\mu(\mathbf{r}, t) k(\mathbf{r}, t)) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} (\mu(\mathbf{r}, t) \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) k(\mathbf{r}, t)) = \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \left(\Gamma_k \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} k(\mathbf{r}, t) \right) + \mathbf{G} - \mu \mathcal{E}$$
 (4.49)

und zur Gleichung für die turbulente Energie-Dissipationsrate ε

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mu(\mathbf{r},t)\varepsilon(\mathbf{r},t)) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}}(\mu(\mathbf{r},t)\mathbf{v}(\mathbf{r},t)\varepsilon(\mathbf{r},t)) = \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}}\left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}}k(\mathbf{r},t)\right) + \mathbf{A}_\varepsilon[\mathbf{G}, k, \varepsilon] \quad (4.50)$$

die nach PANTAKAR [126] und SCHETZ et al. [123] in Anlehnung an die Arbeiten von *Launder* und *Spalding* (Arbeiten [129], [130]) als *Zwei-Gleichungen-Modell* (*k-ε-Modell-Gleichungen*) der fluktuierenden Bewegung (Turbulenz im Sinne von *O. Reynolds*) in der Literatur zu finden ist. In der Gleichung (4.49) ist die turbulente kinetische Energie k in Anlehnung an das *Ficksche Gesetz* mit einem Diffusionskoeffizienten Γ_k , einer Erzeugungsrate für die turbulente Energie G und einer turbulenten Dissipationsrate ε verknüpft. Die Differenz am Ende der rechten Seite der Gleichung (4.49) stellt somit die (Netto-) Erzeugung der turbulenten Energie dar. Passend dazu ist die Gleichung für die turbulenten Dissipationsrate ε aufstellbar (4.50), welche auch als Transportgleichung der turbulenten Dissipationsrate bekannt ist. Auf der rechten Seite der Gleichung ist der Summand A_ε auch eine Funktion der Erzeugungsrate G der turbulenten kinetischen Energie. Hinter der Größe G verbirgt sich ein komplexer Ausdruck der Geschwindigkeitsgradienten der mittleren Geschwindigkeiten für die Erzeugung der turbulenten kinetischen Energie enthält, VIESER et al. [139], TECHNISCHE DOKUMENTATIONEN ([132], [133], [136]). Die in Anlehnung an das *Ficksche Gesetz* der Diffusion eingeführten Größen Γ (Index k für die turbulente Energie und Index ε für die Dissipation der turbulenten kinetischen Energie) beinhaltet nach

$$\Gamma_k = \left(\frac{\eta_T}{\sigma_T} + \eta\right) \quad \text{und} \quad \Gamma_\varepsilon = \left(\frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} + \eta\right) \quad (4.51)$$

die turbulente Viskosität η_T , die normale Viskosität η und die *Schmidtzahlen* für die Turbulenz σ_K und die Dissipationsrate σ_ε . Bei diesem Ansatz wird die voll ausgebildete Turbulenz bzw. die Isotropie der Turbulenz vorausgesetzt.

Über eine Dimensionsanalyse wird die turbulente Viskosität η_T mit der turbulenten kinetischen Energie und deren Dissipationsrate

$$\eta_T = \mu c_\eta \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{und} \quad k_T = \eta_T c_p \frac{1}{Pr_T} \quad (4.52)$$

verknüpft. Dabei wird neben der Massendichte μ , die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p , die *Prandtlsche Zahl* Pr und eine experimentell zu bestimmende Größe c_η verwendet. Durch das Einführen der turbulenten Viskosität η_T und der Größe k_T in das Gleichungssystem wird der Übergang zu einem halbempirischen Modell vollzogen. Die Größen η_T und k_T sind in der ursprünglichen theoretischen Ableitung über die Ansätze für die Geschwindigkeiten nach (4.43) Differentialausdrücke, vgl. TECHNISCHE DOKUMENTATIONEN ([132], [133], [136]) und VIESER et al. [139].

Weitere Einzelheiten zur Methodik, die durch G repräsentierten differentiellen Ausdrücke durch experimentelle und rechnerische Abschätzungen in der Form von Verfahrenskonstanten zu ersetzen, sind der Originalliteratur zu entnehmen. Es sei an dieser Stelle auf den Umstand hingewiesen, dass gerade diese Konstanten sogar teilweise an das jeweilige Problem angepaßt werden können, um eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen zu erzielen.

Da bei *nicht - Newtonschen Flüssigkeiten* während der Bewegung des Fluids Wärme entsteht und diese durch die Bewegung des Fluids selbst weiter transportiert wird - Konvektion - ist es erforderlich, diese Problematik über den ersten Hauptsatz der Thermodynamik in das System der Differentialgleichungen einzubinden. Nach PATANKAR [126] und den TECHNISCHEN DOKUMENTATIONEN ([132], [133], [136]) gilt folglich für die Energie eines inkompressiblen Fluids im Unterschallgeschwindigkeitsbereich die Gleichung

$$c_p \frac{\partial}{\partial t} (\mu(\mathbf{r}, t) T(\mathbf{r}, t)) + c_p \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} (\mu(\mathbf{r}, t) \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) T(\mathbf{r}, t)) = \lambda \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} T(\mathbf{r}, t) + q_T \quad (4.53)$$

mit der absoluten Temperatur T , der Massendichte μ , der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p , der Wärmeleitfähigkeit λ und die volumetrische Wärmequelle q_T die durch die Turbulenz verursacht wird. Der Ansatz für die mittlere Temperatur T_M und deren durch die Turbulenz bedingten Störungen T' in Anlehnung an (4.43) hat die Gleichung

$$c_p \mu \frac{\partial}{\partial t} (T_M(\mathbf{r}, t)) + c_p \mu \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} (\mathbf{v}_M(\mathbf{r}, t) T_M(\mathbf{r}, t)) = \lambda \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} T(\mathbf{r}, t) - c_p \mu T'(\mathbf{r}, t) \right) + q_V \quad (4.54)$$

zur Folge.

Gleichzeitig gestatten die Gleichungen (4.49), (4.50), (4.53) bzw. (4.54) eine Vereinfachung zu Gunsten der numerischen Lösung der partiellen Differentialgleichungen, da wegen der ersichtlichen sich ähnelnden Gleichungsstruktur nachstehende Gleichung bezogen auf die stellvertretende Größe ϕ

$$\frac{\partial}{\partial t} (\mu(\mathbf{r}, t) \phi(\mathbf{r}, t)) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} (\mu(\mathbf{r}, t) \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) \phi(\mathbf{r}, t)) = \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \left(\Gamma \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \phi(\mathbf{r}, t) \right) + S \quad (4.55)$$

nach PANTAKAR [126] formuliert werden kann und durch eine geeignete Wahl der Koordinaten eine Einheitenunabhängigkeit erzielbar ist. Die Wahl der geeigneten Koordinaten hat ebenfalls PANTAKAR [126] ausführlich beschrieben.

Die mathematischen Grundlagen bedürfen weiter Anpassungen und eine für die Belange der numerischen Mathematik zugeschnittene Form. Die Einzelheiten des verwendeten *k-ε-Modells* sind in den Quellen SCHETZ et al. [123], KLEIN [125], PANTAKAR [126], HAMEL [127], ALBRING [128], PRESS et al. [133], und in den TECHNISCHEN DOKUMENTATIONEN ([132] bis [136]) im Detail nachlesbar.

Das nun vorliegende System von partiellen Differentialgleichungen für eine inkompressible Flüssigkeit die im effektiven Volumen des UV-Reaktors vollständig isotrop - auch hinsichtlich der Turbulenz - und homogen sein möge, wird mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) gelöst. Der Preprozessor, der Prozessor und der Postprozessor sind in das Programmpaket COSMOS, bestehend aus GEOSTAR und FLOWPLUS mit CFDdisplay, bzw. COSMOS - FloWorks eingebunden. FLOWPLUS bzw. COSMOS - FloWorks gestattet unter anderem die Berechnung der Geschwindigkeitskomponenten v_x, v_y, v_z , und die Berechnung der Ortskoordinaten x, y, z eines sich in der Strömung befindlichen hypothetischen Partikels mit der *Particle-Tracing-Methode*. Diese Methode ist als Analyseoption eingebunden und ermöglicht die Ausgabe der Ergebnisse der Simulation in der Form von ASCII-Files. Diese Methode basiert nach der TECHNISCHEN DOKUMENTATION [136] und nach SAMARSKIJ [176] auf dem *Lagrangeschen* Formalismus und der Lösung der Bewegungsgleichung des hypothetischen kugelförmigen Partikels nach der semiempirischen *HENDERSONschen* Gleichung

$$m_p \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = - \frac{\rho (\mathbf{v}_F - \mathbf{v}_p) \cdot (|\mathbf{v}_F - \mathbf{v}_p|)}{2} \cdot C_d A_p + \mathfrak{F}_g \quad (4.56),$$

in welche die Geschwindigkeit des Fluids \mathbf{v}_F , die Geschwindigkeit des Partikels \mathbf{v}_p , der Partikelwiderstandsbeiwert C_d , die Partikelquerschnittsfläche A_p senkrecht zur Strömung und der Einfluss der Schwerkraft \mathfrak{F}_g eingeht. Der Widerstandsbeiwert wird nach

$$C_d = \frac{24}{\text{Re}} \cdot \frac{4,12}{1 + 0,03 \cdot \text{Re} + 0,48 \cdot \sqrt{\text{Re}}} + 0,38 \quad (4.57)$$

bestimmt, wobei in die Berechnung der REYNOLDS - Zahl nach der üblichen Definition z.B. nach PREIBLER et al. [120] anstelle der mittleren Strömungsgeschwindigkeit der Betrag der Differenz der Geschwindigkeitskomponenten wie in Gleichung (4.56) verwendet wird.

Mit der Kenntnis der Ortskoordinaten lassen sich Wegabschnitte definieren und ihnen eine Geschwindigkeit zuweisen. Damit ist das Integral, Gleichung (4.5), ebenfalls einer numerisch Lösungsmethodik zugänglich.

Für die externe Berechnung werden die Programme *Computer Algebra System* MAPLE und ORIGIN Professional verwendet, siehe auch Kapitel 5., Abschnitt 5.3.. Dabei wird angenommen, dass die *Elementarzelle* den Bewegungen dieses Partikels folgt.

Es sei darauf hingewiesen, dass neben dem *k-ε-Modell* auch das *k-ω-Modell* und das *k-l-Modell* erfolgreich in der Anwendung sind; VIESER et al. [139]. Die Firma BRNI hat das *RNG-Modell* in die Software FLOWPLUS eingebunden, vgl. Abschnitt 5.3.. Dieses Modell hat eine engere Anlehnung zur Ableitung der turbulenten Viskosität und unterscheidet sich hinsichtlich der Wahl der Konstanten. Es ist im allgemeinen genauer aber nicht in gleicher Weise stabil. In der Literatur wird insgesamt darauf hingewiesen, dass das *k-ε-Modell* sehr zuverlässig und robust hinsichtlich der Simulationsrechnungen ist.

Somit wurde gezeigt, dass die fluidmechanische Komponente ebenfalls Homogenität und Isotropie fordert, wie dies bereits bei der Ableitung der reaktoroptischen Komponente der Fall war. Die Forderung nach Isotropie erfährt insofern eine Erweiterung, dass diese auch hinsichtlich der Turbulenz vorliegen muss. Das ist dann der Fall, wenn es zu einer vollständigen Entwicklung der turbulenten Strömung im Reaktor gekommen ist. Somit muss für die *REYNOLDS-Zahl* $Re > Re_{kr} = 2320$ gelten; vgl. auch Tabellen in der Anlage 5.

Der in das Volumenelement eingeschlossen gedachte Mikroorganismus stellt, wie bereits erwähnt, verallgemeinert eine *Elementarzelle* dar. Die an dieser *Elementarzelle* angreifenden Scherkräfte verformen diese nicht soweit, dass die Zellwände zerreißen. Ein Zerreißen der Zellwände bzw. der geschlossenen Struktur beendet die Lebensfähigkeit des Organismus. Dieser Effekt ist im technisch üblichen Reaktorbau nicht zu erwarten, wurde allerdings in Apparaturen zum Wasserstrahlschneiden von Stahl beobachtet. Die Ursache wird den extremen dynamischen Belastungen zugewiesen, die während des Prozesses erreicht werden. Das Wasser wird als Transport- und Antriebsmedium in der Düse auf 1,5 bis 2 Mach beschleunigt (Druck 500 - 4000 Bar). Unter diesen Bedingungen kann Wasser nicht mehr als inkompressibel angesehen werden. Die im Wasser befindlichen abrasiv wirkenden Partikel erreichen eine Geschwindigkeit von 230 m/s bzw. bis 1,12 Mach. Andere Arbeiten befassen sich mit der gezielten Nutzung dieses Effektes um schadstoffbeladenes Wasser zu reinigen, STEINMANN [175] und [178].

Sowohl eine die Viskosität beeinflussende Schwarmbildung der Spezies, das Vorliegen von Partikeln im Trägerfluid und der Salzgehalt des Fluid als auch ein an den Reaktorwänden sich bildender die Randbedingungen beeinflussender bakterieller Schleim (Biofilm) mögen auf Grund der gewählten Bestrahlungs- und Betriebsbedingungen des gewählten UV-Reaktors nicht auftreten.

4.2.3. Mikrobiologische Komponente

Die Mechanismen der Wirkung der UV-Strahlung auf die Mikroorganismus ist, wie in den Grundlagen Kapitel 3, Abschnitt 3.1., im Überblick dargestellt wurde, außerordentlich komplex; Bild 3-1. Jeder Organismus weist von Natur aus spezifische Eigenschaften auf, die noch von einer Vielzahl von Existenzumständen abhängen. Dadurch ist es sehr schwierig, allgemeingültige Beziehungen aufzustellen, die einer leichten mathematischen Handhabung, vor allem hinsichtlich des Einsatzes der Methoden der numerischen Mathematik, zugänglich sind. Die Informationen die die Tabellen 3-1, 3-2, 3-3, und 3-4 enthalten repräsentieren diese Komplexität und demonstrieren die damit verbundenen Schwierigkeiten wenige allgemeingültige und zuverlässige experimentell belegte Zahlenwerte aus der Literatur zusammenzustellen, vgl. auch Anlage 1, Tabelle A1-1 und Tabelle A2-1.

Die UV-Reaktoren herstellende Industrie bezieht sich gerne auf die Wellenlänge $\lambda = 254$ (253,7) nm, die lediglich die Hauptemissionslinie des Quecksilberspektrums darstellt. Bereits die zweite Emissionslinie des Quecksilbers, $\lambda = 184,957$ nm, wird, da sie nicht unmittelbar genutzt werden kann, kaum erwähnt.

In der Erforschung der Wirkung der UV-Strahlung auf Mikroorganismen wurde in der Vergangenheit Pionierarbeit geleistet, und die Wirkmechanismen sind bis hin zu den Reparaturmechanismen intensiv erforscht wurden, Kapitel 3, Abschnitt 3.1. und Unterabschnitte 3.1.1. und 3.1.2.. So liegen auch detaillierte Informationen in der Form von Absorptionsspektren der wichtigsten Bausteine der Organismen und von Einzelspezies vor. Traditionelle mikrobiologische Laborarbeiten im Zusammenhang mit der UV-Technologie greifen auf eine UV-Strahlungsquelle zurück und konzentrieren sich auf die Biologie der Prozesse im Experiment bzw. auf eine Prototypenuntersuchung. Dabei sollte dem Absorptionsspektrum, vgl. Bilder 3-5 bis 3-8, stets das Emissionsspektrum der betreffenden verwendeten Strahlungsquelle gegenübergestellt werden. Die in der Praxis verwendeten Strahlungsquellen haben ein komplexes Emissionsspektrum, Bilder 3-3, 3-4 und 3-9. Eine Untersuchung des Organismusverhaltens gegenüber monochromatischer Strahlung ist experimentell nur mit großem apparativen Aufwand zu gestalten und mit jedem Versuch liegen, selbst wenn die gleichen Spezies untersucht werden, Probanden mit unterschiedlichen Eigenschaften vor. Allerdings gibt es erfolgreiche Ansätze, die sich diesen Schwierigkeiten stellen und zugleich über das Potential verfügen, diese auch hinsichtlich der Ansprüche einer angestrebten Mathematisierung zu überwinden. Bereits das Studium der DIN Unterlagen, DEUTSCHE NORM ([155] bis [161]), und darunter besonders der DEUTSCHE NORM [158], 5031 - Teil 4, und die DEUTSCHE NORM [161], 5031 - Teil 10, liefert handhabbare Ansätze. Im Jahre 1982 hat auch COUTTERET [81] adäquate Möglichkeiten demonstriert. In der zitierten Arbeit und den DIN - Dokumenten wird analog zu den Gleichungen (3.7), (3.39) des Kapitels 3. ein Ansatz für die mikrobiologisch (photobiologisch) wirksame Bestrahlung in der Form

$$H_{biol} = \int_{t_1}^{t_2} E_{biol}(t) dt \quad (4.58)$$

gewählt. In Anlehnung an die technische Situation kann die Bestrahlungsstärke $E_{biol}=E_{biol}(t)$ als zeitunabhängig angesehen werden, da das Plasma der Strahlungsquelle nach einer technisch bedingten Startphase als voll entwickelt gilt und während des Betriebs vereinbarungsgemäß keine zeitlichen Schwankungen der Strahlungen auftreten sollen. Dies ist durch das exakte Einstellen der für die einzelnen Strahlungsquelle zutreffenden elektrischen Betriebsparameter (Spannung, Strom, Frequenz) möglich. Im übrigen wirkt sich diese Arbeitsweise ohnehin günstig auf die maximale Betriebszeit der UV-Strahlungsquellen aus und hilft, Alterungseffekte zu unterdrücken.

Befindet sich ein Quecksilber-Niederdruckstrahler in der Anwendung und bezieht man sein diskretes Spektrum auf das kontinuierliche Absorptionsspektrum der DNS, so ist es möglich, über die Normierung des Absorptionsspektrum auf sein Maximum einen Ausdruck anzugeben, welcher die Wirkung der Strahlung auf die Substanz beschreibt.

Da ein Mikroorganismus aus vielen Bausteinen aufgebaut ist und nicht nur die DNS enthält, obwohl man hier am effektivsten ansetzen kann, ist das Absorptionsspektrum eines Organismus komplexer und ergibt sich aus den Absorptionsspektren seiner Bausteine sowie aus seiner

Struktur. Durch diese Herangehensweise hat man sich von der DNS, der RNS, den Proteinen etc. gelöst und betrachtet den Organismus als Einheit.

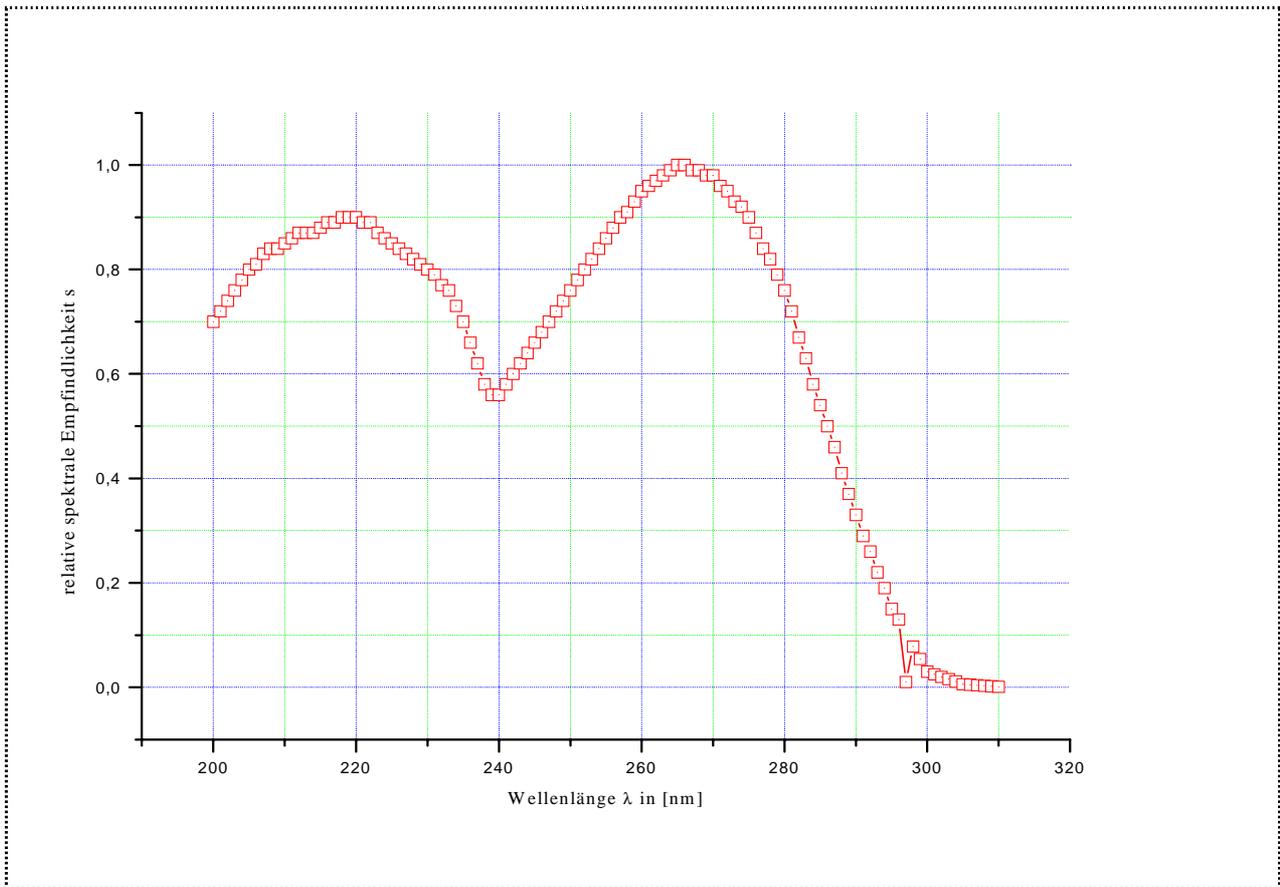


Bild 4-10: Relative spektrale Empfindlichkeit $s=s(\lambda)$, des photobiologischen Vorgangs, entspricht Sensibilität $k^*=k^*(\lambda)$

Über seine relative spektrale Empfindlichkeit $s=s(\lambda)$ des photobiologischen Vorgangs, die messtechnisch erfaßt und durch das auf sein Maximum normiertes Absorptionsspektrum ausgedrückt wird, kann man über die Beziehung

$$E_{biol} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{St\lambda} \cdot s(\lambda) d\lambda \quad (4.59)$$

das Emissionsspektrum und das Absorptionsspektrum in Relation setzen. Die Bestrahlungsstärke $E_{St\lambda} = E_{St}(\lambda)$ wird auf das jeweilige Emissionsspektrum bezogen und stellt die spektrale Bestrahlungsstärke dar. Zieht man die Gleichungen (4.58) und (4.59) zusammen, unterstellt die Zeitunabhängigkeit und wendet die vorstehenden Überlegungen auf den biologisch wirksamen Strahlungsfluss Φ_{biol} an, folgt

$$\Phi_{0biol} = \Phi_{0biol}(\lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi'_{0\lambda}(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda \quad (4.60)$$

und unter Bezug auf die Gleichung (4.5) schließlich

$$H_{biol} = \int_A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\Phi_{biol}(\lambda, \mathbf{r}(S))}{A} \cdot \frac{1}{|\mathbf{v}(\mathbf{r}(S))|} \cdot dS \cdot d\lambda \quad (4.61)$$

wobei im Ausdruck für den Strahlungsfluss Φ_{biol} zu berücksichtigen ist, dass bei der Anwendung des *Lambert - Beerschen - Gesetzes* unter Beachtung von

$$\Phi_{0biol} = \Phi'_{0\lambda}(\lambda) s(\lambda) \quad (4.62)$$

für den Anfangs-Strahlungsfluss Φ_{0biol} der allgemeine Ausdruck

$$H_{biol} = \int_A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\Phi'_0(\lambda) s(\lambda)}{A} \cdot e^{-m_{n,\lambda}(|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|)} \cdot \frac{1}{|\mathbf{v}(\mathbf{r}(S))|} \cdot d\lambda \cdot dS \quad (4.63)$$

für die (mikro-)biologisch wirksame Bestrahlung H_{biol} als eine der grundlegenden Verfahrensgleichungen aufgestellt werden kann.

Somit stehen drei Wege zur Verfügung, die reaktoroptische Komponente mit der mikrobiologische Komponente zu vereinen. Wie im Kapitel 3. dargelegt wurde, kann zum einen der traditionellen mikrobiologischen Experimentiertechnik folgend sofort die Konstante k^* aus den Experimenten bestimmt werden, ohne die Kenntnis der relativen spektrale Empfindlichkeit. Besondere sich im Experiment ausweisende Effekte (Schultereffekt, Schwellenwerte) finden dann gleich Eingang in die entsprechenden Ansätze für die Anzahl der überlebenden Organismen N , Gleichung (3.14), und den Reduktionsfaktor RF, Gleichung (3.12). Einschränkend gelten diese Ergebnisse aber nur exakt für diesen speziellen Versuchsaufbau insbesondere für die im Einsatz befindliche Strahlungsquelle. Dynamische Prozesse finden keine Berücksichtigung.

Wenn die relative spektrale Empfindlichkeit $s=s(\lambda)$ des betrachteten photobiologischen Vorgangs zum anderen experimentell bestimmt wurde, kann unter Ansatz der Bestrahlung H , Gleichung (4.58), unter Verwendung der biologisch wirksame Bestrahlungsstärke E_{biol} , Gleichung (4.59), und einer mittleren Expositionszeit t_{Ex} die Anzahl der überlebenden Organismen N , Gleichung (3.14), bezogen auf eine Spezies bestimmt werden und daraus schließlich der Reduktionsfaktor RF. Der hier erforderliche Koeffizient wird zur Unterscheidung mit k^* gekennzeichnet, da aus diesem die Wellenlängenabhängigkeit eliminiert wurde. Allerdings werden über diesen die übrigen Einflussfaktoren, beispielsweise die Temperatur und weitere speziesabhängigen Faktoren, berücksichtigt. Die konsequente Anwendung der Verfahrensgleichung, Gleichung (4.63), gestattet außerdem die numerische Berechnung der biologisch wirksamen Bestrahlung H_{biol} entlang der Bewegung der *Elementarzelle* durch das effektive Volumen V_{eff} des UV-Reaktors. Somit lassen sich sofort Aussagen über die zuverlässige Inhibierung eines Mikroorganismus machen.

Aus den Berechnungsergebnissen der Bestrahlung H vieler fluidmechanische möglicher Bewegungsbahnen der *Elementarzellen* lässt sich eine Statistik ableiten, die eine mittlere Bestrahlung

zum Resultat hat und Maximal- und Minimalwerte angibt. Die Anwendung der Gleichung (3.14) mit dieser Bestrahlung gestattet die Berechnung der Anzahl N der überlebenden Organismen und schließlich der Reduktionsfaktor RF.

Für die zuvor beschriebenen Verfahren muss das Spektrum der Strahlungsquelle digitalisiert als Zahlenwertabelle oder als ein funktionaler Zusammenhang bekannt sein, bevor dieses mit der relativen spektralen Empfindlichkeit $s=s(\lambda)$ des auf die Spezies bezogenen photobiologischen Vorgangs (Inhibierung/Zerstörung) Eingang in die analytischen bzw. numerischen Berechnungen erfahren kann.

Alle in der technischen Anwendung befindlichen Strahlenquellen werden elektrisch betrieben, vgl. Kapitel 3., Abschnitt 3.3., Unterabschnitt 3.3.2.. Somit kann über Strom und Spannung die Leistungsaufnahme der reinen Strahlungsquelle P_{el} und über den experimentell ermittelten Wirkungsgrad η der Strahlungsquelle der Strahlungsfluss Φ berechnet werden; vgl. Tabelle 3-9 und Tabelle 3-10. Quecksilber-Niederdruckstrahler emittieren etwa 40% der aufgenommenen elektrischen Leistung als Strahlung auf der Wellenlänge $\lambda = 253,7$ nm, Tabelle 3-9. Geht man mit zunehmenden Druck des Quecksilbers und weiterer Beimischungen in den Arbeitsbereich der Quecksilber-Mitteldruckstrahler Hybrid-Strahler etc. über, ist wie bereits erwähnt der Übergang zum kontinuierlichen Emissionspektrum die Folge. Dadurch wird der Wirkungsgrad wellenlängenabhängig, was in der Definition zu berücksichtigen ist. Der Wirkungsgrad η_{LSQ} in Gleichung (3.31) hat somit den photobiologischen Wirkungsgrad $\eta_{e,biol}$ nach

$$\eta_{e,biol} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda) \cdot d\lambda}{P_{el}} \quad (4.64)$$

zu berücksichtigen, wobei die Werte der Wellenlängen λ_1 und λ_2 den interessierenden, durch die relative spektrale Sensibilität s eingeschränkten Bereich, festlegen. In Anlehnung an die DOKUMENTE [158], DIN 5031-Teil 4, kann ein photobiologisch - optischer Nutzeffekt nach

$$O_{phb} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (4.65)$$

festgelegt werden, wobei das im Nenner befindliche Integral die gesamte, in Strahlung umgewandelte elektrische Leistung erfaßt.

5. Anwendung des *GFM* und Diskussion der Ergebnisse

Die *Gekoppelten Fluidmechanischen Modelle (GFM)* werden in diesem Kapitel auf einen theoretischen, in der Praxis nicht existierenden, idealen UV-Reaktor {A-1-0} und einen in der Praxis vorhandenen UV-Reaktoren {A-1-7} angewendet und in Bezug auf die Harmonie ihrer Einzelkomponenten und auf Robustheit getestet. Um den Einfluss der Änderung nur eines Konstruktionsparameters zu untersuchen und zu demonstrieren, wird ein weiterer vom UV-Reaktor {A-1-7} abgeleiteter Reaktor, der UV-Reaktor {A-1-7}b definiert und in die Untersuchungen eingeschlossen. An konkreten Beispielen werden nachstehend die Resultate, die mit dem *GFM* erzielt wurden, den Resultaten, die unter indentischen Voraussetzungen (Anfangs- und Randbedingungen) mit den Modellen -zylinderförmiges Strahlungsfeld einer Linienstrahlungsquelle und PSS-Methode- erzielt werden konnten, gegenüber gestellt.

Für die numerischen Berechnungen kamen die Softwarepakete GEOSTAR, FlowPlus, Solid Works, FloWorks, das Computer Algebra System MAPLE, ORIGIN - Professional und verschiedene Rechentechnik zur Anwendung, weitere Einzelheiten dazu vgl. Abschnitt 5.4..

5.1. Numerische Simulationen, Modell-Berechnungen - Anwendung des *GFM*

Die numerischen Simulationen unter Verwendung des *Gekoppelten Fluidmechanischen Modells* sind auf zwei qualitativ verschiedenen Wegen möglich. Es handelt sich dabei um die Software - Variante und um eine *spread-sheet*-Variante bzw. um Spreadsheet-Berechnungen deren Begriff in Anlehnung an die Arbeit von SANJAY-REDDY et al. [145] („...*spread sheet based models.*“) geprägt und verwendet wird.

Die Software - Variante erfordert Entwicklungsschritte, die darin bestehen, den Quellcode einer existierenden CFD - Software durch den speziellen Quellcode des *GFM* zu erweitern und über die entsprechenden Schnittstellen in die Software einzubinden. Dadurch würde eine, auf die entsprechende Bedürfnisse des UV-Reaktorbaus ausgerichtete, erweiterte CFD - Software vorliegen. Da dies noch nicht der Fall ist, mußte auf eine Hybrid-Variante, eine Kombination von erprobter kommerzieller CFD - Software (COSMOS FlowPlus und FloWorks), Computer Algebra System (MAPLE) und Berechnungs- und Visualisierungs - Software (ORIGIN - Professional), zurückgegriffen werden. Diese Vorgehensweise stellt eine Kombination zwischen CFD - Software und spezieller Software zur Lösung analytischer Aufgabenstellungen, ebenfalls vermittelt von Methoden der numerischen Mathematik, dar. Dabei wird noch kein vollständig automatisch ablaufender und durchgängiger Berechnungsgang erreicht. Gleichwohl war eine partielle Automatisierung des Rechengangs durch die Verwendung der in der betreffenden Software enthaltenen Import- und Exportfunktionen auf der Basis des *ASCII-file* - Formates möglich.

Die Verwendung der *spread-sheet* - Variante der *GFM* ist außerdem dann sinnvoll, wenn seitens des Anwenders die Ausbildung entweder einer Verdrängungsströmung, einer laminaren Strömung oder einer turbulente Strömung - beispielsweise nach dem $1/7$ Potenzgesetz - als eine ausreichende Näherung der tatsächlichen Strömungsverhältnisse im UV-Reaktor angesehen wird. Auf die Verwendung einer anspruchsvollen, zeitintensiven und auch kostenintensiven CFD - Software kann dann verzichtet werden. Allerdings sind für die Lösung der Integrale aus der

reaktoroptischen Komponente der *GFM* die numerische Möglichkeiten einer adäquaten Software (MAPLE, MATHEMATICA etc.) erforderlich.

In den bereits erwähnten Berechnungsbeispielen wurde sowohl auf die Hybrid-Variante als auch auf die *spread-sheet* - Variante unter Verwendung der aufgezählten Strömungsprofile, die im Fall der Annahme einer Schichtenströmung für Unterscheidungszwecken nachstehend auch als *klassische* Strömungsprofile bezeichnet werden, eingegangen.

5.1.1. Idealer Reaktor

Für numerischen Berechnungen ist es allgemein notwendig, die geometrischen Abmessungen des betreffenden UV-Reaktors zu definieren. Im Fall des idealen Reaktors {A-1-0}, vgl. Bild 3-15, erfolgte dies in enger Anlehnung an die Ergebnisse der Arbeiten ([20], [21], [22] [23]) und an die Klassifizierungsuntersuchungen, Kapitel 3. Die genaue Spezifizierung der Eigenschaften dieses UV-Reaktors befindet sich in der Anlage 3. In den Tabellen A5-2 und A5-3 der Anlage 5 sind die konstruktiven Eigenschaften des UV-Reaktors {A-1-0} den konstruktiven Eigenschaften anderer UV-Reaktoren gegenübergestellt, von denen einige ebenfalls auf der Basis der *Gekoppelten Fluidmechanischen Modelle* untersucht wurden.

Die Anwendung der Hybrid-Variante zur Berechnung der Bestrahlung H für den UV-Reaktor {A-1-0}, erforderte nachstehende prinzipielle Vorgehensweise:

1. Das virtuelle elektronische Modell des Reaktors {A-1-0} wird geschaffen und die Vernetzung des Fluidraumes ist vorzunehmen (GEOSTAR, Solid Works).
2. Die numerische Lösung des Systems der partiellen Differentialgleichung für das Strömungsproblem wird unter Verwendung des k - ϵ Turbulenz - Modells für eine *Newtonsche Flüssigkeit* veranlasst. Die Rechnungen erfolgen für den Fall des Vorliegens des Mediums Wasser bei Raumtemperatur, unter druckfreiem Abfluss (COSMOS, FlowPlus, FloWorks) und einer mittleren Anfangsgeschwindigkeit im Zufluss von $u=600$ mm/s, vgl. Anfangs- und Randbedingungen weiter unten.
3. Die Bewegung des Mikroorganismus wird über das *Particle - Tracing* durch das Kontrollvolumen nach Definition der Startpunkte im Zufluss des Reaktors berechnet. Dabei wird der Einfluss der Schwerkraft vernachlässigt, die Dichte des Mikroorganismus wird durch den Dichtewert des Wassers angenähert und eine Kugelgestalt angenommen. Nach Abschluss dieser Berechnungen wird der Datenexport für die Verwendung in ORIGIN - Professional und CAS MAPLE veranlasst.
4. Zur Kontrolle und Dokumentation erfolgt die Visualisierung der Resultate. Die Bahnabschnitte der Bewegung des Mikroorganismus S_{eff} im effektiven Bereich des Reaktors werden automatisch ausgewählt. Der effektive Bereich des UV-Reaktors ist über die effektive Länge L_{eff} und den Radius r_w des Reaktors {A-1-0} definiert. Der Datenexport für die optischen Berechnungen schließt sich an. Es erfolgt die Berechnung der Bahnkoordinaten $P_i(x,y,z)$, der resultierenden Geschwindigkeit und der Geschwindigkeitskomponenten. Die Bewertung der Bahnkurve des Mikroorganismus hinsichtlich der Stetigkeit mit der Datensatzmethode bzw. der Projektionsmethode gestattet die Auswahl

der Bahnanteile für die *reaktoroptischen* Berechnungen. Die Ergebnisse der Anwendung vorstehend genannter Methoden sind die Grundlage des Datenexportes für die numerische Berechnung der Bestrahlungsstärke.

5. Es erfolgt die numerische Berechnung der Bestrahlungsstärke E_{St} für die ausgewählten Mikroorganismus - Bahnpunkte im effektiven Strahlungsbereich (Mikroorganismus - Bahn bzw. Mikroorganismus - Bahnen) mit dem CAS MAPLE. Über die Gestaltung des MAPLE - *worksheets* wird der automatische Datenexport im ASCII Dateiformat für die Berechnung der Bestrahlung H veranlasst.
6. Die numerische Berechnung der Bestrahlung H , die Visualisierung der Ergebnisse und die Anfertigung einer Ergebnisstatistik mit ORIGIN - *Professional* schließen den Rechengang ab.
7. Die Parameter für das Medium wurden bei jeder Rechnung auf Wasser bei Normalbedingungen eingestellt (Dichte, dynamische Viskosität, Druck und Raumtemperatur; vgl. [120], [122], [123], [124], [132] bis [136]). Die Rechnungen erfolgten im Einheiten-System ([mm], [g], [s]).
8. Für Testzwecke wurden die Extinktionsmoduli $m_n = (0,011, 0,022, 0,044)$ [1/mm] nach experimentellen Erfahrungen ([20] bis [23]) und die Ortskoordinaten des Mikroorganismus willkürlich festgelegt, vgl. Bild 4-7 bis Bild 4-9.

Bei den Untersuchungen der *GFM* ohne CFD - Software (*spread-sheet*-Variante) wurde die Berechnungen nach Strömungsprofilen (Verdrängungsströmung, laminare Strömung, turbulente Strömung) orientiert durchgeführt. Dabei definierten die gewählten Durchsätze Q mittlere Strömungsgeschwindigkeiten u , die deutlich unterhalb, in der Nähe, oberhalb und deutlich oberhalb der sich für den UV-Reaktor ergebenden kritischen REYNOLDS - Zahl $Re_{krit} = 2320$ lagen; vgl. Anlage 5, Tabelle A5-1. Die Berechnung der REYNOLDS - Zahl Re wurde über die mittlere Strömungsgeschwindigkeit $u = v_m$, die kinematischen Viskosität ν und die hydraulisch wirksamen Länge L_{hy} vorgenommen; ([11], [120]). Für diese verschiedene Betriebsbedingungen, die durch die wahlfreie Festlegung des Strahlungsflusses auf $\Phi_{253,7} = 10W$ ergänzt wurden, erfolgte die Berechnung der Bestrahlung H , der Summe der Bestrahlungsstärke E_{St} entlang der Mikroorganismus - Bahn, der Bahnlänge S des Mikroorganismus, der effektive Bahnlänge S_{eff} , und der Expositionszeit t_{Ex} sowie eine statistischen Auswertung der gewonnen Daten.

Die Anwendung der Hybrid-Variante der *GFM* erfordert die elektronische Modell-Bildung für die fluidmechanischen Berechnungen. Da zwei Software -Pakete zur Anwendung kamen, wurden jeweils zwei ihrer Geometrie nach identische Modelle geschaffen, vgl. Bild 5-1 und Bild 5-2. Allerdings ist die Methodik der Vernetzung des Fluidraumes unterschiedlich. Während die einzelnen Aktionen in GEOSTAR und in FLOWPLUS detailliert beeinflusst werden können (Modellwahl, Elementewahl, Iterationen, Abbruchbedingungen, Konvergenzbedingungen), hat SolidWorks / FloWorks einen hohen Automatisierungsgrad erreicht. Das war nicht immer vorteilhaft hinsichtlich des Experimentierens mit den numerischen Lösungen. Im zuerst genannten Fall erwies sich die gezielt eingestellte diskontinuierliche Netzfeinheit kritischer Bereiche in der Volumenvernetzung als besonders vorteilhaft.

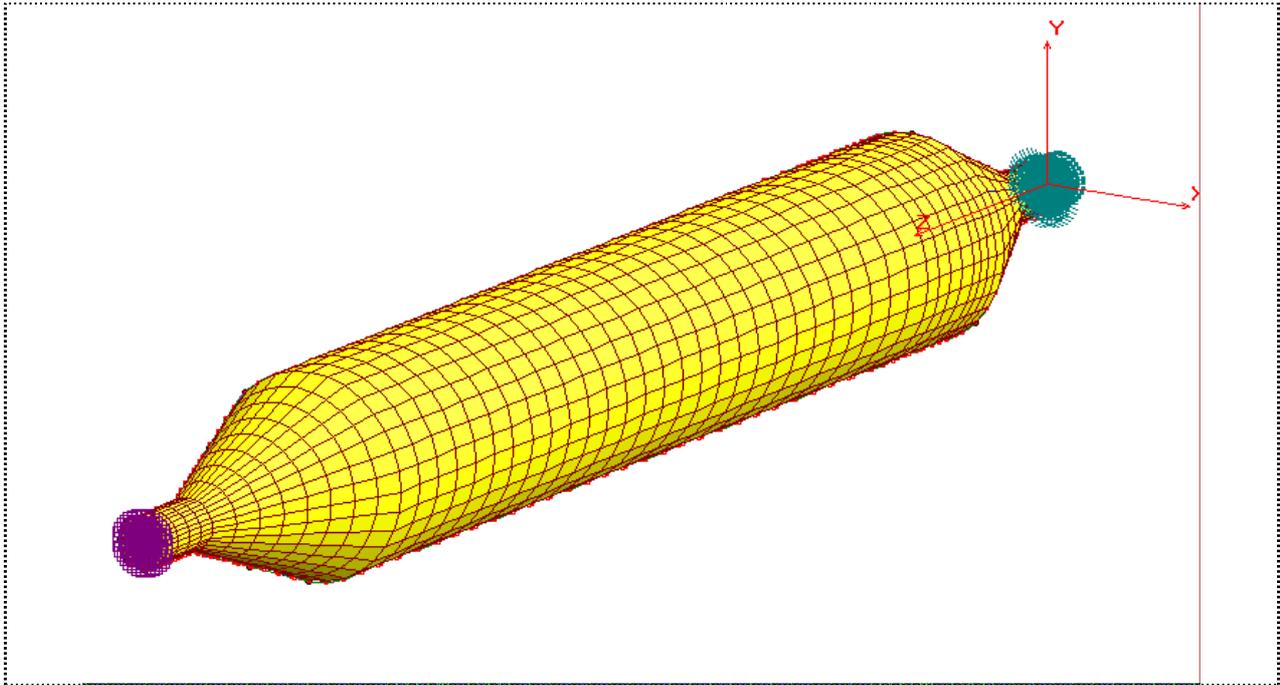


Bild 5-1: Elektronisches Modell des Reaktors {A-1-0} - GEOSTAR - FLOWPLUS-
Anfangsbedingungen am Zufluss (v_m) und Abfluss (p_0) symbolisch eingetragen.

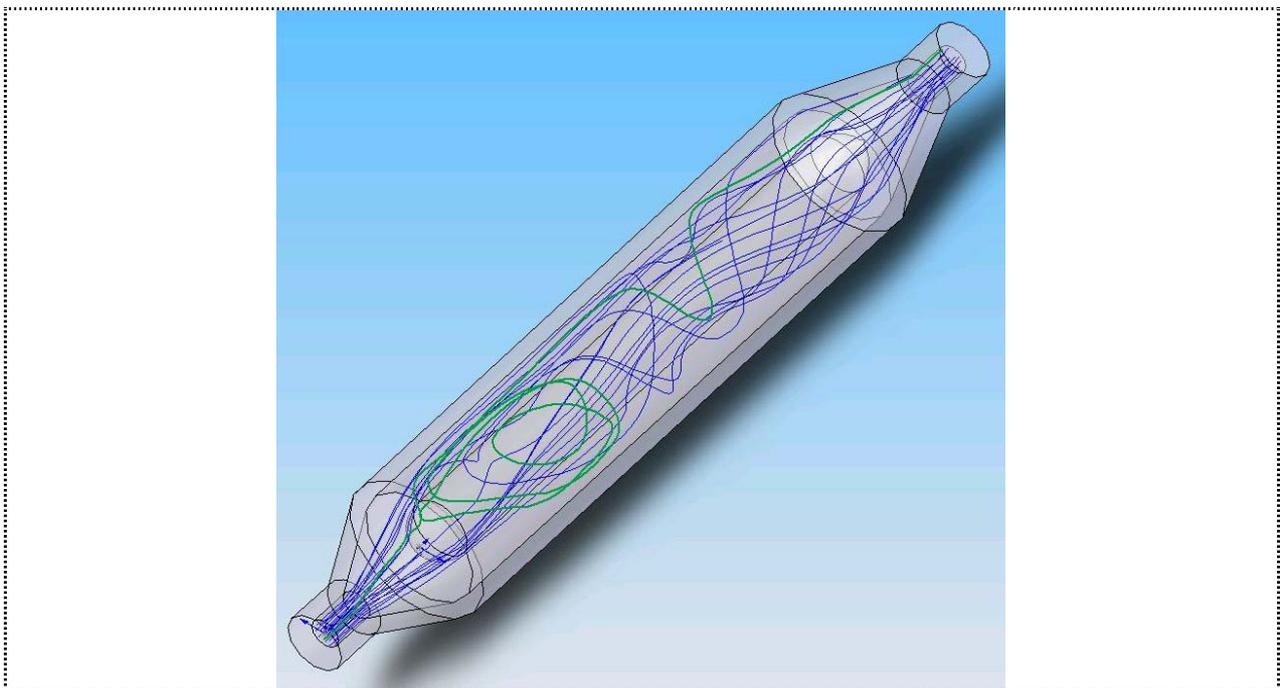


Bild 5-2: Elektronisches Modell des Reaktors {A-1-0} - SolidWorks - FloWorks
verschieden Bahnen des Mikroorganismus eingetragen

Für die Berechnung der Bahnkurve mit der Hybrid-Variante wurde eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit $u = 600$ mm/s im Zufluss bestimmt. Dieser Geschwindigkeitswert u entspricht einem Volumenstrom von $\dot{V} = 0,67824$ m³/h. Im Zufluss des Reaktors liegen dann nach Berechnung der REYNOLDS - Zahl für diesen Wert u turbulente Verhältnisse vor, die sich im Reaktorin-

nern verlieren. Eine derartige Strömungsberuhigung wird bei Modellrechnungen mit der Linienstrahlungsquelle oder nach der PSS-Methode unter Ansatz der Verdrängungsströmung, der laminaren Strömung und der turbulenten Strömung nicht erfaßt. Dieser Umstand demonstriert, dass schon aus solchen Grenzfall-Untersuchungen mit der Hybrid - Variante der Anwendung des *GFM* Vorteile hinsichtlich der Exaktheit bei der Bewertung von UV-Reaktoren erzielt werden. Das turbulente Strömungsmodell nach dem 1/7 - Potenzgesetz beschreibt Strömungsschichten, die parallel zur Mittellinie des Reaktors und damit parallel zur Achse der Plasma - Strahlungsquelle verlaufen. Die geradlinigen Parallelen lassen kleine Werte der Bestrahlung H erwarten, wenn die Bestrahlungsstärke E_{St} relativ klein (Nähe der Reaktorwand r_w) und die Strömungsgeschwindigkeit noch relativ groß ist (außerhalb der Haftbedingungen). Die kürzeste Mikroorganismus-Bahn nach Anwendung des *GFM* über die Hybrid-Variante sollte, wenn das komplexere Modell das primitivere einschließt, etwa gleiche bzw. stets größere Werte liefern. Dieser Beweis gelingt, wenn sich die Berechnungen nach den vorstehend genannten *klassischen* Profilen sukzessive dem Wert r_w des Reaktors nähern. Die Plausibilitätsbedingung

$$H_{Hybrid} \geq H_{klassisch,turbulent} \quad (5.1)$$

ist, wie die Berechnungsergebnisse belegen, somit immer erfüllt.

Es wurde eine als repräsentativ angesehenen Mikroorganismus-Bahn (c_23) des Reaktors {A-1-0} aus der Gesamtheit der Berechnungsergebnisse ausgewählt und grafisch dargestellt, Bild 5-3.

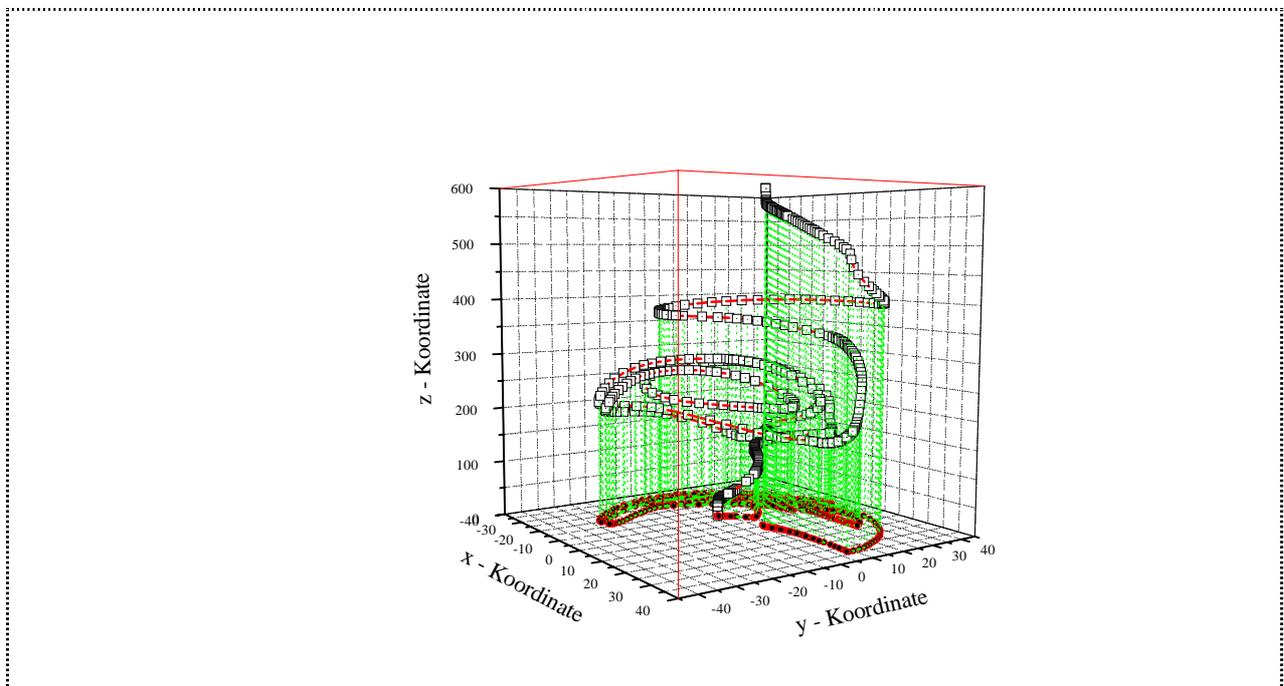


Bild 5-3: Bahnlinie c-23 des Mikroorganismus im Reaktor {A-1-0} - Auswahl

Durch die Anwendung der Definition der effektiven Länge L_{eff} des UV-Reaktors bzw. des effektiven Reaktorvolumens V_{eff} , welches sich aus der effektiven Länge L_{eff} und dem Reaktorradius r_w ergibt, auf den Datensatz der Bahn (c_23), wird der Anteil, welcher der Strahlung ausgesetzt ist

ausgewählt, Bild 5-4 und Anlage 6, Tabelle A6-1. Auf diese Weise lässt sich aus der Länge S der Mikroorganismus-Bahn die effektive Länge S_{eff} berechnen. Nur entlang der effektiven Länge erfährt der Mikroorganismus definitionsgemäß eine Bestrahlung H .

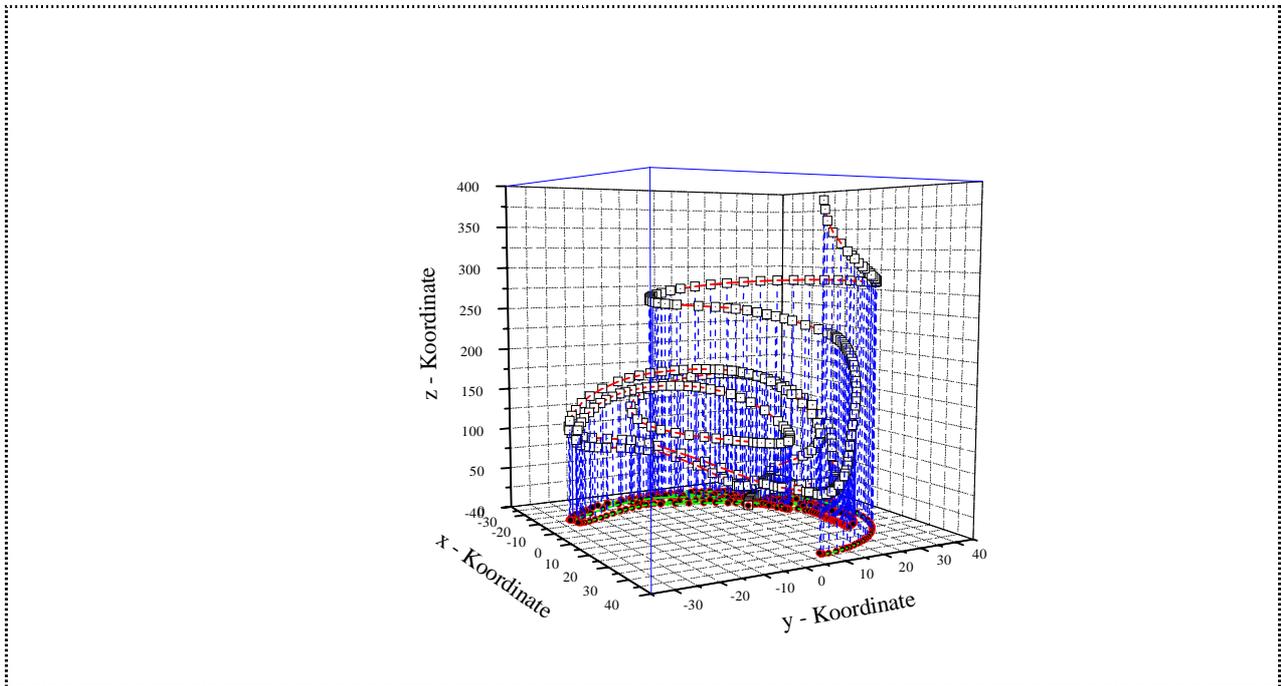


Bild 5-4: Bahnlinie c-23 des Mikroorganismus im effektiven Bereich des Reaktor {A-1-0}

Die Untersuchung der Mikroorganismus-Bahnen auf Stetigkeit (Kontinuität bzw. Sprünge) nach der der Projektions - Methode bzw. Datensatz - Methode visualisieren Bild 5-5 und Bild 5-6. Derartige Untersuchungen sind zwingend erforderlich, da die Mikroorganismus-Bahn, wie die Praxis zeigt, häufig auch in mehreren Teilstücken innerhalb des effektiven Volumens des UV-Reaktors liegen kann.

Liegt im vorstehenden Sinne eine Unstetigkeit bzw. Unstetigkeiten vor, so muß die Berechnung der Bestrahlungsstärke E_{St} und der Bestrahlung H für jedes Teilstück der effektiven Länge S_{eff} einzeln vorgenommen werden. Durch Summenbildung erhält man schließlich die Bestrahlung H des Mikroorganismus auf der ausgewählten Bahn.

Die Projektions-Methode untersucht die Projektion der Mikroorganismus-Bahn aus dem effektiven Volumen auf eine x - y -Fläche beim Wert $z = L_{eff} = 0$. Das Bild einer solchen Projektion verdeutlicht die Verhältnisse im UV-Reaktor und sollte für Diagnosezwecke prinzipiell herangezogen werden, vgl. Bild 5-5.

Die Anwendung der Datensatz-Methode erzielt ein gleichwertiges Resultat. Bei dieser Methode werden einer der Ortskoordinate (x -Koordinate oder y -Koordinate) die Datensatznummer gegenübergestellt. Die grafische Darstellung erlaubt die gleiche Einschätzung wie die Projektions - Methode. Das Bild 5-6 zeigt beispielgebend das Untersuchungsergebnis der Mikroorganismus - Bahn c_23 mit dieser Methode. In diesem Fall kann ebenfalls auf eine stetige Bahnkurve im Bereich des effektiven Volumens geschlossen werden. Die Berechnung der Bestrahlung H ist durchgängig möglich.

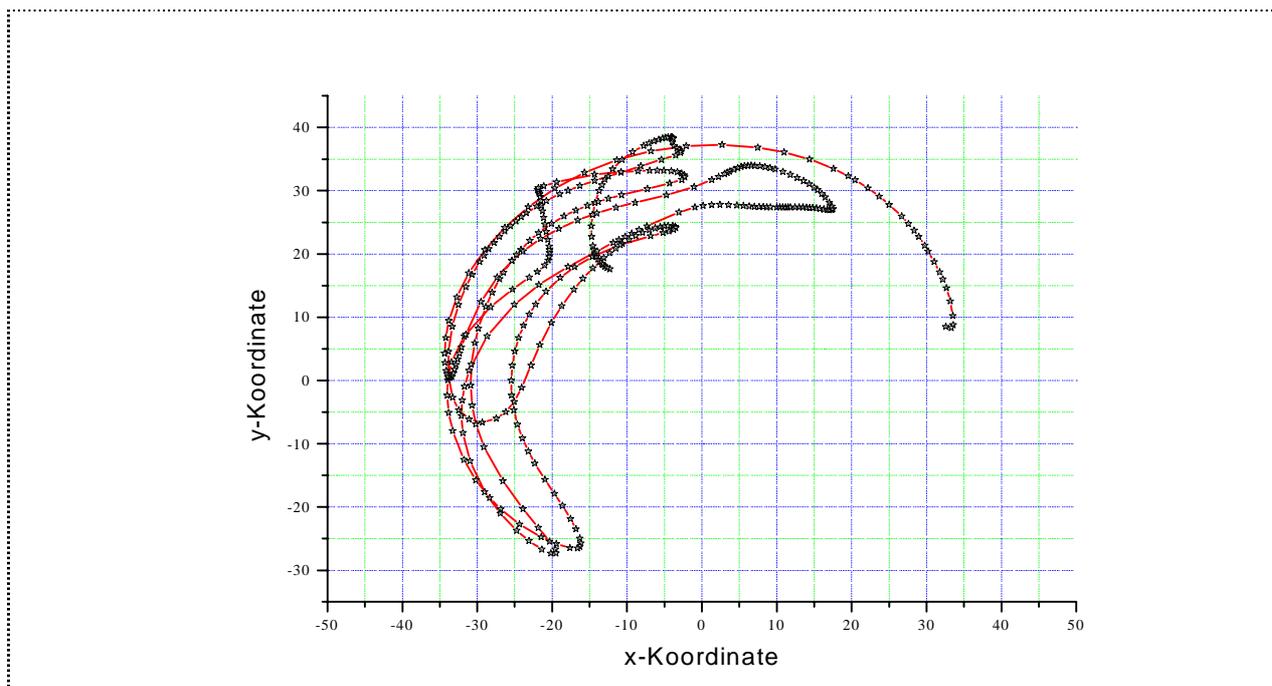


Bild 5-5: Untersuchung des Bereiches L_{eff} mit der Projektions-Methode, A-1-0_c-23

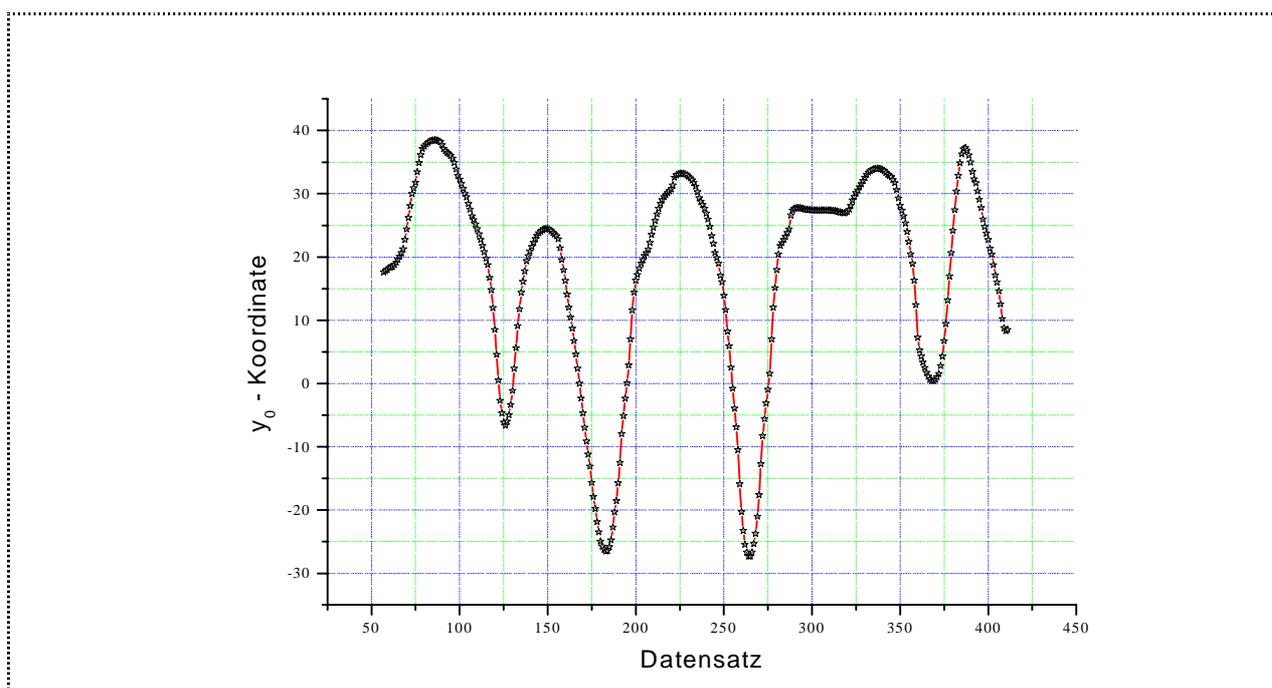


Bild 5-6: Untersuchung des Bereiches L_{eff} mit der Datensatz-Methode, A-1-0_c-23

Die Untersuchung auf Stetigkeit im vorstehenden Sinne ist allgemein dann vorzunehmen, wenn die Resultate der fluidmechanischen Berechnungen vorliegen. Während der Arbeit erwiesen sich die Projektions-Methode und die Datensatz-Methode als ein gleichwertiges und zuverlässiges Hilfsmittel.

Weitere vergleichende Untersuchungen an verschiedenen Mikroorganismusbahnen ergaben, dass die Neigung zu Unstetigkeiten tendenziell zunimmt, wenn die Bahnanfangspunkte außerhalb des Mittelpunkts der Querschnittsfläche des Zuflusses gewählt werden, vgl. Bild 5-7.

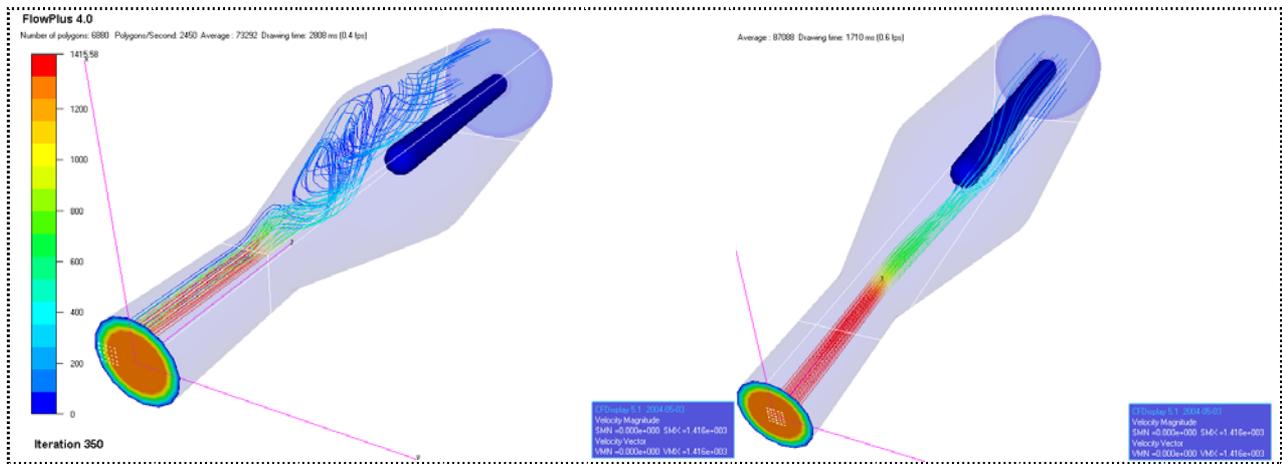


Bild 5-7: Wirbelbildung und Steitigkeit im Zufluss-Bereich des UV-Reaktors {A-1-0}

Obwohl sich im UV-Reaktor {A-1-0} Strömungsrichtungen des Transportfluids entgegen der Hauptströmungsrichtung ausbilden (Wirbelbildung), bleiben diese auf Grund der prinzipiellen Konstruktion dieses Reaktors oft im Bereich seines effektiven Volumens. Da diese Wirbel in relativer Entfernung von der Oberfläche der Strahlungsquelle auftreten, ist dieser Effekt vorteilhaft hinsichtlich der Bestrahlung. Die auf Grund der größeren Entfernung geringer ausfallenden Bestrahlungsstärke E_{St} wird durch eine längere Expositionszeit t_{Ex} ausgeglichen. Wie weiter unten gezeigt wird, ist dieser Effekt im Fall eines UV-Reaktors ({A-1-7} und {A-1-7}b) nachteilig, da bei diesen Konstruktionen Mikroorganismus-Bahnen auftreten, die im erheblichen Maße außerhalb des effektiven Volumens V_{eff} liegen.

Die Anwendung der *GFM* in der Form der *spread-sheet*-Variante liefert Ergebnisse auf der Basis der *klassischen* Strömungsprofile (Verdrängungsströmung, laminare Strömung, turbulente Strömung), welche die Tabellen A6-4 und A6-8 in der Anlage 6 enthalten. Die Resultate die mit der Hybrid-Variante und der *spread-sheet*-Variante der *GFM* erzielt wurden, sind nicht *ad hoc* miteinander vergleichbar, obwohl diese unter der Annahme eines gleichen Volumenstroms bzw. eines gleichen Durchsatzes, der eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von $v_m = 600$ mm/s im Zufluss zur Folge hat, berechnet wurden. Der qualitative Unterschied ergibt sich prinzipiell aus den als eine Näherung angesetzten Strömungsprofilen, der Verdrängungsströmung, der laminaren Strömung, der turbulenten Strömung, bei denen es sich immer um eine parallele Schichtenströmung handelt. Aus pragmatischen Gründen wurden diese Schichtenströmungen der *klassischen* Strömungsprofile in 2mm - Abchnitte für die betreffenden Rektorkonstruktionen eingeteilt und berechnet, vgl. weiter unten. Durch sukzessive Variationen des Ortes der Schichtenströmung im Wandnahbereich, während der numerischen Untersuchungen der Verhältnisse, konnte außerdem die Gültigkeit der Relation (5.1) bestätigt werden.

5.1.2. Praxis - Reaktor

Kapitel 3 der Arbeit und die Anlage 3 zeigen, dass in der Praxis eine Vielzahl von UV-Reaktor-konstruktionen existieren. Die Anwendung der *Gekoppelten Fluidmechanischen Modelle* auf diese würde den Rahmen der Arbeit sprengen. Die Systematik der UV-Reaktoren ist maßunabhängig, so dass in den einzelnen Klassen immer die konstruktiven Auslegungen für die numerischen Berechnungen zu berücksichtigen sind. Aus pragmatischen Gründen wird sich deshalb auf einen Anwendungsfall und seine Variation bezogen. Der UV-Reaktor {A-1-7} ist die in der Praxis am häufigsten anzutreffende Reaktorkonstruktion, vgl. Abschnitt 3.3., Tabelle 3-6, Bild 3-17 und Anlage 3. Wie im Fall des Reaktors {A-1-0} kam auch hier in der numerischen Simulation sowohl die Hybrid-Variante des *GFM* als auch die *spread-sheet*-Variante, mit ihrer sich auf die Strömungsprofile (Verdrängungsströmung, laminare Strömung, turbulente Strömung) beziehenden Methodik, zur Anwendung. Bei der Schaffung der elektronischen Modelle wurden die Abmessungen eines realen in der Praxis existierenden UV-Reaktors übernommen. Es handelt sich um den Reaktor UVK-1, der Ueberall Umweltschutz GmbH, welcher exakt einem UV-Reaktor {A-1-7} entspricht, vgl. Anlage 3 Herstellerangaben. Weitere Einzelheiten dazu enthalten die Tabellen A5-3 in der Anlage 5. Die für die Simulationsrechnungen notwendigen elektronischen Modelle zeigen das Bild 5-8 und das Bild 5-9.

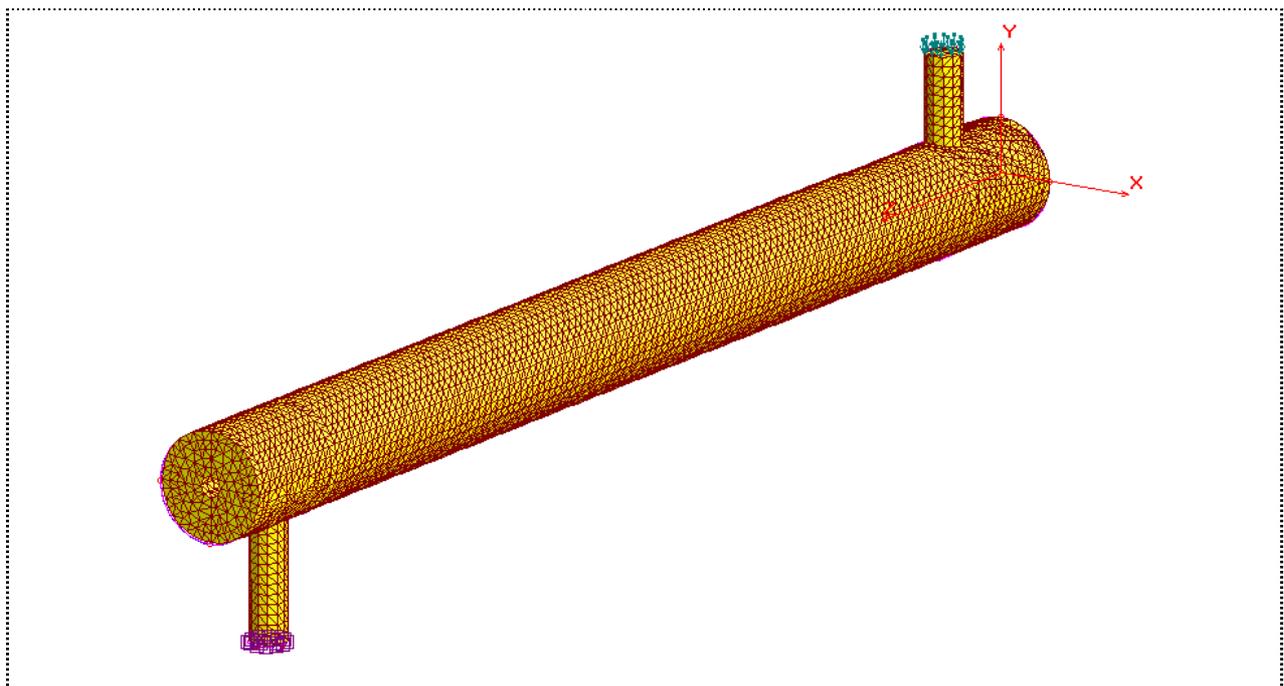


Bild 5-8: Elektronisches Modell des Reaktors {A-1-7} - GEOSTAR - FLOWPLUS- Anfangsbedingungen am Zufluss (v_m) und Abfluss (p_0) symbolisch eingetragen.

Um einen weiteren Testreaktor der Klassifikation {A-1-7} zu erhalten und um die Auswirkungen der Änderung eines einzigen konstruktiven Details zu studieren und zu dokumentieren, wurde der Radius des UV-Reaktors von $r_w = 38\text{mm}$ auf $r_w = 76\text{mm}$ verdoppelt. Dieser zusätzliche Reaktor erhielt die Bezeichnung {A-1-7}b. Durch die zusätzliche Kennzeichnung -b- außerhalb der

geschweiften Klammer wird ein Konflikt mit der Klassifizierung vermieden. Das elektronische Modell dieses Reaktors zeigt das Bild 5-10.

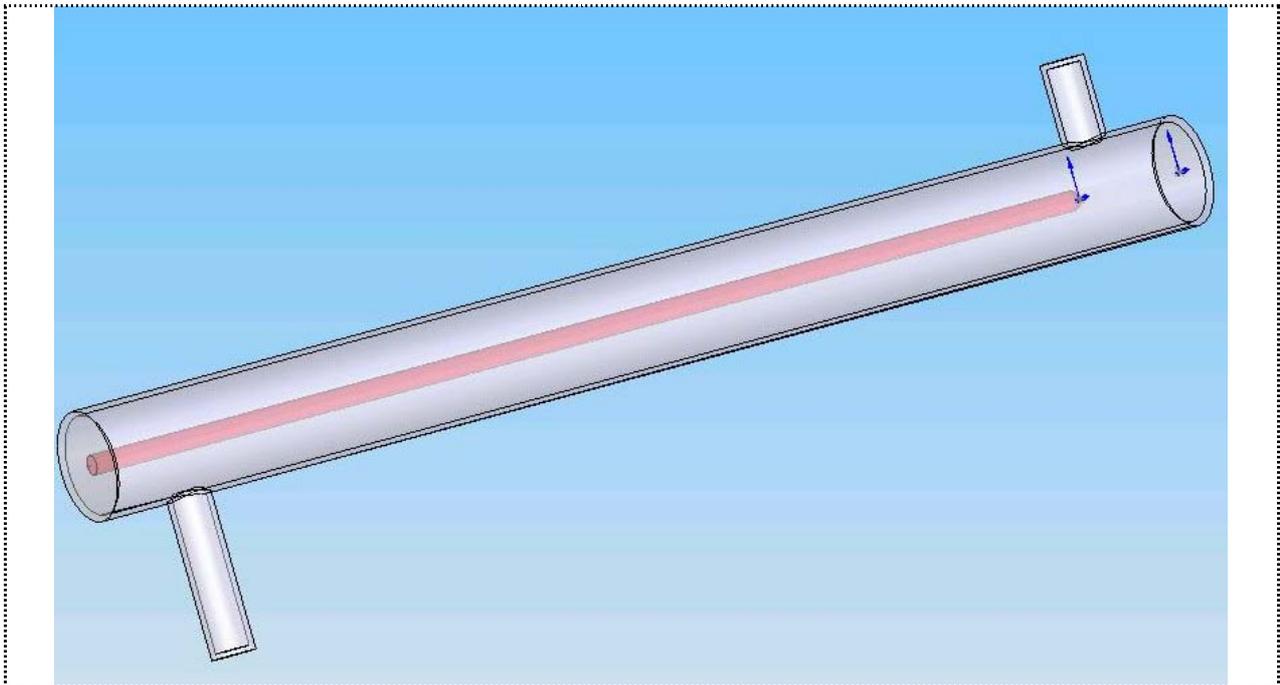


Bild 5-9: Elektronisches Modell des Reaktors {A-1-7} - SolidWorks - FloWorks

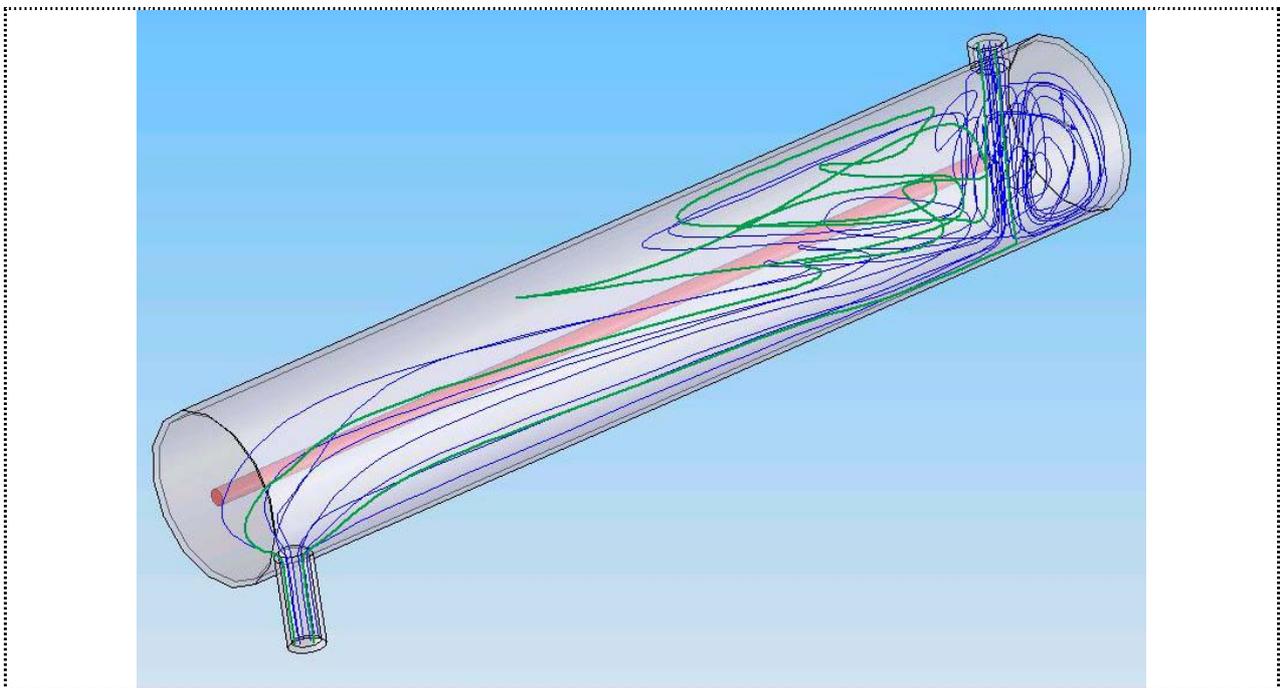


Bild 5-10: Elektronisches Modell des Reaktors {A-1-7}b - SolidWorks - FloWorks, verschieden Bahnen des Mikroorganismus eingetragen

Alle für die numerische Simulation wesentlichen Abmessungen des Reaktors {A-1-7}b sind ebenfalls in der Anlage 5, Tabellen A5-3 zusammengestellt. Die Vernetzung der Modelle erfolgte mit verschiedenen Methoden. In GEOSTAR (für FlowPlus) wurde das Polyhedra -Verfah-

ren und in SolidWorks (für FloWorks) der Automatik - Modus verwendet. Die Erzeugung des Fluidraumes über die Volumen-Methode schlug in GEOSTAR fehl, da die Volumensektionen nur unvollständig aneinander angepaßt werden konnten. Erfolgreich war dagegen die Erzeugung einer virtuellen Reaktoroberfläche, die den Fluidraum umschloß und welche schließlich die Grundlage für die Vernetzung im Polyhedra-Verfahren bildete. Die numerischen Simulationsrechnungen folgten exakt dem Rechengang, der bereits für den UV-Reaktor {A-1-0} angewendet wurde, vgl. Unterabschnitt 5.1.1., Positionen 1. bis 7.. Der Punkt 8. der genannten Aufzählung wurde hier jedoch nicht ausgeführt, da die gleichen qualitativen Ergebnisse auch für diesen Berechnungsfall erwartet werden. Für die fluidmechanischen und reaktor-optischen Berechnungen kamen jeweils ein Strahlungsfluss von $\Phi_{253,7}=14W$ und ein Volumenstrom $V = 2,522 \text{ m}^3/h$ in Anlehnung an die Firmenunterlagen, zum Ansatz. Der Volumenstrom entspricht einer mittleren Anfangsgeschwindigkeit von $v_m = 1400\text{mm/s}$ im Zufluss. Nach den Werten der Tabelle A5-1 in Anlage 5, die auf die bereits beschriebene Art und Weise berechnet wurden, liegen für diese Anfangsgeschwindigkeit im gesamten Fluidraum turbulente Verhältnisse vor, da die kritische REYNOLDS - Zahl Re_{kr} im Zufluss, im effektiven Volumen und im Abfluss sicher überschritten ist. Die Bestrahlung H , die Bestrahlungsstärke E_{St} , die Länge S der Mikroorganismus-Bahn, die effektive Bahnlänge S_{eff} , und die Expositionszeit t_{Ex} wurden berechnet, zusammengefasst und einer statistischen Auswertung unterzogen, vgl. Anlage 6, Tabelle (A6-2, A6-5, A6-6). Für die Diskussion der Ergebnisse wurden hier solche Mikroorganismus-Bahnen ausgewählt, die gleichermaßen für die Verhältnisse im betreffenden Reaktor repräsentativ als auch für die Demonstration bestimmter Effekte als interessant anzusehen sind. Die Darstellung der Mikroorganismus-Bahn c_49ad, UV-Reaktor {A-1-7}, lässt vermuten, dass die Berechnung der Bestrahlung H in Teilstücken zu erfolgen hat, vgl. Bild 5-11.

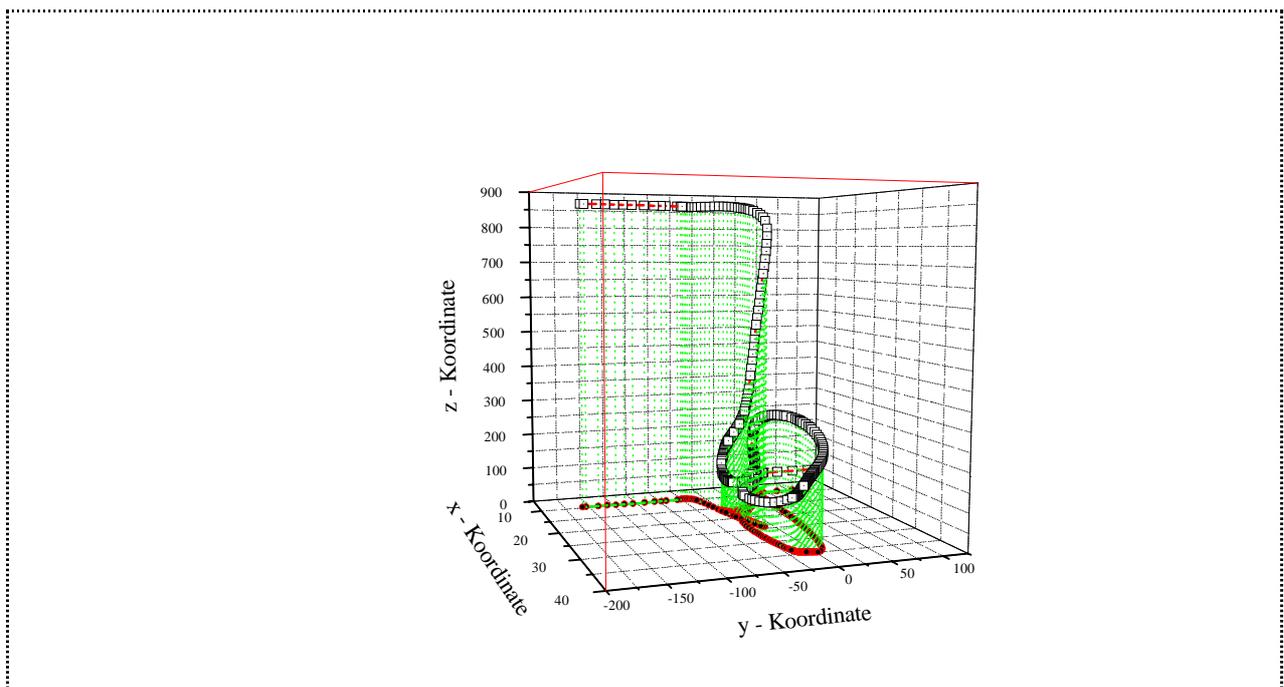


Bild 5-11: Bahnlinie c-49ad des Mikroorganismus im Reaktor {A-1-7} - Auswahl

Reduziert man die Darstellung durch die Auswahl der betreffenden Datensätze aus dem Bereich der effektiven Länge L_{eff} des UV-Reaktors, werden Teilstücke sichtbar. Die effektive Mikroorganismus-Bahn S_{eff} setzt sich in diesem Beispiel aus Bahnanteilen zusammen, die sowohl im Bereich der effektiven Länge L_{eff} des UV-Reaktors als auch innerhalb des durch den Radius r_w definierten Bereiches liegen. Durch die Festlegung des effektiven Volumens V_{eff} über die Konstruktionsparameter effektive Länge L_{eff} und Reaktorradius r_w werden auch diejenigen Bahnanteile abgeschnitten die im Zufluss oder Abfluss des UV-Reaktors liegen und nicht mehr der UV-Strahlung ausgesetzt sind, vgl. Bilder (5-11, 5-12).

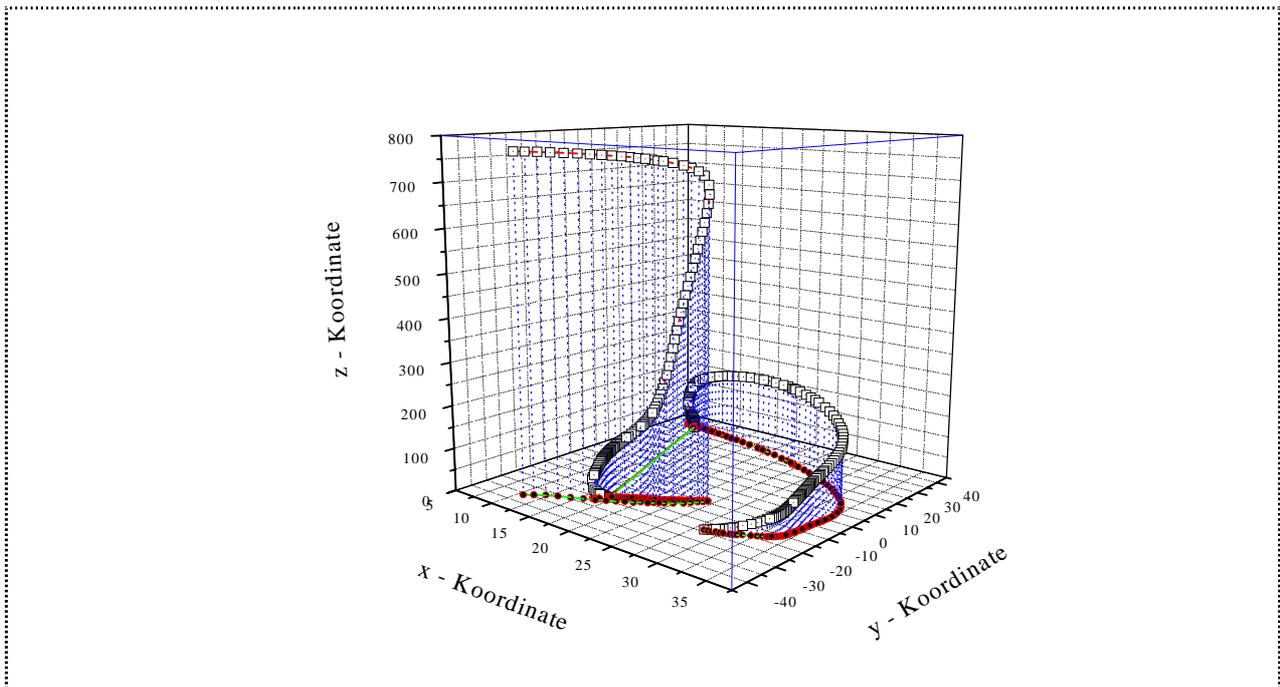


Bild 5-12: Bahnlinie c-49ad des Mikroorganismus im Reaktor {A-1-7} - Bereich L_{eff}

Eine weitere Möglichkeit, die einzelnen effektiven Längen S_{eff} bzw. Bahnabschnitte der Mikroorganismen zu erfassen, bietet eine Stetigkeits-Untersuchung, die entweder nach der Projektions-Methode oder nach der Datensatz-Methode durchgeführt wird, vgl. Bild 5-14 und UV-Reaktor {A-1-0}. Auch hier besteht der Zweck darin, diejenigen Bahnabschnitte der Mikroorganismen S_{eff} (automatisch) über diagnostizierte Kurven-Sprünge auszuwählen, die sich im Bereich des effektiven Volumens V_{eff} befinden. Für diese Stetigkeits - Untersuchung haben sich wie bereits erwähnt sowohl die Datensatz - Methode als auch die Projektions - Methode als geeignet und gleichwertig erwiesen.

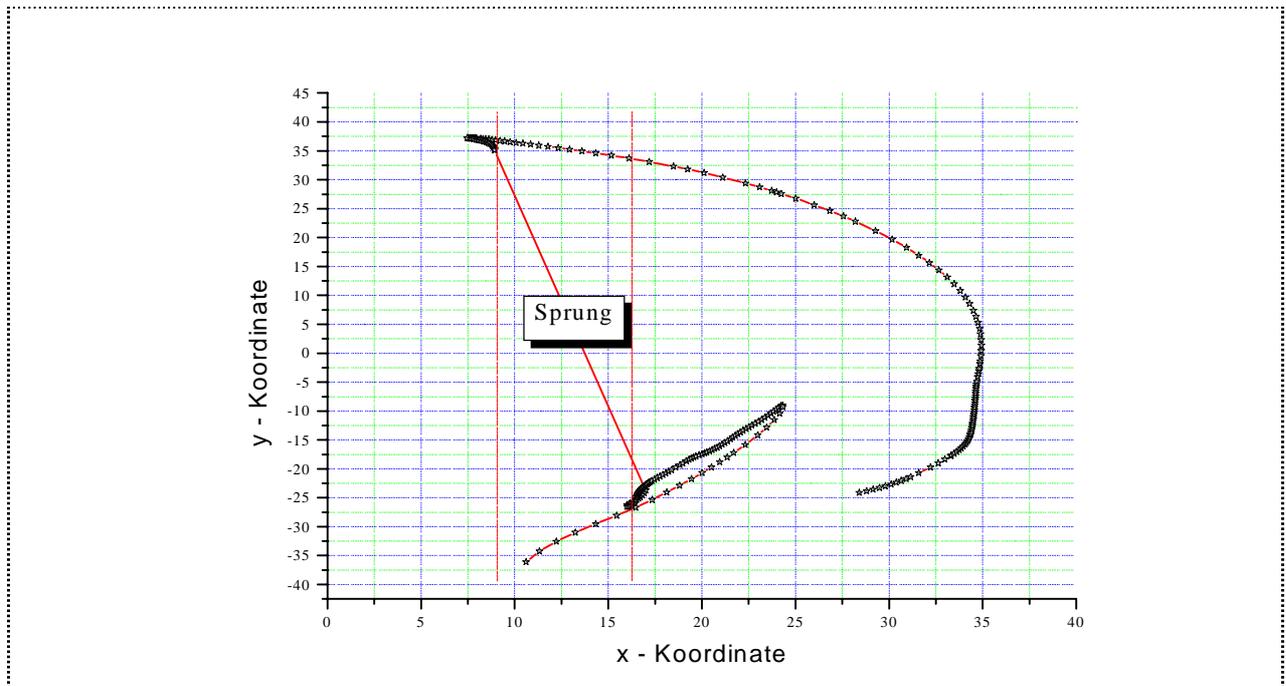


Bild 5-13: Kontinuität der Bahnlinie c-49ad des Mikroorganismus im Reaktor {A-1-7} - Projektions-Methode

Ein Vergleich der Mikroorganismus-Bahnen c-1 und c-3 aus den Berechnungen zu den UV-Reaktor {A-1-7}b soll die Bedeutung der Methoden zur Einschätzung der betreffenden Reaktorkonstruktion als ein weiteres Anwendungsbeispiel demonstrieren. Bei nur geringem Unterschied in der Gesamtlänge S der Mikroorganismus-Bahnen können sich die effektiven Längen S_{eff} wesentlich unterscheiden, vgl. Bild 5-14 und Bild 5-15.

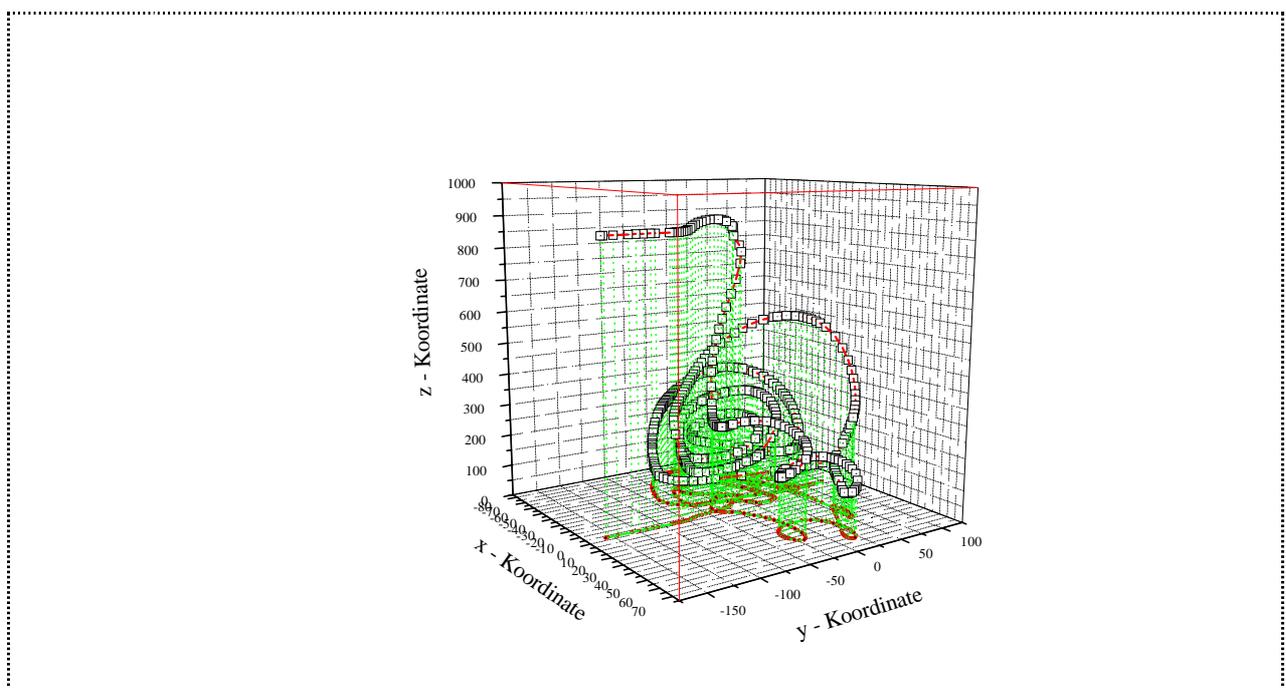


Bild 5-14: Bahnlinie c-1 des Mikroorganismus im Reaktor {A-1-7}b - Auswahl

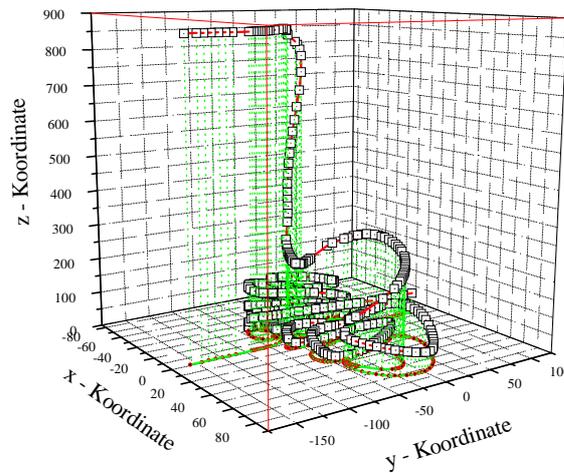


Bild 5-15: Bahnlinie c-3 des Mikroorganismus im Reaktor {A-1-7}b - Auswahl

Die Länge der Mikroorganismus-Bahn c-1, Bild 5-14, beträgt $S = 3781\text{mm}$ und die Länge der Mikroorganismus-Bahn c-3, Bild 5-15, beträgt $S = 3415\text{mm}$. Abgesehen von dem Unterschied in der Länge S befinden sich im ersten Fall 93% der Bahnlänge im effektiven Bereich des UV-Reaktors, $S_{\text{eff}} = 3518\text{ mm}$, während es im zweiten Fall, $S_{\text{eff}} = 1163\text{ mm}$, lediglich 34% sind. Ein Blick auf die Steigkeitsuntersuchung der betrachteten Bahnen macht dies sofort deutlich, vgl. Bild 5-16 und 5-17.

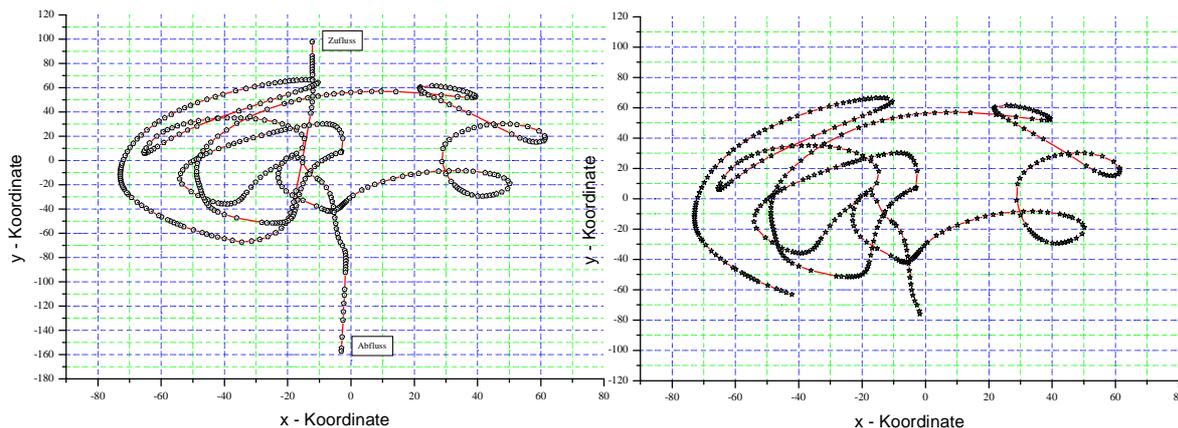


Bild 5-16: Stetigkeit Bahnlinie c-1 des Mikroorganismus im Reaktor {A-1-7}b - Auswahl

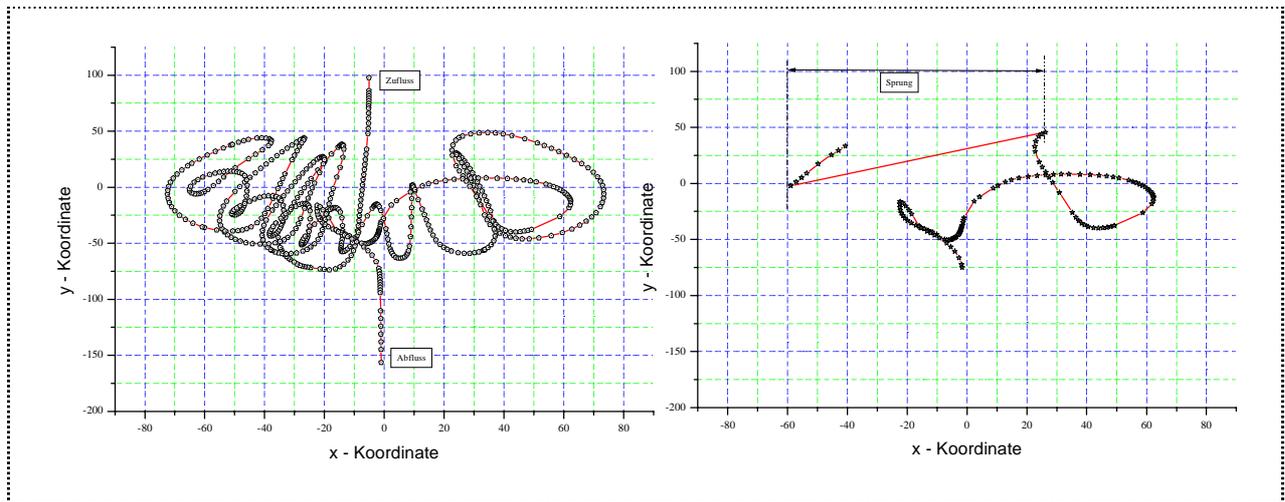


Bild 5-17: Stetigkeit Bahnlinie c-3 des Mikroorganismus im Reaktor {A-1-7}b - Auswahl

Nun kann sich der betreffende Mikroorganismus mit großer bzw. mit kleiner Bahngeschwindigkeit bewegen. Dadurch wird die Expositionszeit t_{Ex} im effektiven Volumen des UV-Reaktors festgelegt. Im betrachteten Fall beträgt diese $t_{Ex} = 59s$ bzw. $t_{Ex} = 15s$ d.h. 99% bzw. 49% der jeweiligen Gesamtaufenthaltszeit im UV-Reaktor {A-1-7}b. Die Bestrahlung H des betreffenden Organismus ist mit 176 mJ/cm^2 sehr hoch und mit 29 mJ/cm^2 relativ gering, vgl. Anlage 6. Die Ursachen für dieses Phänomen ist in den UV-Reaktorkonstruktionen selbst zu finden. In solchen Fällen gestattet die Gestaltung des Reaktorgrundkörpers unterhalb des Zuflusses und auch oberhalb des Abflusses die Ausbildung einer Strömung die gegen die Hauptströmungsrichtung ausgerichtet ist. Das berechnete Geschwindigkeitsprofil dieser Reaktorkonstruktion bestätigt die Ausbildung eines solchen Strömungsgebietes, in welchem die Mikroorganismen grundsätzlich eine geringe bzw. keine Bestrahlung erfahren. Das Bild 5-18 zeigt das Strömungsbild der resultierenden Mediengeschwindigkeit in diesem Gebiet für den Simulationsfall eines angenommenen Durchsatzes von $Q = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

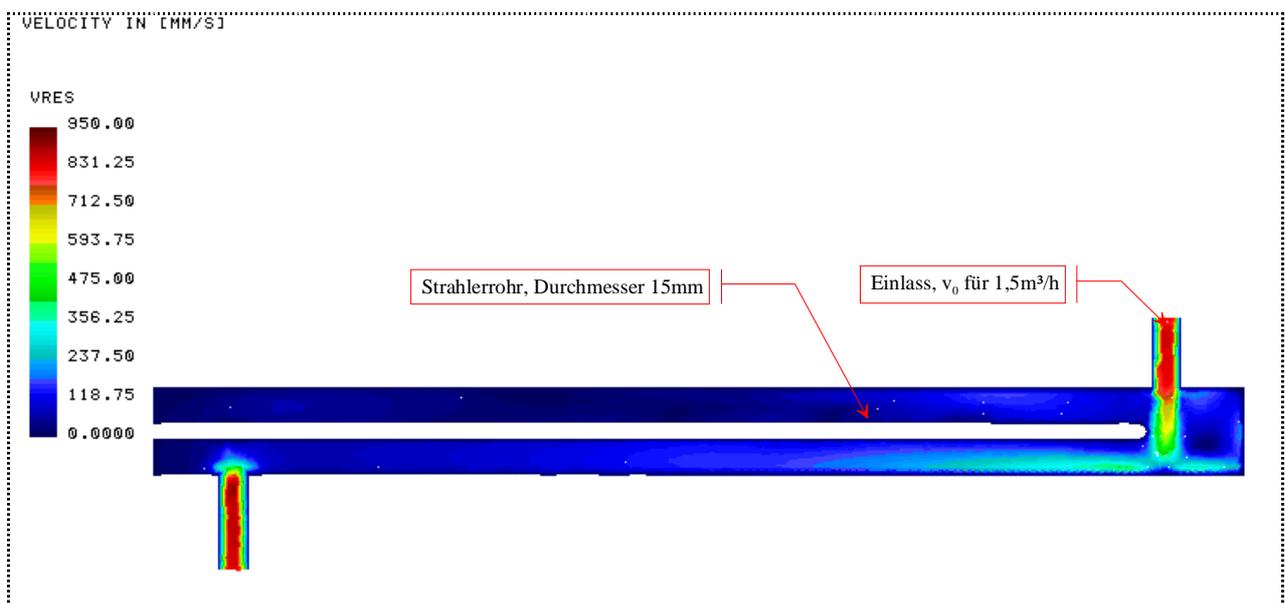


Bild 5-18: Medium-Geschwindigkeit in UV-Reaktoren Klassifikation {A-1-7}

Die *spread-sheet*-Variante der *GFM* für die Berechnung der Bestrahlung H wurde unter den bekannten Voraussetzungen (Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit im Zufluss, Strömungsprofile, Strahlungsfluss etc.) auch auf den Simulationsfall des UV-Reaktor {A-1-7} mit dem Radius $r_w = 38\text{mm}$ und auf den Simulationsfall des UV-Reaktor {A-1-7}b mit dem Radius $r_w = 76\text{mm}$ angewendet. Die Ergebnisse enthalten in der Anlage 6 die Tabelle A6-6 und die Tabelle A6-8. Die Plausibilitätsbedingung (5.1) ist auch hier in jedem Fall erfüllt.

Es erwies sich als zweckmäßig, die Rechenzeiten und den benötigten Arbeitsspeicher während der numerischen Simulationen zu protokollieren. Die Durchrechnung des fluidmechanischen Modells des jeweiligen Reaktors {A-1-0} und der Varianten {A-1-7} lag in der Größenordnung von 1 bis 4 Stunden. Die benötigten Rechenzeiten für den reaktoroptischen Teil des *Gekoppelten Fluidmechanischen Modells* waren wesentlich größer. Um vernünftige CPU - Zeiten zu erreichen, war es notwendig die Mikroorganismusbahnen in mehrere Teilstück zu zerlegen und diese zu berechnen. Aus der Literatur ist bekannt, dass ein FORTRAN - Programm für die gleichen Rechenaufgaben wesentlich schneller ist und die CPU Zeiten etwa das 0,01 bis 0,001 -fache des Zeitaufwandes eines CAS auf dem gleichen PC betragen; vergleiche HECK [173]. Somit dürfte eine Software-Variante für diesen rechenintensiven Teil eine Zeitspanne von ca. 10 Minuten pro Bahn benötigen. Weiterhin wurde beobachtet, dass bei Rechnungen für geringe Abstände von der Oberfläche der Strahlungsquelle extrem lange CPU-Zeiten auftraten und mitunter aus Zeiteffizienz-Gründen die Berechnung abgebrochen werden musste. Ursache für diese CPU-Zeiten waren Rundungseffekte, die durch die Erweiterung der Stellen nach dem Komma, von 16 etwa auf 20 oder mehr Stellen, behoben werden konnten. Bei den Berechnungen mit der *spread-sheet*-Variante erwies sich eine Variation des Berechnungsortes um einen kleinen Betrag (0,01mm-Bereich) als vorteilhaft für die Problemlösung. Für Abständen $> 4\text{mm}$ von der Oberfläche der Strahlungsquelle traten keinerlei Probleme mit dem CAS auf. Bei den Berechnungen mit der CFD - Software wurden über den Konvergenz-Monitor die Konvergenzbedingungen von Fall zu Fall reguliert, um einen effizienten Rechengang zu gewähren. Die CPU- Zeit wurde dann im bereits beschriebenen Zeitintervall gehalten.

Die Untersuchung des Einflusses der Größe der Mikroorganismen auf die Simulationsergebnisse ergab, dass bei einer Partikelgröße $< 0,01\text{mm}$ keine Unterschiede zwischen den Simulationsergebnissen der Mikroorganismus-Bahnen festgestellt werden können. Dieses Verhalten wurde auch bei den Berechnungen für den UV-Reaktor {A-1-7} und UV-Reaktor {A-1-7}b bestätigt. Eine Annahme der Organismengröße von $1\mu\text{m}$ in Anlehnung an die Werte aus der Mikrobiologie nach Tabelle 3-4 in Kapitel 3 stellt eine ausreichende Näherung dar und kann im Grunde genommen für alle Simulationsrechnungen verwendet werden. Eine Unterscheidung nach der Speziesgröße ist somit nicht notwendig, da diese bereits - *von Natur aus* - hinreichend klein sind, vgl. Bild 5-19. Unterschiede ergaben sich definitionsgemäß nur noch zu den Stromlinien.

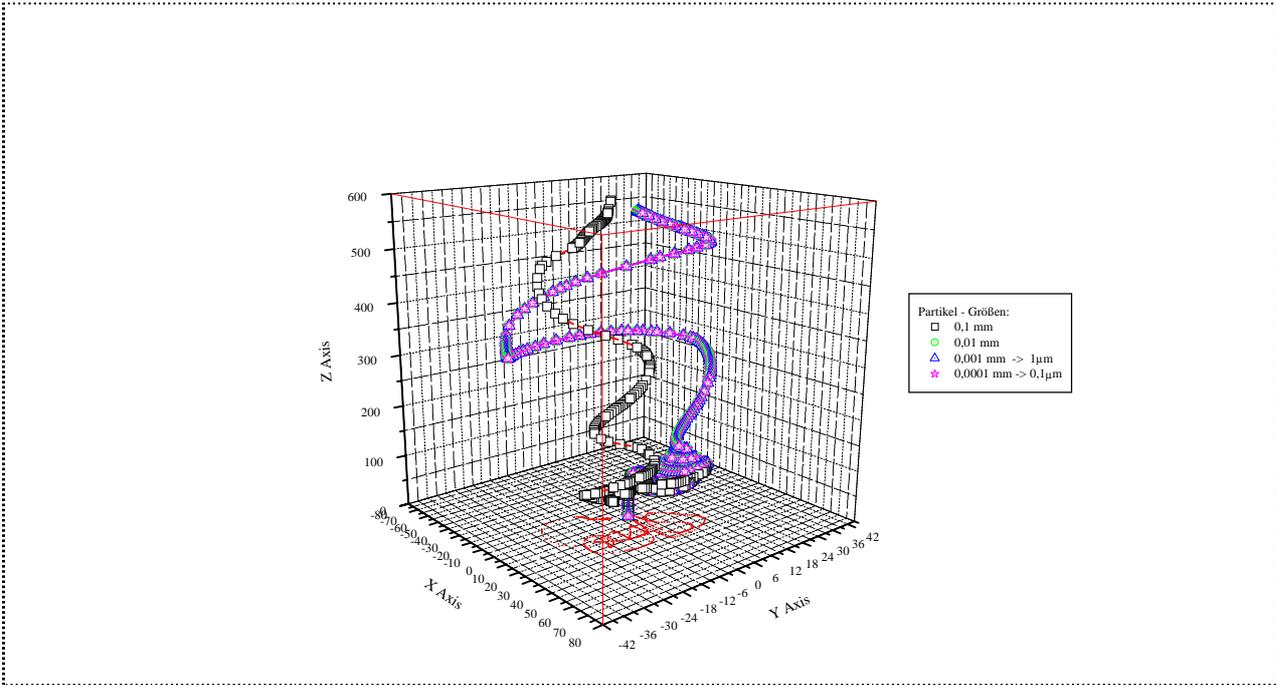


Bild 5-19: Einfluss der Partikelgröße auf das Simulationsergebnis; 0,1 bis 0,000 1 mm

5.3. Vergleich der Methoden - *GFM*, *PSS* - Methode und Linienstrahlungsquelle

In der Arbeit wird die physikalische Herleitung der drei häufigsten Ansätze, mit welchen die Strahlungsverhältnisse in einem UV-Reaktor modellierbar sind, nachvollzogen. Die im UV-Reaktor befindliche Plasmastrahlungsquelle mit der Geometrie eines geraden Kreiszyinders wird dabei jeweils näherungsweise als eine unendlich lange Linienstrahlungsquelle aufgefasst. Es handelt sich hierbei um die Ansätze nach Gleichung (3.20), Gleichung (3.22) und Gleichung (3.35), vgl. Unterabschnitt 3.2.1. und Unterabschnitt 3.2.2. Die *PSS*-Methode weicht von vorstehenden Ansätzen ab, indem hier die Linienstrahlungsquelle mit einer definierten Länge durch eine willkürlich wählbare Anzahl von Punktstrahlungsquellen angenähert wird und Strahlungsanteile von außerhalb der Aufenthaltsebene des Mikroorganismus bzw. der Elementarzelle bei der Berechnung der Bestrahlungsstärke E_{St} und der Bestrahlung H berücksichtigt werden. Die *Gekoppelten Fluidmechanischen Modelle* schließen in ihrem reaktoroptischen Teil die Geometrie und die tatsächlich Ausdehnung der Strahlungsquelle ein. Dabei muss nicht zwingend die Geometrie eines geraden Kreiszyinders vorliegen. Die Berechnung beliebiger, beispielsweise fluidmechanisch günstige Strahlergeometrien (gerader Zylinder mit elliptischen Querschnitt, gerader Zylinder mit analytisch gegebenen Querschnitt u.a.) sind mit den *GFM* möglich. Da bei der Anwendung der *GFM* die Ortskoordinaten der Mikroorganismus-Bahn und die dazu gehörenden Geschwindigkeitskomponenten bestimmt sind, können auf diese Größen auch die vier vorstehend aufgezählten Modellansätze angewendet werden. Beispielgebend wurde dieses Vorgehensweise auf ausgewählte Mikroorganismus-Bahnen für die UV-Reaktoren {A-1-0}, {A-1-7} und {A-1-7}b praktiziert und die Ergebnisse in die Tabelle 5-1 eingetragen.

Tabelle 5-1: Werte-Vergleich; Anwendung auf Bahnen eines Mikroorganismus

Datensatz	Zylinderwellen-Modelle			PSS - Methode	GFM - Anwendung
	Gleichung (3.35)	Gleichung (3.20)	Gleichung (3.22)		
H-Werte [mJ/cm ²]					
{A-1-0} c-23	224,833	348,922	135,961	396,919	1590,595
{A-1-7} c-46ad	51,352	60,564	34,072	76,529	43,369
{A-1-7}b c-01	203,516	240,026	154,565	266,731	176,982

Die Abweichungen der Werte der Bestrahlung H in dieser Tabelle sind auf die verschiedenen Vereinbarungen und Verallgemeinerungen zurückzuführen, die für die Ableitungen der entsprechenden Gleichungen getroffen wurden. Außerdem spiegeln sich in diesen Werten die unterschiedlichen Anfangs- und Randbedingungen, die für die fluidmechanischen Berechnungen zum Ansatz kamen, wider (Reaktorgeometrie, Durchsatz, Anfangsgeschwindigkeit).

Die Datensätze der betrachteten Mikroorganismus-Bahnen gestatten die Bestimmung eines Mittelwertes des Radius. Wird dieser benutzt, um unter Annahme eines turbulenten Strömungsprofils, beispielsweise nach dem 1/7 -Potenzgesetz, und unter Verwendung der Gleichungen (3.20), (3.22) und (3.35), der PSS-Methode und der *spread-sheet*-Variante des *GFM* die Bestrahlung H zu berechnen, spiegeln die Resultate die Empfindlichkeit der Modelle bezüglich der gewählten fluidmechanischen Ansätze wider, vgl. Tabelle 5-2 und Anlage 7, Tabellen A7-1 bis A7-3.

Tabelle 5-2: Werte-Vergleich; turbulenter Strömungsansatz # Schichtenströmung

Datensatz	MW r [mm]	Zylinderwellen_Modelle			PSS - Methode	GFM - Anwendung
	Q [m ³ /h]	Gleichung	Gleichung	Gleichung		
H-Werte [mJ/cm ²]	v_m [mm/s]	(3.35)	(3.20)	(3.22)		
{A-1-0}	32 mm 0,678 m ³ /h 600 mm/s	25,4092	39,4531	15,6364	42,1591	34,2841
{A-1-7}	26 mm 2,553 m ³ /h 1400 mm/s	15,3884	18,1490	11,9432	19,3608	8,8314
{A-1-7}b	50 mm 2,553 m ³ /h 1400 mm/s	15,548	23,0547	16,998	20,104	8,449

Die Untersuchung der Mittelwertbildung des Radiuswertes in den vorstehenden Fällen über Radius-Klassen definierter Breite ergibt eine rechtsverschobene Verteilung, eine rechtsverschobene Verteilung mit zwei Maxima und eine rechtsverschobene Verteilung mit drei Maxima, vgl. Tabelle 5-3. Für weitere untersuchte Mikroorganismus-Bahnen bzw. Elementarzellen- Bahnen wurden die gleichen qualitativen Verhältnisse festgestellt.

Mit Ausnahme der Verdrängungsströmung ist in den Schichtströmungsansätzen für die laminare und turbulente Strömung (Potenzansätze) die Haftbedingung für wandnahe Strömungen enthalten. Dies hat zur Folge, dass in dem Maße wie die Strömungsgeschwindigkeit sehr klein wird die Bestrahlung H sehr große Werte erreicht. Vom laminaren und turbulenten Ansatz ausgehend werden sich keine Organismen an der Innenwand des UV-Reaktors ansetzen und dort überleben können. Gleiches gilt für die Randbedingungen der Situationen, die mit dem *GFM* berechnet wurden. Die Bestrahlungswerte H in den Tabellen der Anlage 7 wurden für den Fall berechnet, dass der Radius r_w um einen kleinen Betrag (0,1 bis 0,001 mm) verringert wurde. Diese Maßnahme macht die Angabe von sinnvollen Werten im Wandnahbereich möglich.

Wird die *spread-sheet*-Variante des *GFM* für die Berechnung der Bestrahlung H benutzt, so ist ebenfalls die prinzipielle Auswirkung der Strömungsprofile in diesem Bereich der Strömungen

zu berücksichtigen. Gleiches gilt für die Anwendungen der hier in die Diskussion einbezogenen Gleichungen und die PSS - Methode.

Tabelle 5-3: Untersuchung der Radien ausgewählter Mikroorganismen - Bahnen

Reaktor/Bahn	Reaktor {A-1-0} c-23		Reaktor {A-1-7} c-46ad		Reaktor {A-1-7}b c-01	
Klasse	Klassenbereich	Anzahl N	Klassenbereich	Anzahl N	Klassenbereich	Anzahl N
1	$20 \leq r < 24$	20	$7,5 \leq r < 13,6$	24	$7,5 \leq r < 14,35$	7
2	$24 \leq r < 28$	61	$13,6 \leq r < 19,7$	24	$14,35 \leq r < 21,2$	20
3	$28 \leq r < 32$	92	$19,7 \leq r < 25,8$	33	$21,2 \leq r < 28,05$	18
4	$32 \leq r < 36$	133	$25,8 \leq r < 31,9$	30	$28,05 \leq r < 34,9$	39
5	$36 \leq r < 40$	49	$31,9 \leq r < 38$	75	$34,9 \leq r < 41,75$	34
6					$41,75 \leq r < 48,6$	41
7					$48,6 \leq r < 55,45$	66
8					$55,45 \leq r < 62,3$	64
9					$62,3 \leq r < 69,15$	73
10					$69,15 \leq r < 76$	46
Breite	MW=31,49 $\Delta = 4\text{mm}$	355	MW=26,37 $\Delta=6,1\text{mm}$	186	MW=50,49 $\Delta=6,85\text{mm}$	408

Eine Grenzwert-Untersuchung belegt, dass bei den Ansätzen auf der Basis der zylindersymmetrischen Strahlungsquelle (Linienstrahlungsquelle) mit $r \rightarrow 0$ der Wert ∞ erreicht wird. In den übrigen Gleichungen existiert ein Zahlenwert als Grenzwert. Dieser ist durch die konstruktiv festgelegten Parameter Radius der Strahlungsquelle r_q und Radius der Reaktorinnenwand r_w definiert. Bei der Betrachtung der Bestrahlung H ist wie bereits erwähnt die Expositionszeit t_{Ex} über das Strömungsprofil bestimmt. Wendet man die diskutierten Modelle in Verbindung mit dem Ansatz nur eines Strömungsprofils an, ergeben sich Berechnungswerte für die Bestrahlung H , die den Einfluss des fluidmechanischen Ansatzes dokumentieren, vgl. Bild 5-20.

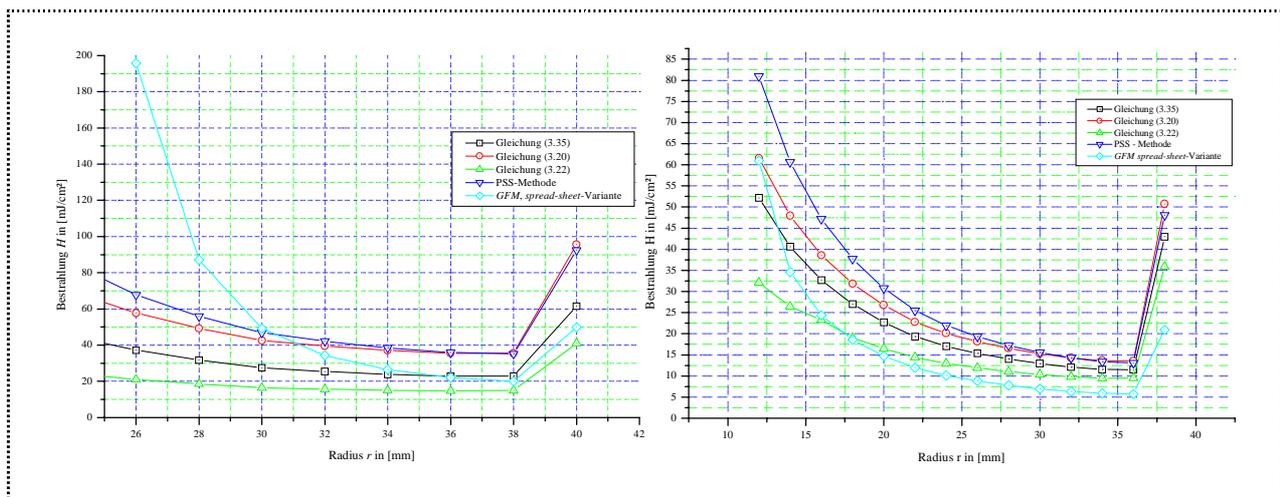


Bild 5-20: Anwendung der Modelle turbulente Strömung, UV-Reaktor {A-1-0} (links) und UV-Reaktor {A-1-7} (rechts)

Die Werte der grafischen Darstellungen, Bild 5-20, wurden für die UV-Reaktoren {A-1-0} und {A-1-7} und einem turbulenten Ansatz nach dem $1/7$ - Potenzgesetz unter Anwendung der genannten Modelle berechnet.

Der Zufluss des Reaktors {A-1-0} stellt einen kurzen Diffusor dar. Soll dieser sicher eine Strömungsablösung verhindern, so müsste seine Länge, bezogen auf die festgelegten Maße, 430 mm betragen. Der Reaktor ist dann technisch unhandlich. Im vorliegenden Fall wurde für Studienzwecke dieses Maß so gewählt, dass sich im Zufluss-Bereich ein Wirbelgebiet ausbildet. Durch diesen gezielt bewirkten Effekt ($\beta > 30^\circ$ nach BOLLRICH et al. [120], IDELCHIK [124] gewählt) verlängert sich die Länge S_{eff} und die Expositionszeit t_{Ex} der betroffenen Elementarzelle-Bahn, wodurch schließlich eine höhere Bestrahlung H erzielt wird. Zur gleichen Zeit werden die ungünstigen Verhältnisse, wie sie im Zufluss-Bereich des Reaktors {A-1-7} und {A-1-7}b auftreten, vermieden. Wirbelbleche können durch mit dem *GFM* erprobten konstruktive Details eines UV-Reaktors weggelassen werden, da sie in der Regel einen sehr hohen fluidmechanischen Widerstand bewirken - Borda-Verluste [120], [124]. Die Darstellung der turbulenten kinetischen Energie T_{KE} im Wirbelblechbereich des Reaktors nach SCHENCK und KOSCHITZKY [11] (ein Reaktor {A-1-3}) sollen dies ergänzend belegen, vgl. Bild 21.

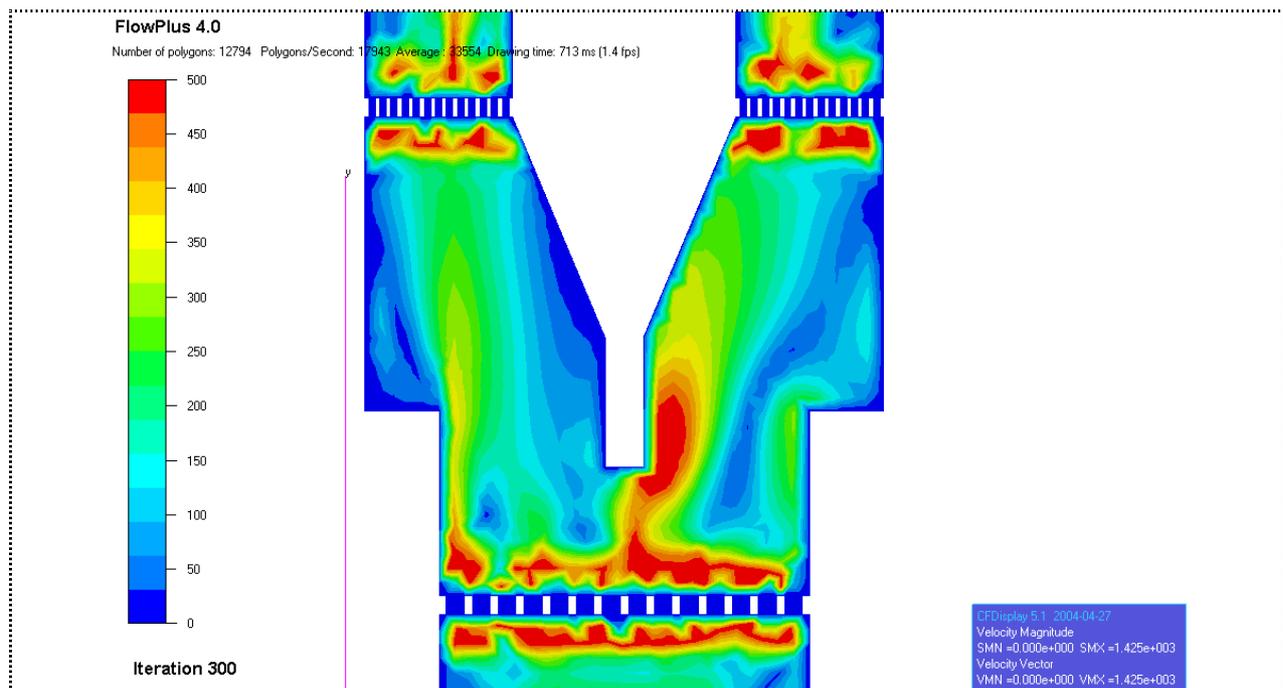


Bild 5-21: Auswirkungen (Strömungsgeschwindigkeit) der Lochblechfolge im Reaktor nach Schenck und Koschitzky

An modernen Berechnungs-Modellen wird seit ca. 5 Jahren gearbeitet. Der Begriff *Gekoppelte Fluidmechanische Modelle* wurde als solcher noch nicht geprägt; WRIGHT et al. [140], LEVECQ et al. [141], ORAVA et al. [142], TUAN TA [143], BRUSCHI, et al. [144], SANJAY-REDDY et al. [145]. In den Veröffentlichungen bezieht man sich meist auf die Anwendung eines kommerziellen Simulationsprogrammes mit welchem die Strömungsverhältnisse berechnet werden und verbindet dieses mit der PSS - Methode bzw. mit der Berechnung einer mittleren Verweilzeit der Spezies

im UV-Reaktor; DOWNEY et al. [138], WRIGHT et al. [140], LEVECQ et al. [141], BRUSCHI et al. [144]. Da bei der Desinfektion drei Komponenten beteiligt sind, muß ein gekoppeltes Modell diese auch enthalten, wie dies in den Ableitungen der vorgelegten Arbeit demonstriert wurde. Die Leistungsfähigkeit und Exaktheit jedes *Gekoppelte Fluidmechanische Modells* wird durch die Eigenschaften seiner Einzelkomponenten bestimmt.

Es erweist sich zweifelsfrei, daß das Heranziehen lediglich nur einer, entweder durch eine numerische Simulation in Kombination mit einem fluidmechanischen Modell, oder einer experimentell, mit beispielsweise der *RTD - Methode*, ermittelten, durchschnittlichen Verweilzeit t_m der Species im UV-Reaktor, die einer mittleren Expositionszeit t_{Ex} entspricht, die Gefahr der Unterschätzung der Desinfektionserfolges in sich birgt, WRIGHT et al. [140], TUAN TA [143], BRUSCHI et al. [144], SANJAY-REDDY et al. [145]. Gleiches trifft zu, wenn eine mittlere Bestrahlungsstärke E_{St} als Wirkung auf das effektive Reaktorvolumen V_{eff} angesetzt wird.

Die Expositionszeit t_{Ex} wird durch die Geschwindigkeit v festgelegt, die die *Elementarzelle* auf Grund der fluidmechanischen Bedingungen entlang der Bahnlinie durch den UV-Reaktor einnimmt. Dabei ist diese Bahnlinie als solche von der effektiven Bahnlinie zu unterscheiden, wobei letztere durch das effektive Volumen des Fluidraumes des UV-Reaktors festgelegt wird und dort ganz oder stückweise verlaufen kann. Bei der Bewegung durch den effektiven Fluidraum erfährt die *Elementarzelle* eine ihrem Ort und ihrer Geschwindigkeit adäquate Bestrahlung H , die zu summieren ist.

5.3. Rechentechnik und Software

Für die Durchführung aller in Verbindung mit dieser Arbeit stehenden Berechnungen standen mehrere Personal Computer, unter diesen eine Siemens Workstation mittlerer Leistungsfähigkeit - Firmenrechner der DPS GmbH, Berlin -, zur Verfügung. Neben der üblichen PC - Software waren auf diesen Rechnern folgende spezielle Softwarepakete installiert, mit denen die Testrechnungen, die analytischen Untersuchungen und Erprobungen, die fluidmechanischen Simulationsrechnungen und schließlich die Ergebnis-Visualisierung durchgeführt wurden:

- **ORIGIN Professional**
- **CAS MAPLE V; CAS MAPLE VIII**
- **COSMOS M2.5 / GEOSTAR**
- **FLOWPLUS 4.0 incl. CFDisplay _ Modul**
- **GLView**
- **SolidWorks**
- **FloWorks**

Mit dem CAS MAPLE wurden die einzelnen Verfahrensschritte erprobt. Dabei erwies sich die Möglichkeit der sofortigen Visualisierung der Rechenergebnisse für Kontrollzwecke als vorteilhaft. Die analytischen Lösungen wurden ganz oder teilweise derart in *worksheets* eingebunden, dass über Matrix - Befehle und Export - Befehle wie *writedata(matrix1,file)*; ein automatischer Datenexport ermöglicht werden konnte. Gleichwertig wurde der Befehl

readdata(matrix,Zahlenformat) für den Datenimport verwendet. Bei den entsprechenden Analysen waren die Werke von MAEDER [165], WEDENSKY [166], GRAY [167], ARROWSMITH et al. [168] und WESTERMANN [169] hilfreich. In der Form von ASCII - *files* war die weitere Datenanalyse nach deren Import mit ORIGIN Professional effizient möglich. Neben der Programmdokumentation wurden Hinweise nach PRESS et al. [132] berücksichtigt. Die Grenzwertuntersuchungen zu den wesentlichen Ansätzen nach Gleichung (3.35), (3.20) und (3.22) sowie der PSS-Methode für die beschriebenen Randbedingungen ($r \rightarrow 0$, $r \rightarrow r_q$, $r \rightarrow r_w$) wurden vollständig mit dem CAS bearbeitet.

Das Softwarepaket COSMOS der Firma SRAC ist modular aufgebaut und gestattet nach Einbindung von FLOWPLUS der Firma BRNI die umfangreiche Simulation der Strömungsverhältnisse, wobei GEOSTAR als pre- und post- Prozessor diente. Die Software CFDdisplay öffnet ein Fenster zur direkten Darstellung der Komponenten des auf die Bahnkurve bezogenen Geschwindigkeitsvektors über die Methode des *Particle Tracings* und des Schreibens von Ergebnis *files* ebenfalls im ASCII Format. Auf diese Weise konnte mit den zuvor genannten Software-Paketen auf den Simulationsergebnissen aufbauend weiter gearbeitet werden.

Die Arbeit mit FLOWPLUS gestatten nicht nur die fluiddynamische Berechnungen an turbulenten kompressiblen und inkompressiblen Medien mit dem *k-ε-Modell* und dem *RNG - Modell*, sondern auch den Eingriff in jedes Detail der Simulation von Konvergenzbedingungen der inneren und der äußeren Iteration bis zur detaillierten Definition physikalischer und mathematischer Parameter sowie der FEM-Elementwahl, TECHNISCHE DOKUMENTATION ([132], [133], [137]).

Das Software Paket SolidWorks der SolidWorks Corporation mit dem eingebundenen FloWorks Modul gestattet die gleiche Arbeitsweise - einschließlich des *Particle Tracings* - allerdings deutlicher für die Belange des Ingenieurwesens zugeschnitten, was sich durch einen hohen Automatisierungsgrad (Netzbildung, Konvergenz, Iterationen, Abbruchbedingungen etc.) bemerkbar macht, TECHNISCHE DOKUMENTATION [135] und [136]. Damit steht diese Software solchen Softwarepaketen, wie beispielsweise CFX, StarCD, ISAFEM, STATIFLOW, FLUENT, näher, die auf das Wirken der Ingenieure gerichtet ist, was hinsichtlich der Problembearbeitungszeit deutliche Vorteile aufweist. Die Tendenz der Software - Entwicklung entspricht dieser Philosophie und findet auch weiter unten Beachtung.

5.4. Schlussfolgerungen für weiterführender Experimente

Die *Gekoppelten Fluidmechanischen Modelle* (Hybrid-Variante, *spread-sheet*-Variante) bestehen aus drei Komponenten - der *mikrobiologischen Komponente*, der *reaktoroptischen Komponente* und der *reaktorhydraulischen* (fluidmechanischen) *Komponente* -. Dieser Einteilung folgend, sollen nachstehend Vorschläge abgeleitet werden, die im Rahmen experimenteller Arbeiten zur Weiterentwicklung sowohl für die Sicherheit des Modells im Speziellen als auch für den UV-Reaktorbau im Allgemeinen, beitragen würden.

Mikrobiologie:

Bestrahlungsexperimente

Die bislang praktizierte Untersuchungsmethode im Labor besteht darin, die auf einem Agar fixierte Organismen-Kolonien einer UV-Strahlung auszusetzen, wobei die Strahlungsstärke mit einem Sensor in der Ebene der Probenhalterung gemessen wird. Das Emissionsspektrum der Strahlungsquelle wird in den Veröffentlichungen zu diesen Messungen nicht angegeben. Monochromatische Strahlung im strengen Sinne wird nicht verwendet. In der Praxis sind die Organismen nicht fixiert und können ihre relative Lage gegenüber der Strahlungsquelle durch Drehen ändern. In Anlehnung an Reaktoren mit mehreren Strahlungsquellen sollte erweiternd die Frage untersucht werden, ob eine vorteilhafte Bestrahlungsrichtung existiert und ob die gleichzeitige Bestrahlung aus verschiedenen Raumrichtungen auf die Organismen überhaupt einen Einfluss hat.

Sensibilität k^ , $k^{*'} und der relativen spektralen Sensibilität $s = s(\lambda)$$*

Derzeit geht die Sensibilität k^* der Organismen als Faktor in den experimentellen exponentiellen Ansatz zur Berechnung der Anzahl der überlebenden Organismen ein. Die Abhängigkeit dieses Faktors von einer Vielzahl experimenteller Größen und der Eigenschaften der Organismen ist bekannt und wird in der Literatur (HARM [6], JOHNSON et al. [68], SCHEIBLE et al.[69], STOVER et al.[80]) oft beschrieben. Schwellenwerte spielen in der grafischen Form einer „Schulter“ (Schultereffekt) eine Rolle. Bevorzugt man den Weg der Berücksichtigung der Eigenschaften einer Spezies - Gruppe, indem man die relative spektrale Sensibilität s verwendet, so muss ein neuer Faktor $k^{*'}$ in den exponentiellen Ansatz eingeführt werden, da ein Teil der Organismeneigenschaften bereits über s berücksichtigt wurde. Der Weg über den funktionalen Zusammenhang $s = s(\lambda)$ ist exakter, da der Einfluss der gesamten photobiologisch wirksamen Strahlung der Strahlungsquelle auf alle Bausteine der Zelle berücksichtigt wird. Die Bereitstellung der relativen spektralen Sensibilität s des betrachteten photobiologischen Vorgangs für eine Vielzahl von Mikroorganismengruppen sollte das erste Ziel dieser Experimente werden.

Biofilmbildung in UV-Reaktoren

Das Problem der Biofilmbildung wurde im Unterabschnitt 4.2.2. erwähnt. Durch entsprechende Materialauswahl ist die Biofilmbildung zu unterbinden. Es ist von Interesse, die Biofilmbildung über einen langen Zeitraum zu verfolgen, da die UV- Technologie auch in der Behandlung von Abwässern aus Kläranlagen Verwendung findet. Sollte es in den UV-Reaktoren - Klasse {A} und Klasse {B} besonders aber Klasse {B}, Gruppe {1}, Typ 1 und Typ 2, zu Biofilmbildung kommen, sind Konsequenzen in mikrobiologischer und fluidmechanischer Hinsicht (fluidmechanische Beiwerte, Haftbedingungen) aus der gezielt durchgeführten experimentellen Untersuchung abzuleiten.

Für den Ansatz der laminaren Strömung oder der turbulenten Strömung (Potenzansätze, logarithmische Ansätze) als Strömungsprofile über den Reaktorquerschnitt liefert eine

Grenzwert-Untersuchung Bestrahlungswerte H , die eine Biofilm-Bildung unmöglich erscheinen lassen. Dieses Ergebnis aus der Theorie ist experimentell zu belegen.

Reaktoroptik:

Bestimmung des Spektrums der Strahlungsquellen in digitaler oder analoger Form als analytischer Ausdruck

Für die Berechnung der Bestrahlungsstärke E_{St} und schließlich der Bestrahlung H ist die genaue Kenntnis des Spektrums der Strahlungsquelle erforderlich. Von den UV-Strahler-Herstellern wird das Spektrum als ein Grafik zur Charakteristik des Strahlers geliefert. Für die Berechnungen über die relative spektrale Sensibilität (Empfindlichkeit) $s(\lambda)$ ist das digitale Spektrum in der Form einer Tabelle oder ein analytischer Ausdruck (auch als Näherung) erforderlich. Der Wirkungsgrad $\eta_{e,biol}(\lambda)$ und der photobiologisch optische Nutzeffekt O_{phb} sind mit den Tabellenwerten oder einem analytischen Ausdruck in der Reaktorkonstruktion dann besser verwendbar.

UV-Sensorik

UV-Reaktoren werden in der Praxis mit einem UV-Sensor zur Kontrolle der Bestrahlungsstärke E_{St} betrieben. Der Ort des Sensors und Details seiner Anbringung an der Reaktorwand (Montage in der Messöffnung, Dichtung, Quarzglasfenster) sind festgelegt. Ein solcher Aufbau definiert technisch einen Öffnungswinkel und verkürzt scheinbar die effektive Länge der Strahlungsquelle. Randstrahlungen werden somit meßtechnisch nicht erfasst. Für das Quarzglasfenster wird eine Transmission in Bezug auf $\lambda = 254$ nm von 90 % gefordert. Aus der Kenntnis der relativen spektralen Sensibilität und auf der Grundlage moderner Strahlertechnologien sollten künftig auch andere photobiologisch wirksame Wellenlänge des Emissionsspektrums berücksichtigt werden. Eine Anpassung der Sensorik in genannter Hinsicht wäre von Vorteil.

Werden solche technische Aufbauten zur Überprüfung der PSS-Methode und der *Gekoppelten Fluidmechanischen Modelle* (Hybrid-Variante, *spread-sheet*-Variante) verwendet, muss der Umstand berücksichtigt werden, dass diese Methode und die Modelle die Randstrahlungen erfassen. Eine experimentelle Weiterentwicklung könnte darin bestehen, mit einem Sensor in Kugelform das Bestrahlungsfeld im Reaktorinnern auszumessen, um schließlich einen *reaktoroptischen Paß* für die betreffende Reaktorkonstruktion während der Typprüfung zu erstellen.

Reaktorhydraulik:

Bestimmung der Viskosität

In Wasser gelöste Salze, Schwebstoffe, Mineralien und Partikel beeinflussen die Viskosität des Wassers, vgl. PREIBLER et al. [120]. Da weniger bei der Trinkwassergewinnung sondern hauptsächlich bei der UV-Behandlung von Wasser aus Kläranlagen mit den genannten Inhaltsstoffen als erschwerende Umstände zu rechnen ist, sind im Vorfeld der Berechnungen für diesen Anwendungsfall Messungen zu den fluidmechanischen Be-

rechnungsparametern durchzuführen. Gleiches gilt für die Biofilmbildung bei verschiedenen Verschmutzungsgraden des benutzten Wassers. Es ist bislang nicht geklärt, ob unter den Bedingungen in rinnenförmigen UV Reaktoren, Klasse {B}, Gruppe [1], Typ 1 und Typ 2, und den sehr hohen Organismenanzahlen im Abwasserbereich Diskontinuitäten in der Form von aus Biofilmen herausgerissenen Komponenten oder Schwärme mit überdurchschnittlich hoher Organismenanzahl auftreten. Für einen solchen Fall wären Ansätze auf experimenteller Basis zu überprüfen, die sich aus der speziellen Viskosität und der Assoziation von Spezies in Flüssigkeiten ergeben.

Oberflächenveränderungen und fluidmechanische Widerstandsbeiwerte

Aus der Fluidmechanik ist bekannt, dass Oberflächenveränderungen von hydraulisch -glatt- in Richtung hydraulisch -rauh- den fluidmechanischen Widerstandsbeiwert verändern und die Betriebsbedingungen eines hydraulischen Systems in ungünstige Bereiche verschieben. Hinsichtlich der UV-Reaktorinnenwände ist, nach der experimentellen Klärung der Frage nach dem prinzipiellen Auftreten von Biofilmen im Zusammenhang mit UV-Reaktoren, die Frage nach den fluidmechanischen Einflüssen einer intensiven Biofilmbildung zu klären. Aus diesen Experimenten werden sich Werte, wie beispielsweise eine Tolerierbarkeitsgrenze, ableiten lassen. Die Belagbildung im Zusammenhang mit den Strahleroberflächen bzw. mit den Oberflächen der Schutzzyylinder für den Strahler, die beispielsweise von SCHLEYPEN et al. in [13] beschrieben und untersucht wurde, hat einen anderen Charakter. Bei dieser handelt es sich nach der zitierten Arbeit um Eisen-, Aluminium- und Calciumverbindungen (Röntgen-Mikroanalyse), die neben dem optischen Effekt - Minderung des Strahlungsflusses - über ihre kristalline Struktur wesentlich die Oberflächenrauheit in einen fluidmechanisch ungünstigen Bereich verschieben. Da wegen der Schwächung des Strahlungsflusses eine Reinigung erforderlich ist, würde eine experimentelle Untersuchung und eine Lösung des Problems in beide Richtungen vorteilhaft sein. Derzeit behilft man sich mit mechanischen Wischern, die eine Reinigungsfunktion ausüben bzw. mit einer zyklischen chemischen Behandlung der relevanten Oberflächen.

Geformte Strahlerrohre

Bei der Entwicklung des *Gekoppelten Fluidmechanischen Modells* (Hybrid-Variante, *spread-sheet*-Variante) wurde gezeigt, dass hypothetische Strahlerformen - gerader Zylinder mit elliptischen Querschnitt und gerader Zylinder mit geometrisch zusammengesetzten Querschnitt - gleichwertig behandelt werden können. Besonders für den quer angeströmten Strahler dürfte sich ein fluidmechanisch günstige Bauweise der Strahlerrohre vorteilhaft auf die Hydraulik des UV-Reaktors und mechanischen Belastungen des Strahlerrohres auswirken, POLAK et al. [137]. Diese Hypothese ist in Anlehnung an die zitierten Quellen im Experiment zu überprüfen. Bereits im Zusammenhang mit sich abzeichnenden Entwicklungen zu modernen Strahlertechnologien (EXCIMER-Strahler) erhält diese Komponente der geleisteten Arbeit eine herausragende Bedeutung.

6. Zusammenfassung

In der vorgelegten Arbeit wird gemäß Aufgabenstellung ein *Gekoppeltes Fluidmechanisches Modell (GFM)* zur Berechnung der Bestrahlung H entwickelt. Für seine numerische Erprobung wurde eine Hybrid-Variante und eine *spread-sheet*-Variante abgeleitet. Das Anwendungsgebiet des Modells sind UV-Reaktoren, die sowohl zur Desinfektion von Trinkwasser als auch zur Desinfektion und Abreicherung von schadstoffbeladenen industriellen Brauchwasser und Abwasser allgemein eingesetzt werden. Aber auch andere Einsatzfelder, bei denen photoinduzierte Reaktionen (chemische, physikalische) in Reaktoren ablaufen, können aus der Verwendung des Modells Nutzen ziehen.

Das *Gekoppelte Fluidmechanisches Modell* umfasst drei Komponenten:

1. eine mikrobiologische - (biophysikalische) Modellkomponente,
2. eine reaktoroptische Modellkomponente,
3. eine fluidmechanische (reaktorhydraulische) Modellkomponente.

Der Aufbau des GFM erfolgte sowohl auf der Basis der in der Literatur dargestellten gesicherten Erkenntnissen aus den Einzeldisziplinen, Biophysik, Molekularbiologie und Physik - Plasma-physik, Optik, Fluidmechanik -, als auch auf der kritischen Wertung der in den relevanten Arbeiten dargestellten mathematischen Ansätzen für Bestrahlungsstärke E_{St} bzw. der Intensität D einer *Linienstrahlungsquelle*, vgl. Kapitel 3., Gleichungen (3.20), (3.22) und (3.35). Diese Strahlungsquelle bewirkt ein unendlich langes zylindersymmetrisches Strahlungsfeld. Der Begriff *Linienstrahlungsquelle* wurde für die Arbeit in Anlehnung an den in der Physik üblichen Begriff der Punktstrahlungsquelle geprägt. Besonders intensiv wurde sich mit der Methode der *point source summation* (PSS - Methode) und der Methode der *residence time distribution* (RTD - Methode) auseinandergesetzt. Während das *Lambertsche Gesetz* direkt in das *Gekoppelte Fluidmechanische Modell* übernommen werden konnte, war dies mit den zuvor genannten Methoden nicht möglich, da sie den Ansprüchen, die an ein *Gekoppeltes Fluidmechanisches Modell* gestellt wurden, nicht entsprachen. Allerdings wurden die Modellvorstellungen, die zu deren Entwicklung führten, aufgenommen, erweitert und schließlich auf die Oberfläche einer Strahlungsquelle, mit der Geometrie eines geraden Kreiszyinders definierter Abmessungen, bezogen.

Die Analyse des technischen Istzustandes im Bereich der UV-Reaktoren herstellenden und verwendenden Industrie machte die Entwicklung eines Wertungssystems erforderlich, mit welchem die in der Praxis befindlichen und bewährten Reaktorkonstruktionen eingeordnet werden konnten. In der Arbeit wurde deshalb eine Klassifizierungsmethode, ähnlich dem taxonomischen System in den biologischen Wissenschaften entwickelt. Auf der Basis ausgewählter technischer Merkmale wird über einen Ordnungsparameter eine Kennung bzw. eine Kennzahl für jede Reaktorkonstruktion vergeben, die eine Einordnung in eine Reaktor {-Klasse}, {-Gruppe}, {-Typ} gestattet. Insgesamt werden in der Arbeit 40 Reaktorkonstruktionen von 18 Firmen bewertet, schematisch dargestellt und über eine Statistik die am häufigsten verwendeten Konstruktionen - UV Reaktor {A-1-7} - bestimmt. Diese Klassifikation ist offen und kann auch künftige Reaktorkonstruktionen erfassen.

Mit den in Normen, Arbeitsblättern etc. definierten Anforderungen an den UV-Reaktorbau, die verbindliche Richtlinien für die Industrie darstellen, wird sich kritisch auseinandergesetzt.

Obwohl die fluidmechanische bzw. reaktorhydraulische Komponente die bestimmende Komponente des Modells darstellt - durch sie wird der Weg S , der Ort $P(x,y,z)$, die Geschwindigkeit v und damit die Zeit t_{Ex} festgelegt - erfolgte die Entwicklung des *Gekoppelten Fluidmechanischen Modells* in der Art wie sie durch die Verfahrensgleichung

$$H_{biol} = \int_A^B \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\Phi'_0(\lambda) s(\lambda)}{A} \cdot e^{-m_{nl}(|\tau - \tau_0|)} \frac{1}{|\mathbf{v}(\tau(S))|} \cdot d\lambda \cdot dS$$

dargestellt wird, d.h. über die reaktoroptische Komponente.

Vom Ort des Mikroorganismus im effektiven Reaktorvolumen V_{eff} wird die an der Bestrahlung beteiligte Oberfläche der Plasmastrahlungsquelle bestimmt. Zur Festlegung des strahlenden Bereichs wurde die wichtige *Tangentenmethode* entwickelt. Den Einfluss des Mediums beschreibt das *Lambertsche - Gesetz* über die entsprechenden Materialkonstanten, Extinktionsmodulus, spektraler Schwächungskoeffizient. Indem die Expositionszeit über die Geschwindigkeit und Weg ersetzt wird, erreicht man die Verbindung zur fluidmechanischen Komponente. Der kontinuumsmechanische Ursprung der *Navier-Stokesschen-Gleichungen* erlaubt einerseits die Diskussion des Einflusses der Materialkonstanten und ermöglicht andererseits die Präzisierung der globalen Modellvorstellungen. Diese legt die Einführung des Begriffs der *Elementarzelle* an Stelle des üblichen Volumenelementes nahe. Aus den *Navier-Stokesschen*-partiellen Differentialgleichung folgt richtungsweisend die Forderung, dass die auftretenden Scherkräfte die Zellwände der *Elementarzelle* nicht zerreißen dürfen - *Erhaltung der Zellwände der Elementarzelle* -. Diese Forderung ist kompatibel mit den vorliegenden experimentellen Erfahrungen.

Die Strömung im UV-Reaktor wird als eine voll ausgebildete turbulente isotrope Strömung angesehen, welche es gestattet, den Vorstellungen von *Raynolds* und *Bouissinesq* folgend, schließlich das *k-ε-Modell* bzw. das *RNG - Modell* der turbulenten Strömung anzusetzen. Höhere turbulente Strömungen, die den Effekt der Kavitation einschließen, liegen derzeit außerhalb des Anwendungsgebietes des GFM.

Zur Orts- und Geschwindigkeitsberechnung wird mit den kommerziellen CFD-Programmen - COSMOS, GEOSTAR, FLOWPLUS und CFDisplay # SolidWorks und FloWorks - das System der partiellen Differentialgleichungen für die ausgewählten UV-Reaktoren gelöst. Über eine Exportfunktion werden die Daten des *Particle Tracings* verwendet, um mit dem Programm MAPLE bzw. ORIGIN - Professional die reaktoroptische Komponente zu berechnen. Die reaktoroptische Komponente wird rechnerisch mit der mikrobiologischen Komponente über die relative spektrale Sensibilität des photobiologischen Vorgangs verbunden. Somit kann jedem Ort im effektiven Reaktorvolumen V_{eff} respektive jeder *Elementarzelle* auf ihren Weg S_{eff} durch dieses eine Bestrahlung H wellenlängenabhängig zugewiesen werden, über welche die Desinfektionseffizienz der betreffenden UV-Reaktorkonstruktion bewertet werden kann.

Numerische Rechnungen für drei Reaktorkonstruktionen, von denen eine die am häufigsten von der Industrie angewandte Reaktorkonstruktion ist - Reaktor {A-1-7} -, tabellarische und grafische Ergebnisdarstellungen demonstrieren die erfolgversprechende Anwendung des *Gekoppelten Fluidmechanischen Modells*. In der Diskussion werden beispielgebend die Bestrahlungswerte H für sowohl ausgewählte Mikroorganismen-Bahnen mit allen in der Arbeit diskutierten Modellen bestimmt als auch alle Modelle auf ein vereinfachend angenommenes turbulentes Strömungsprofil in den betreffenden UV-Reaktoren angewendet. Die Diskussion der Grenzwerte der auf dem unendlich langen Linienstrahler basierenden Modelle ergänzt die Betrachtungen hinsichtlich des Vorliegens von Sonderfällen.

Es ist nun möglich numerische Programme auf der Basis des *Gekoppelten Fluidmechanischen Modells* zu schreiben, deren Anwendung eine effiziente theoretische und somit kostengünstige Erprobung eines jeden UV-Reaktors unabhängig von seiner Klassifikation erlaubt. Das *Gekoppelte Fluidmechanische Modell* ist für die Integration in ein existierendes numerisches Programm im CFD - Bereich geeignet. Derzeit sind die benötigten CPU - Zeiten für Rechnungen mit der Hybrid-Variante noch relativ groß. Eine Kostenersparnis bei der Entwicklung von UV-Reaktoren ist durch die Anwendung der *spread-sheet* - Variante des *GFM* bereits jetzt möglich. Im Abschnitt 5.4. werden Hinweise gegeben und Fragen gestellt, die Gegenstand weiterführender hauptsächlich experimenteller Arbeiten sein sollten. Diese sind dann besonders sinnvoll, wenn sie beispielsweise parallel zur Integration des *Gekoppelten Fluidmechanischen Modells* in eine bereits existierende Software betrieben werden.

7. Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen

A	Fläche; allgemein
A _Q	Oberfläche des Schutzrohres, z.B. aus Quarz
A _{St}	Fläche, bestrahlt, der Strahlung ausgesetzt
A _{eff}	Querschnittsfläche, effektiv
A _q	frei Querschnittsfläche des Reaktors, des Rohres, der Leitung etc.
A _ε	Tensor als Funktion der turbulenten Energie
C _{kor}	Korrekturfaktor
C _F	Konstante, Compound Factor
C _c	Konzentration allgemein
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
c _p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
c _η	experimentelle Konstante
D	Betrag der Intensität
D ₀	Betrag der Intensität an der Oberfläche der Strahlungsquelle
D _d	Dispersion
d	Dispersionszahl
d _i	Durchmesser als Variable
d _{Ri}	Reaktorinnendurchmesser
d _{Sta}	Außendurchmesser der Strahler
d _W	Schichtdicke des Fluids
\mathcal{D}	Intensitätsvektor
\mathcal{D}_{rz}	Intensitätsvektor
\mathcal{D}_z	Intensitätsvektor, bezogen auf die z- Koordinate
\mathcal{D}_φ	Intensitätsvektor, bezogen auf den Winkel φ in Zylinderkoordinaten
E	Energie
E _D	Dispensionskoeffizient
E _{St}	Bestrahlungsstärke
E _{StFD}	Bestrahlungsstärke, der strahlenden Oberfläche zugewiesen
E _{abs}	absorbierte Energie
E _{biol}	photobiologisch wirksame Bestrahlungsstärke
E _{Stλ}	Bestrahlungsstärke auf eine Wellenlänge λ bezogen
E _λ	Energie, bezogen auf eine Wellenlänge
E _{253,7}	Energie, bezogen auf die genannte Wellenlänge $\lambda = 253,7$ nm
E	Dehnungstensor
F(x,y,z)	Funktion (allgemein)
f(x,y,z)	Funktion (allgemein)
G	Erzeugungsrate der turbulenten kinetischen Energie
g	Erdbeschleunigung (Konstante)
\mathbf{g}	Vektor der Erdbeschleunigung
G	Tensor der turbulenten kinetischen Energie
H	Bestrahlung (Dosis)

H_N	Nenn- Bestrahlungswert für die sichere Desinfektion
H_e	Bestrahlung (Dosis)
H_{biol}	Bestrahlung, biologisch wirksam
$H_{253,7}$	Dosis bei einer Wellenlänge $\lambda = 253,7$ nm
h	Plancksches Wirkungsquantum
I	Strahlungsstärke
I_0	Strahlungsstärke Oberfläche der Strahlungsquelle
i	Index ganzzahlig, Laufvariable
J	Massestrom
j	Massenstromdichte
j	Index ganzzahlig, Laufvariable
k^*	mikrobiologischer Inaktivierungskoeffizient, Sensibilität
k	Index ganzzahlig, Laufvariable, Wirbeldichte
k^*	mikrobiologischer Inaktivierungskoeffizient bei Berechnungen über $s(\lambda)$
k_R	Rauheitswert in [mm]
k_T	turbulente kinetische Energie
\mathcal{K}	Kraft
\mathfrak{k}	Kraftdichte
L	Länge, Länge der Strahlungsquelle
L_{Hy}	Länge, hydraulisch
L_{SQ}	Länge der Strahlungsquelle
L_e	Strahlungsdichte, Strahldichte
L_{eff}	effektive Reaktorlänge, effektive Strahlerlänge, Länge des Plasmafadens
l	Index ganzzahlig, Laufvariable
M	Mittelwert, allgemein
m	Extinktionsmodul; lg - Gesetz (<i>Bunsensche Gesetz</i>)
m	Index ganzzahlig, Laufvariable
m_n	Extinktionsmodul; exp - Gesetz (<i>Lambertsche Gesetz</i>)
m_{nPy}	Extinktionsmodul; exp - Gesetz, Material - Pyrex -
N	Anzahl (der Mikroorganismen)
N_A	AVOGADRO - Konstante
N_0	Anzahl der Mikroorganismen vor der Strahlungseinwirkung
N_P	Mikroorganismen in Verbindung mit im Medium befindlichen Partikeln
N_{MOR}	Anzahl der überlebenden Mikroorganismen
n	Anzahl, Exponent, auch $n = n(\text{Re})$
n	Index ganzzahlig, Laufvariable
O_{phb}	
$P(x,y,z)$	Punkt auf der Fläche bzw. im Raum
P_V	Reaktionsrate
P_0	Koordinatenursprung
P_m	Mittelpunkt
P_b	Ort der Messung, Beobachter
P_{el}	elektrische Leistungsaufnahme des Strahlers

P'	Punkt nach Koordinatentransformation
\mathfrak{P}	Vektor Impuls
P	Spannungstensor
Q	Strahlungsenergie der Lichtquelle
q_{254}	Quantenausbeute bei einer Wellenlänge $\lambda = 253,7$ nm
q_T	volumetrische Wärmequelle
R	Radius in Kugelkoordinaten in Richtung Messpunkt
R_P	Radius in Kugelkoordinaten in Richtung Ort des Mikroorganismus (MOR)
R_{PQ}	Radius in Kugelkoordinaten in Richtung Messpunkt; Länge bis zur Wand des Schutzzyllinders
R_{SQ}	Radius in Kugelkoordinaten bis zum Schutzrohr, PSS - Methode
R_{SP}	Radius in Kugelkoordinaten, PSS - Methode
R_{St}	Radius der Peripherie des Kreises auf dem die radialen Strahler angeordnet sind
Re	REYNOLDS - Zahl
R_i	Radius des Experimentalreaktors innen
r	Radius
r_Q	Radius des Schutzrohrs der Strahlungsquelle
r_{Sq}	Radius der Strahlungsquelle
r_W	(Innen-) Radius des Reaktors
r_z	Radius in Zylinderkoordinaten
r_{zP}	Radius in Zylinderkoordinaten zum Punkt P, PSS - Methode
r_{zQ}	Radius in Zylinderkoordinaten bezogen auf den Außendurchmesser des Schutzrohres der zylindersymmetrischen linearen Strahlungsquelle
r_{zW}	Radius in Zylinderkoordinaten bis zur Reaktorwand
r'	Dicke des Schutzzyllinders
τ	Vektor
τ_B	Ortsvektor Koordinatenursprung zum Messpunkt, Beobachter
τ_i	Ortsvektor Strahlungsquelle, Messpunkt
τ_{iSt}	Ortsvektor Koordinatenursprung zur Strahlungsquelle
τ_0	Ortsvektor Koordinatenursprung zum Pol, bzw. zum Ort des MOR
S	Länge der Kurve bei Integration (Bahnlänge)
s	relative spektrale Sensibilität (Empfindlichkeit) des photobiologischen Vorgangs
T	Transmission
T	Maß der Turbulenz
t	Zeit
t_{Ex}	Expositionszeit
t_m	mittlere Verweilzeit
t_{RT}^{th}	theoretische mittlere Verweilzeit im zu beurteilenden System; Abschnitt 3.2.2.
U	(elektrische) Spannung
U_{Re}	Redox-Spannung
u	mittlere Strömungsgeschwindigkeit ⁵ allgemein
u'	Geschwindigkeitsschwankung, turbulent x - Richtung

⁵in Anlehnung an die Literatur

V	Volumen
V_R	Reaktorvolumen
V_P	Probenvolumen
V_{eff}	effektives Volumen
.	
\dot{V}	Volumenstrom, Durchsatz
v'	Geschwindigkeitsschwankung, turbulent y - Richtung
v_m	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
v_{St}	Strömungsgeschwindigkeit als Funktion $f(r, x, y, z, \dots)$
v_{max}	maximale Strömungsgeschwindigkeit
v_m	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
\mathbf{v}	Vektor der Strömungsgeschwindigkeit
W	Energie
w'	Geschwindigkeitsschwankung, turbulent z - Richtung
x, y, z	Koordinaten des kartesischen Koordinatensystems; z meist in Strömungsrichtung
z_{PSQi}	Variable zur ausgewählten PSQ, PSS - Methode
z_P	Variable zum MOR, PSS - Methode

Griechisches Alphabet

Φ	Strahlungsfluss
Φ_0	Strahlungsfluss, Anfangswert
Φ_L	Strahlungsfluss, bezogen auf die Länge der Strahlungsquelle
Φ_{PSQ}	Strahlungsfluss, der Punktstrahlungsquelle
Φ_{LSQ}	Strahlungsfluss, der Linearen Strahlungsquelle
Φ_e	strahlungsphys. Strahlungsfluss, wenn Unterscheidung Lichttechnik notwendig
Φ_{ref}	reflektierter Strahlungsfluss
Φ_{rzW}	senkrecht auf die Wand des Reaktors auftreffender Strahlungsfluss
$\Phi_{253,7}$	Strahlungsfluss, bezogen auf die Wellenlänge $\lambda = 253,7 \text{ nm}$
Γ_ε	Koeffizient der Dissipationsrate der turbulenten kinetischen Energie
Γ_k	Diffusionskoeffizient der turbulenten kinetischen Energie
α	Teilwinkel, vertikal
σ	Leitfähigkeit
χ	Winkel, horizontaler Öffnungswinkel der lin. zylindersym. Strahlungsquelle
ε	Turbulente Dissipationsrate
ε_n	Extinktionskoeffizient, <i>Lambert - Beersches - Gesetz</i>
ε_1	Emissionswinkel, <i>Lambert - Strahler</i>
ϕ	stellvertretende Größe für eine abhängige Variable
η	Wirkungsgrad, Strahlungsausbeute
η	Wirbelreibung, Viskosität
η'	Kompressionsreibung
η_T	turbulente Viskosität
$\eta_{e,biol}$	photobiologischer Wirkungsgrad
$\eta_{253,7}$	Wirkungsgrad, bezogen auf $\lambda = 253,7 \text{ nm}$
λ	Wellenlänge
λ_{DNS}	Wellenlänge, Absorptionsmaximum der DNS
λ_{max}	Wellenlänge, bei welcher die maximale biocidische Wirksamkeit liegt
λ_n	Wellenlänge im Zusammenhang mit der Anwendung des <i>Lambert - Beerschen</i>

	Gesetzes
λ_{FI}	fluidmechanischer Widerstandsbeiwerten
μ	Massendichte
ν	Frequenz
τ	Absorption der Strahlung an Quarz
φ	Winkel, Parameterdarstellung Zylinderkoordinaten
φ_Q	Quanteneffektivität
ω	Vertikaler Öffnungswinkel bezogen auf die lin. zylindersym Strahlungsquelle

Abkürzungen

CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DB	Definitionsbereich
DGL	Differentialgleichung
DNS	Desoxyribonukleinsäure
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> der USA
FEM	Methode der Finiten Elemente
FD	Flächendichte
GFM	Gekoppeltes Fluidmechanisches Modell
GFM - I	Gekoppeltes Fluidmechanisches Modell - 1. Stufe
HSR	Hauptströmungsrichtung
KBE	Kolonien bildende Einheit
KZ	Keimzahl
LD	Liniendichte
LSQ	Lineare Strahlungsquelle, Linienstrahlungsquelle
MOR	Mikroorganismus
MPSS	Mehrfache (Multiple) PSS - Methode
PDGL	partielle Differentialgleichung/en
PSQ	Punktstrahlungsquelle
RNG	(-Modell) - <i>renormalization group theory</i>
RNS	Ribonukleinsäure
PSS	Methode der <i>Point - Source - Summation</i> (PSS - Methode)
RF	Reduktionsfaktor
RT	<i>Residence - Time</i> (auch zur Indizierung)
RTD	Methode der <i>Residence - Time - Distribution</i> (RTD - Methode)
SSP	suspendierte (feste) Partikel
SAK	spektraler Absorptionskoeffizient
SSK	spektraler Schwächungskoeffizient
TW	Trinkwasser
WB	Wertebereich

8. Literaturverzeichnis

- [1] J. Herrmann
Lexikon Früher Kulturen
VEB Bibliographisches Institut Leipzig, Leipzig 1987, Band 1. und 2.
ISBN 3-323-00112-5 Bd. 1/2
- [2] J. Irmscher, R. Johne
Lexikon der Antike
VEB Bibliographisches Institut Leipzig, Leipzig 1984
ISBN 3-323-00112-5 Bd.1/2
- [3] Schriftenreihe FRONTINUS-Gesellschaft
Beiträge zu wasserwirtschaftlich historischen Anlagen
Frontinus Tagung 1993 in Berlin
Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn 1994
- [4] Heike Martiny
Desinfektion von Wasser mit UV-Strahlen- Mikrobiologische Untersuchungen
Veröffentlichung aus dem Fachgebiet Hygiene der TU Berlin, Uni-Bibliothek, Abt.
Publikationen, 1991, ISBN 3 7983 1465 9 (Habilitationsschrift)
- [5] Clemens v. Sonntag
Disinfection with UV-Radiation
Process Technologies for Water Treatment
Edited by Samuel Stucki, Plenum Press, New York and London 1988
Symposium 1987, ABB Researchcenter, Sept. 21. - 22. 1987, Baden Switzerland
- [6] Walter Harm
Biological Effects of Ultraviolet Radiation
Cambridge University Press, Cambridge, 1980, ISBN 0 521 22121 8
- [7] Yves Ravalard
POLYMECA - Nouvelles approches de l'ingénierie mécanique
Symposiumsmaterial herausgegeben von der École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de
Mécanique Énergétique de Valenciennes (ENSIMEV), Valenciennes vom 24. bis 25.
November 1999, Frankreich
- [8] Alfred Iwainsky
CAD 2000 - Kommunikation, Kooperation, Koordination
Symposiumsmaterial herausgegeben vom Institut für Informatik in Entwurf und Fertigung
zu Berlin GmbH (IIEF), Berlin vom 2. bis 3. März 2000
- [9] Franz Durst
*High Performance Scientific and Engineering Computing - Methods, Developments and
Applications*
FAU Erlangen-Nuremberg, International FORTWIHR Conference, Programme and
Abstracts, March 12th - 14th, 2001

- [10] P. Gelzhäuser
Praktische Anwendung von UV - Anlagen zur Desinfektion von Wasser
bbr 12/1985, Seite 466 bis 469
- [11] H.-P. Koschitzky, B. Keim
Hydraulische Untersuchungen zur Ermittlung der Strömungsverhältnisse im UV-Reaktor
Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau, 1990, DVGW Schriftreihe Wasser, Nr. 108
- [12] H. Bernhardt
Untersuchung zur hygienischen Sicherheit der Trinkwasserdesinfektion mit UV-Strahlen
BMFT; Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren e.V.; FIGAWA
Verbundprojekt Bericht 1993; Abschluß-Statusseminar
- [13] P. Schleyen, H. Loy
Untersuchungen zur Keimreduktion im gereinigten Abwasser durch UV-Bestrahlung
Informationsberichte des Bayer. Landesamtes für Wasserwirtschaft
Gemeinsamer Bericht Abwasserverband Ampergruppe; Bayerische Landesanstalt für
Wasserforschung, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Hygiene Institut der
Universität Tübingen, München, Dezember 1991, ISSN 0176-4217
- [14] R.W. Legan,
UV-Disinfection Chambers Require Custom Designing
W&SW-Refernce Number 1980-R, Seite 56-61
- [15] DVGW Regelwerk
UV-Anlagen zur Desinfektion von Trinkwasser
DVGW Arbeitsblatt, W 293, Oktober 1994
- [16] DVGW Regelwerk
UV-Desinfektionsanlagen für die Trinkwasserversorgung - Anforderungen und Prüfung
DVGW Arbeitsblatt, W 294, Oktober 1997
- [17] DVGW Regelwerk (*Entwurf*)
UV-Geräte zur Desinfektion in der Wasserversorgung - Teil 1 bis 3
DVGW Arbeitsblatt, W 294, 30. April 2004
- [18] Österreichisches Normungsinstitut - ÖNORM -
Anforderungen an Anlagen zur Desinfektion von Wasser mittels Ultraviolett - Strahlen
Österreichisches Normungsinstitut, 1021 WIEN, 1997
- [19] FIGAWA
UV - Bestrahlung in der Trinkwasser und Abwasserbehandlung zu Desinfektionszwecken
FIGAWA - Arbeitskreis - UV - Wasserbehandlung - Technische Mitteilung 20/98
- [20] N. B. Knieling
Desinfektion von Schwimmhallenwasser
Fördermaßnahme "Marktvorbereitende Industrieforschung und wirtschaftlicher Struktur-
wandel" des BMWi, FuE-Vorhaben, BMWi Reg. Nr.: 820/94, BMWi Zwischenbericht
September 1994,

- [21] N. B. Knieling
Desinfektion von Schwimmhallenwasser
Fördermaßnahme "Marktvorbereitende Industrieforschung und wirtschaftlicher Strukturwandel" des BMWi, FuE-Vorhaben, BMWi Reg. Nr.: 820/94, BMWi Zwischenbericht Dezember 1994
- [22] N. B. Knieling
Möglichkeiten der UV - Technologie - Desinfektion von Schwimmhallenwasser
Posterbeiträge und Messestandgestaltung in Zusammenarbeit mit der Firma BiosQuant GmbH zum Thema auf der Umweltmesse UTECH in Berlin, 13. - 18. Februar, 1995,
- [23] N. B. Knieling
Desinfektion von Schwimmhallenwasser
Fördermaßnahme "Marktvorbereitende Industrieforschung und wirtschaftlicher Strukturwandel" des BMWi, FuE-Vorhaben, BMWi Reg. Nr.: 820/94, BMWi Abschlußbericht April 1995
- [24] G. Müller, H. Weber
Mikrobiologie der Lebensmittel - Grundlagen -
Behr's Verlag GmbH & Co, Hamburg, 8. Auflage 1996
- [25] H. Lodish, D. Baltimore, A. Berk, S.L. Zipursky, P. Matsudaira, J. Darnell
Molekulare Zellbiologie
Walter deGruyter Verlag, Berlin, New York, 1996, ISBN 3-11-014460-3
- [26] Nicholas J. Turro
Modern Molecular Photochemistry
University Science Books, Sausalito, CA. USA, 1991
- [27] Thomas Oppenländer
Photochemical Purification of Water and Air
Wiley VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, 2003
- [28] Willy. J. Masschelein
Ultraviolet Light in Water and Wastewater Sanitation
Wiley Lewis Publisher, Boca Raton, 2002, ISBN 1-56670-603-3
- [29] ATV Regelwerk
Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser
Abwasser, Abfall, Gewässerschutz, ATV -M205, Juli 1998
- [30] FIGAWA Arbeitskreis „UV-Wasserbehandlung“
Zur Zertifizierung von UV Desinfektionsanlagen für die Trinkwasserdesinfektion
bbr 12, 48 Jahrgang, Seite 11 bis 13, 1997
- [31] O. Hoyer
Anforderungen an UV Anlagen zur Trinkwasserdesinfektion
bbr 12, 47 Jahrgang, Seite 12 - 19, 1996
- [32] R. Jaschinski, A. Kolch
Moderne Brauchwasserstationen in Kläranlagen
Verfahrenstechnik Sonderdruck aus Heft 6, 1996

- [33] DVGW Regelwerk
Trinkwassererwärmungs- und Leitungsanlagen, Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums, Sanierung und Betrieb
Arbeitsblatt W 552 , April 1996
- [34] A. Kolch
Die UV-Desinfektion in der Sanitär- und Klimatechnik
Installation DKZ, Sonderdruck Heft 11, 1995
- [35] E. R. Blatchley
Disinfection and antimicrobial processes
Water Environment Research, Volume 66, Number 4, June 1994
- [36] C. Wei, W.-Y. Li, Z. Zainal, N. E. Williams, K. Zhu, A.P. Kruzic, R.L. Smith, K. Rajeshwar
Bactericidal Activity of TiO₂ Photocatalyst in Aquas Media: Toward a Solar-Assisted Water Disinfection System
Environ. Sci. Technol. 28, Seite 934 - 938, 1994
- [37] K.G. Lindenauer, J. L. Darby
Ultraviolet Disinfection of Wastewater: Effect of Dose on Subsequent Photoreactivation
Water Research, Vol. 28, No. 4, Seite 805-818, 1994
- [38] K.-U. Rudolph, Th. Nelle, Ch. Oberg
Stand der Technik bei der Desinfektion von Abwasser und Schwerpunkte der Forschung
ATV Bundestagung, 1992
- [39] K. Mechsner, T. Fleischmann
Wiederverkeimung des Wassers nach Ultraviolettdesinfektion
gwa 11, Seite 807-811, 1992
- [40] H. Bernhardt
Abschluß des BMFT-F+E-Verbundvorhabens: Untersuchungen zur hygienischen Sicherheit der Trinkwasserdesinfektion mit UV-Strahlen
gwf Wasser - Abwasser Nr. 12, Seite 715-716, 1993
- [41] H. Bernhardt, O. Hoyer, B. Hengesbach, D. Schoenen, P. Karanis, H.-J. Moriske, C.v. Sonntag
Desinfektion aufbereiteter Oberflächenwässer mit UV-Strahlen - erste Ergebnisse des Forschungsvorhabens
gwf, Wasser - Abwasser, Nr. 12, Seite 632-643, 1992
- [42] W. Pfeiffer
Abwasser-Desinfektion durch UV-Bestrahlung
Abwassertechnik, Heft 3, Seite 27-34, 1991
- [43] T.S.C. Gross, M.K. Davis
Ultra-Violet Disinfection of Sewage Effluents: A Pilot Study at Bellozanne, Jersey
J. IWEM, 5, December, 1991

- [44] H.-J. Moriske, H. Rüden
Photochemische Umsetzung polycyclischer Aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAH) bei der UV-Wasserdesinfektion: Chemische und Biologische Untersuchungen
DVGW Schriftenreihe Wasser Nr. 108, 1990
- [45] J. Maarschalkerweerd, R. Murphy, G. Sakamoto
Ultraviolet Disinfection in Municipal Wastewater Treatment Plants
Wat. Sci. Techn. No: 7/8, Seite 145-152, 1990
- [46] C. von Sonntag
Untersuchung zur hygienischen Sicherheit der Trinkwasserdesinfektion mit UV-Strahlen. Photochemische und aktinometrische Untersuchungen
DVGW Schriftenreihe Wasser, Nr. 108, Seite 47-75, 1990
- [47] H. Martiny, T. Ernsting, H. Rüden
UV-Desinfektion von Befeuchterwasser in RLT-Anlagen - Untersuchung in einem Bürogebäude
Gesundheits - Ingenieur 111, Heft 2, Seite 74-80, 1990
- [48] H. Martiny, C. Wendt, H. Rüden
UV-Desinfektion von Befeuchterwasser in RLT-Anlagen - Untersuchungen in einem Krankenhaus
Gesundheits - Ingenieur 111, Heft 4, Seite 187-183, 1990
- [49] K. Mechsner, T. Fleischmann
Ultraviolettdesinfektion des Wassers und bakterielle Wiederverkeimung
gwa 70. Jahrgang, Seite 418-421, 1990
- [50] C. Jonas
Untersuchungen über den kombinierten Einsatz von Ultraviolet-Bestrahlung, Jod Peroxodisulfat zur Desinfektion und Aufbereitung von Schwimmbadwasser
Universität Gesamthochschule Duisburg, Fachbereich 6, Promotionsschrift, 1989
- [51] P. Gelzhäuser
Keimreduktion im Abwasser durch UV-Bestrahlung
Korrespondenz Abwasser, 36. Jahrgang, Heft 1, Seite 68-75, 1989
- [52] A. Bosch, C. Tartera, R Gajardo, J.M. Diez, J. Jofre
Comparative Resistance of Bacteriophages Active Against Bacteroides Fragiles to Inactivation by Chlorination or Ultraviolet Radiation
Wat. Sci. Tech. Band 21, Nr. 3, Seite 221-226, 1989
- [53] N. Kamiko, S. Ohgaki
RNA Coliphage Q β as a Bioindicator of the Ultraviolet Disinfection efficiency
Wat. Sci. Tech. Band 21. Nr. 3, Seiten 227-231, 1989
- [54] H. Martiny, K. Wlodavezyk, G. Harms, H. Rüden
Anwendung von UV-Strahlen zur Desinfektion von Wasser
I Mitteilung: Mikrobiologische Untersuchungen in Trinkwasser
Zbl. Bakt. Hyg., Band 185, Seite 350-367, 1988

- [55] G.D. Harris, V.D. Adams, D.L. Sorensen, M.S. Curtis
Ultraviolet Inactivation of Selected Bacteria and Viruses with Photoreactivation of the Bacteria
Wat. Res., Band 21, Nr. 6, Seite 687-692, 1987
- [56] V.D. Adams, E.C. Nieminska, M.B. Borup
Ultraviolet Radiation and Sedimentation of Wastewater Lagoon Effluents
Wat. Sci. Tech. Band 19. Nr. 12, Seiten 359-361, 1987
- [57] A.H. Havelaar, W.M. Pot-Hogbeem, W. Koot, R. Pot
F-Specific Bacteriophages as Indicators of the Disinfection Efficiency of Secondary Effluent with Ultraviolet Radiation
Ozone, Science & Engineering, Band 9, Seite 353-368, 1987
- [58] G.D. Harris, V.D. Adams, D.L. Sorensen, R.R. Dupont
The influence of photoreactivation and water quality on ultraviolet disinfection of secondary municipal wastewater
Journal WPCF, Band 59, Seite 781-787, August 1987
- [59] K. Kawamura, M. Kaneko, T. Hirata, K. Taguchi
Microbial Indicators for the efficiency of Disinfection Process
Wat. Sci. Tech., Band 18, Nr. 10, Seite 185-184, 1986
- [60] J.S. Slade, N.R. Harris, R.G. Chisholm
Disinfection of Chlorine Resistent Enteroviruses in Ground Water by Ultraviolet Irradiation
Wat. Sci. Tech., Band 18, Nr. 10, Seite 115-123, 1987
- [61] G. B. Knudson
Photoreactivation of Ultraviolet-Irradiated, Plasmid-Bearing, and Plasmid-Free Strains of Bacillus anthracis
Applied and Environmental Microbiology, Seite 444-449, Sept. 1986
- [62] G. Zukows, J. Kollar, H.D. Monteith, K.W.A. Ho, S.A. Ross
Disinfection of low quality wastewaters by ultraviolet light irradiation
Journal WPCF, Band 58, Nr. 3, Seite 199-206, 1986
- [63] S.C. White, E.B. Jernigan, A.D. Venosa
A study of operational ultraviolet disinfection equipment at secondary treatment plants
Journal WPCF, Band 58, Nr. 3, Seite 181-192, 1986
- [64] A.D. Venosa, R. Isaac
Disinfection
Journal WPCF, Band 58, Nr. 6, Seite 518-527, 1986
- [63] S.E. Rogers, W.C. Lauer
Disinfection for potable reuse
Journal WPCF, Band 58, Nr. 3, Seite 193-198, 1986

- [66] A. Savino, G. Angeli
Photodynamic Inactivation of E. Coli by Immobilized or Coated Dyes on Insoluble Support
 Water Res., Band 19, Nr. 12, Seite 1465-1469, 1985
- [67] W. Dott
Qualitative und quantitative Bestimmung von Bakterienpopulationen aus aquatischen Biotopen
 6. Mitteilung: Wiederverkeimung in Trinkwasser
 Zbl. Bakt. Hyg., I Abt. Orig. B188, Seite 263-279, 1983
- [68] J.D. Johnson, R.G. Qualls
Ultraviolet Disinfection of a Secondary Effluent - Measurement of Dose and Effects of Filtration
 U.S. Environmental Protection Agency, Report EPA - 600/2-84-160, Cincinnati, October 1984
- [69] O.K. Scheible, C.D. Bassell
Ultraviolet Disinfection of Secondary Wastewater Treatment Plant Effluent
 U.S. Environmental Protection Agency, Report EPA - 600/2-81-152, Cincinnati, August 1981 1984
- [70] B.F. Severin
Disinfection of municipal wastewater effluents with ultraviolet light
 Journal WPCF, Band 52, Nr. 7, Seite 2007-2018, July 1980
- [71] H.W. Wolf, A.C. Petrsek, S.E. Esmond
Utility of UV Disinfection of Secondary Effluent
 Progress in Wastewater Disinfection Technology, Cincinnati, Ohio, Seite 100-107, 1978
- [72] J.D. Johnson, K. Aldrich, D.E. Francisco, T. Wolff, M. Elliott
UV Disinfection of Secondary Effluent
 Progress in Wastewater Disinfection Technology, Cincinnati, Ohio, Seite 108-116, 1978
- [73] O.K. Scheible, G. Binkowski, T.J. Mulligan
Full Scale Evaluation of Ultraviolet Disinfection of a Secondary Effluent
 Progress in Wastewater Disinfection Technology, Cincinnati, Ohio, Seite 118-135, 1978
- [74] T. Ito, K. Kobayashi
Induction of Lethal and Genetic Damage by Vacuum - Ultraviolet (163nm) Irradiation of Aquas Suspension of Yeast Cells
 Radiation Research, Band 68, Seite 275-283, 1976
- [75] E. Nolde, W. Dott
Verhalten von hygienisch relevanten Bakterien und Pilzen im Grauwasser - Einfluß der UV-Desinfektion und Wiederverkeimung
 gwf Wasser- Abwasser, Nr. 3, Seite 108-114, 1991
- [76] B.G. Oliver, J.H. Carey
Ultraviolet disinfection: an alternative to chlorination
 Journal WPCF Band 48, Nr. 11, Seite 2619-2624, November 1976

- [77] S.M. Jacob, J.S. Dranoff
Light Intensity Profiles in a Perfectly Mixed Photoreactor
AIChE Journal, Band 16, Seite 359-363, May 1970
- [78] S.M. Jacob, J.S. Dranoff
Radial Scale - Up of Perfectly Mixed Photochemical Reactors
Chem. Eng. Progr. Symp., Seite 47-55, 1966
- [79] P.R. Harris, J.S. Dranoff
A Study of Perfectly Mixed Photochemical Reactors
A.I.Ch.E. Journal, Band 11, Seite 497-502, May 1965
- [80] E.L. Stover, C.N. Haas, K.L. Rakness, O.K. Scheible
Municipal Wastewater Disinfection - Design Manual
US EPA /625/1-86/021, Center for Environmental Research Information, Cincinnati, 1986
- [81] M. E. Coutteret
On the Measurement of UV - Radiation Used for Water Disinfection
10th International Symposium of the Technical Committee on Photon-Detectors,
Proceedings, Berlin, 20.-22. Sept. 1982
- [82] B.F. Severin, M.T. Suidan, R.S. Engelbrecht
Kinetic Modeling Of U.V. Disinfection Of Water
Water Res., Vol. 18, No. 11, Seite 1669 - 1678, 1983
- [83] G.E. Whitby, G. Palmateer
The Effect of UV-Transmission, Suspended Solids and Photoreactivation on Microorganisms in Wastewater treated with UV - Light
Wat. Sci. Tech., Vol 27, Seite 379-386, 1993
- [84] Antje Schöler
UV-Desinfektion von Kläranlagenabläufen unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses suspendierter Stoffe
Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Bd. 170, Dissertation, 2002
- [85] R.S. Schechter, E.H. Wissler
Photochemical Reactions in an Isothermal Laminar-Flow Chemical Reactor
Appl. Sci. Res., Section A, Vol 9, 1960
- [86] R.G. Qualls, M.P. Flynn, J.D. Johnson
The role of suspended particles in ultraviolet disinfection
Journal of WPCF Volume 55, Number 10, Seite 1280-1285, 1983
- [87] B.F. Severin, M.T. Suidan, R.S. Engelbrecht
Effects of Temperature on Ultraviolet Light Disinfection
Water Research, Vol. 18, No 11, Seite 1669-1678, 1983
- [88] R.G. Qualls, S.F. Ossow, J.C.H. Chang, M.H. Dorfman, C.H. Dumais, D.C. Lobe, J.D. Johnson
Factors controlling sensitivity in ultraviolet disinfection of secondary effluents
Journal WPCF, Volume 57, Nr. 10, Seite 1006-1011, 1985

- [89] B.F. Severin, M.T. Suidan, B.E. Rittmann, R.S. Engelbrecht
Inactivation kinetics in a flow - through UV reactor
Journal WPCF, Vol. 56, Nr. 2, Seite 164 - 169, Feb. 1984
- [90] B.F. Severin, M.T. Suidan, R.S. Engelbrecht
Mixing effects in UV disinfection
Journal WPCF, Vol. 56, Nr. 7, Seite 881 - 888, Jul. 1984
- [91] R.G. Qualls, J.D. Johnson
Modeling And Efficiency Of Ultraviolet Disinfection Systems
Water Res., Vol. 19, No. 8, Seite 1039 - 1046, 1985
- [92] G. Zukovs, J. Kollar, H.D. Monteith, K.W.A. Ho. S.A. Ross
Disinfection of low quality wastewaters by ultraviolet light irradiation
Journal WPCF, Vol. 58, Nr. 3, Seite 199 - 206, March 1986
- [93] P. Kreft, O.K. Scheible, A. Venosa
Hydraulik studies and cleaning evaluations of ultraviolet disinfection units
Journal WPCF, Vol. 59, Nr. 12, Seite 1129 - 1137, Dec. 1986
- [94] O.K. Scheible
Development of a rationally based design protocol for ultraviolet light disinfection process
Journal WPCF, Vol. 59, Nr. 1, Seite 26 - 31, Jan. 1987
- [95] G.O. Schenck
Ultraviolet Sterilization
W. Lorch „Handbook of Water Purification“
Ellis Horwood Ltd, Chichester, 1987, ISBN 0 85312 991 6
- [96] D. Meredith
Measurement and control
W. Lorch „Handbook of Water Purification“
Ellis Horwood Ltd, Chichester, 1987, ISBN 0 85312 991 6
- [97] A.H. Havelaar, C.C.E. Meulemans, W.M. Pot-Hogeboom, J. Koster
Inactivation Of Bacteriophage MS2 in Wastewater Effluent With Monochromatic and Polychromatic Ultraviolet Light
Water Res., Vol. 24, No. 11, Seite 1387 - 1393, 1990
- [98] Zh.J. Nieuwstad, A.H. Havelaar, M. van Olphen
Hydraulic And Microbiological Characterization Of Reactors For Ultraviolet Disinfection Of Secondary Wastewater Effluent
Water Res., Vol. 25, No. 7, Seite 775 - 783, 1991
- [99] Z.H. Abu Ghararah, H.A. Al Riyadh, H.Z. Sarikay
Disinfection of secondary treated domestic wastewater by ultraviolet radiation
Water Treatment, 7, Seite 307-324, 1992
- [100] K.R. Westerterp, W.P.M. van Swaaij, A.A.C.M. Beenackers
Chemical Reactor Design and Operation
John Wiley & Sons Ltd., Chichester, Feb. 1998, ISBN 0 471 91830 3

- [101] P.V. Dankwerts
Continuous flow systems - Distribution of residence Times
Chemical Engineering Science, February 1953, Seite 1-13
- [102] O. Levenspiel
Chemical Reaction Engineering
John Wiley & Sons Ltd., New York, 1999, ISBN 0 471 25424 X
- [103] O.K. Scheible, J.A. McGrath
ETV Wet-Wether Flow Technologies Pilot High-Rate Disinfection
US EPA, Edison, NJ, July 25, 2000
- [104] A. P. Flügge
Vergleich der photophysikalischen Eigenschaften verschiedener Triazin- und Benzotriazolverbindungen sowie deren Anwendbarkeit als UV-Absorber
Institut für Physikalische Chemie der Universität, Stuttgart, 2001, Dissertation
- [105] Ch. Gerthsen
Physik
Springer Verlag Berlin, 19. Auflage, 1997, ISBN 3-540-62988-2
- [106] M. von Ardenne, G. Musiol, S. Reball
Effekte der Physik und ihre Anwendungen
VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1988, ISBN 3-326-00035-9
- [107] R.J. Goldston, P.H. Rutherford
Plasmaphysik
Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1998
ISBN 3-528-06884-1
- [108] A. Rutscher, H. Deutsch
Wissenspeicher Plasmatechnik
VEB Fachbuchverlag Leipzig, Leipzig, 1983
- [109] B.M. Jaworski, A.A. Detlaf
Physik - Handbuch
Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main, 1986, ISBN 3 87 144 804 4
- [110] R. Rompe, M. Steenbeck
Der Plasmazustand der Gase
Ergebnisse der exakten Naturwissenschaft XVIII, Springer Verlag, Berlin 1939
- [111] R. Hippler, S. Pfau, M. Schmidt, K.H. Schoenbach
Low Temperature Plasma Physics - Fundamental Aspects and Applications
Wiley - VCH Verlag Berlin GmbH, Berlin, 2001, ISBN 3-527-28887-2
- [112] L.D. Landau, E.M. Lifschitz, L.P. Pitajewski
Physikalische Kinetik
Lehrbuch der Theoretischen Physik, Band 10, Akademie Verlag Berlin, Berlin 1983

- [113] R. Rompe, M. Steenbeck
Ergebnisse der Plasmaphysik und der Gaselektronik
Akademie Verlag Berlin, Bd I bis III, Berlin 1967, 1971, 1972,
- [114] L.H. Ahrens, S.R. Taylor
Spectrochemical Analysis
Pergamon Press, London - Paris, 2. Auflage, 1961
- [115] B. McNamara
Radiation in Plasmas
Lawrence Livermore National Laboratory U.S.A.
World Scientific Publishing Co. Pte Ltd., Singapore 1984, ISBN 9971-966-37-7
- [116] D. Gall
Current Topics in Light Source Technology for Lighting and Radiation
Advanced Engineering Materials, Vol. 3, No. 10, Oct. 2001
- [117] I.W. Boyd, J.-Y. Zhang
Photo-induced Large Area Growth of Dielectrics with Excimer Lamps
Mat. Res. Soc. Symp. Vol. 618, Materials Research Society, 2000
- [118] U. Kogelschatz, H. Esrom, J.-Y. Zhang, I.W. Boyd
High intensity sources of incoherent UV and VUV excimer radiation for low-temperature materials processing
Applied Surface Science. Vol. 168, Seite 29-36, 2000
- [119] I.N. Bronstein, K.A. Semedjajew, G. Musiol, H. Mühlig
Taschenbuch der Mathematik
Verlag Harri Deutsch, Frankfurt/M., 1997, 3. Auflage, ISBN 3-8181-2003-6
- [120] G. Bollrich, G. Preißler
Technische Hydromechanik (Band 1 und 2)
Verlag für Bauwesen GmbH, 1992, ISBN 3-345-00518-2
- [121] L.D. Landau, E. M. Lifschitz
Theoretische Physik - Hydrodynamik -
Lehrbuch der Theoretischen Physik, Band 6, Akademie Verlag Berlin; 1974
- [122] E. Truckenbrodt
Fluidmechanik -
Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide (Band 1)
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong 1989
ISBN 3-540-50222-X3.
- [123] J.A. Schetz, A.E. Fuhs
Fundamentals of Fluidmechanics
John Wiley & Sons, New York, 1999,
ISBN 0-471-34856-2

- [124] I.E. Idelchik
Handbook of Hydraulic Resistance
Springer Verlag, Berlin, 1986,
ISBN 3-540-15962-2
- [125] B. Klein
FEM Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode
Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1997,
ISBN 3-528-15125-0
- [126] S.V. Pantakar
Numerical Heat Transfer and Fluid Flow
Hemisphere Publishing Corporation, 1980,
ISBN 0-89116-522-3
- [127] G. Hamel
Mechanik der Kontinua
B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 1956,
- [128] W. Albring
Elementarvorgänge fluider Wirbelbewegungen
Akademie-Verlag, Berlin, 1981
- [129] B.E. Launder, D.B. Spalding
Lectures in Mathematical Models of Turbulence
Academic Press London and New York, 1972
ISBN 0-12-438050-6
- [130] B. E. Launder, D. B. Spalding
The Numerical Computation of Turbulent Flows
Computer Methods in appl. Mechanics and Engineering, Nr. 3, 269-289
North Holland Publishing Company, 1974
- [131] W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling
Numerical Recipes in C - The Art of Scientific Computing
Cambridge University Press, Cambridge, 1991,
ISBN 0-521-35465-X
- [132] Technische Dokumentation
FLOWSTAR - Analysis
Structural Research and Analysis Corp.
12121 Wilshire Boulevard, Los Angeles, California 90025, USA, 2001
- [133] Technische Dokumentation
FLOWPLUS - Analysis
Blue Ridge Numerics Inc.
2951 28th Street, Santa Monica, California 90405, USA, 2001
- [134] Technische Dokumentation
GEOSTAR - Analysis
Structural Research and Analysis Corp.
12121 Wilshire Boulevard, Los Angeles, California 90025, USA, 2001

- [135] Technische Dokumentation
COSMOS FloWorks - Tutorial
 Structural Research and Analysis Corp.
 12121 Wilshire Boulevard, Los Angeles, California 90025, USA, 2003
 Desktop Productivity Solutions GmbH, Berlin, 2004
- [136] Technische Dokumentation
COSMOS FloWorks - Fundamentals
 Structural Research and Analysis Corp.
 12121 Wilshire Boulevard, Los Angeles, California 90025, USA, 2003
 Desktop Productivity Solutions GmbH, Berlin, 2004
- [137] D.R. Polak, D.S. Weaver
Vortex Shedding in Normal Triangular Tube Arrays
 Journal of Fluids and Structures, Heft 9, Seite 1-18, 1995
- [138] D. Downey, D.K. Giles, M.J. Delwiche
Finite element analysis of particle and liquid flow through an ultraviolet reactor
 Computers and Electronics in Agriculture, Heft 21, Seite 81-105, 1998
- [139] W. Vieser, Th. Esch, F. Menter
Heat Transfer Predictions using Advanced Two-equation Turbulence Models
 CFX Technical Memorandum, AEA Technology, Otterfing, 11. 06. 2002
- [140] N.G. Wright, D.M. Hargreaves
The use of CFD in the evaluation of UV treatment systems
 Journal of Hydroinformatics, Vol. 3, Number 2, Seite 59-69, April 2001
- [141] C. Levecq, C. Féliers, P. Cervantes, C. de Traversay
Advantages of two complementary approaches for evaluation of UV system performance
 Proc., 2nd International Congress on UV Technologies, July 9-11, 2003. Vienna, Austria.
- [142] M. Orava, H. Pan, T. Ala Peijari
UV - Fluence Modelling in a Flow Through Reactor
 Proc., 2nd International Congress on UV Technologies, July 9-11, 2003. Vienna, Austria.
- [143] C. Tuan Ta
Compare performance of UV Reactors using the radiation Wall Concept
 Proc., 2nd International Congress on UV Technologies, July 9-11, 2003. Vienna, Austria.
- [144] A. Bruschi, F. Fedrigoni, A. Lucchelli, G. Bussetti
Evaluation of the Effective Disinfection Rate in UV Water Disinfection Modules: a Random Walk Approach
 Proc., 2nd International Congress on UV Technologies, July 9-11, 2003. Vienna, Austria.
- [145] P.E. Sanjay-Reddy, T. Dzurny
Coputational Fluid Dynamic Modeling of UV Reactors - A Critical Review
 Proc., 2nd International Congress on UV Technologies, July 9-11, 2003. Vienna, Austria.

- [146] H. Haferkorn
Optik - Physikalisch -technische Grundlagen und Anwendungen
 Wiley - VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2003,
 ISBN 3-527-40327-8
- [147] E. Hecht
Optik
 Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, Wien, 2001
 ISBN 3-486-24918-7
- [148] H. Paul
Lexikon der Optik
 Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg - Berlin, 2003,
 ISBN 3-8274-1422-9
- [149] L.D. Landau, E. M. Lifschitz
Theoretische Physik - Klassische Feldtheorie -
 Lehrbuch der Theoretischen Physik, Band 2, Akademie Verlag, Berlin; 1973
- [150] K.F. Novobatzky, T. Neugebauer
Theoretische Elektrizitätslehre und Wellenoptik
 VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1957
- [151] K. Simonyi
Theoretische Elektrotechnik
 VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1971
- [152] H. Landolt, R. Börnstein
Handbuch der Physik - Optische Konstante (Band II - 8)
 VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1971, 6. Auflage
- [153] Deutsche Normen (DIN 1349)
Durchgang optischer Strahlung durch Medien (Blatt 1)
 Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juni 1972
- [154] Deutsche Normen (DIN 5030)
Spektrale Strahlungsmessung (Teil 5)
 Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 1982
- [155] Deutsche Normen (DIN 5031)
Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik (Größen, Formelzeichen und Einheiten der Strahlungsphysik - Teil 1)
 Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 1982
- [156] Deutsche Normen (DIN 5031)
Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik (Strahlungsbewertung durch Empfänger - Teil 2)
 Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 1982

- [157] Deutsche Normen (DIN 5031)
Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik (Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik - Teil 3)
 Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 1982
- [158] Deutsche Normen (DIN 5031)
Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik (Wirkungsgrade - Teil 4)
 Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 1982
- [159] Deutsche Normen (DIN 5031)
Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik (Benennung der Wellenlängenbereiche - Teil 7)
 Beuth Verlag GmbH, Berlin, Jan. 1984
- [160] Deutsche Normen (DIN 5031)
Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik (Strahlungsphysikalische Begriffe und Konstanten - Teil 8)
 Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 1982
- [161] Deutsche Normen (DIN 5031)
Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik (Photobiologisch wirksame Strahlung, Größen, Kurzzeichen und Wirkungsspektren - Teil 10)
 Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 1982
- [162] Deutsche Normen (DIN 5036)
Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien (Begriffe, Kennzahlen - Teil I)
 Beuth Verlag GmbH, Berlin, Jul. 1978
- [163] Deutsche Normen (DIN 5036)
Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien (Meßverfahren für lichttechnische und spektrale strahlungsphysikalische Kennzahlen - Teil 3)
 Beuth Verlag GmbH, Berlin, Nov. 1979
- [164] A. Cabaj, R. Sommer
Measurement of ultraviolet radiation with biological doseimeters
 Radiation Protection Dosimetry, Vol 91, Nos 1-3, pp. 139-142, 2000
- [165] R. E. Maeder
Informatik für Mathematiker und Naturwissenschaftler
 Addison-Wesley (Deutschland) GmbH, Bonn, New York u.a., 1993,
 ISBN 3-89319-519-X
- [166] D. D. Wedensky
Partial Differential Equations with Matematica
 Addison-Wesley Publishers Ltd., 1993,
 ISBN 0-201-54409-1

- [167] A. Gray
Differentialgeometrie: klassische Theorie in moderner Darstellung
Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, Berlin, Oxford, 1994.
ISBN 3-86025-141-4
- [168] D.A. Arrowsmith, C.M. Place
Dynamische Systeme
Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, Berlin, Oxford, 1994.
ISBN 3-86025-308-5
- [169] T. Westermann
Mathematik für Ingenieure mit Maple (Band 1-2)
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1996 / 1997.
ISBN 3-540-61249-1 /-3
- [170] H. Triebel
Analysis und mathematische Physik
BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1981
VLN 294-375/23/84 LSV 1034
- [171] R. Courant, D. Hilbert
Methoden der mathematischen Physik
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1993.
ISBN 3-540-56796-8
- [172] K. Knopp
Theorie der unendlichen Reihen
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1996.
ISBN 3-540-59111-7
- [173] A. Heck
Introduction to MAPLE
Springer Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, 2003
ISBN 0-387-00230-8
- [174] D. Kreysig
Der Biofilm - Bildung, Eigenschaften und Wirkungen - Teil 1 und 2
GIT Verlag GmbH, Darmstadt, BIOforum 24, 2001, Seite 40-43, 338 - 341
- [175] A. Steinmann
Numerische Untersuchungen von kavitierenden Strömungen mit der CFX - Software
Zwischenbericht, CFX Berlin Software GmbH, Berlin 2002
- [176] A.A. Samarskij
Theorie der Differenzverfahren
Akademische Verlagsgesellschaft Geest&Portig K.-G., Leipzig 1984
- [177] R. Glowinski, P. LeTallec
Augmented Lagrangian and Operator-Splitting Methods in Nonlinear Mechanics
SIAM, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 1989
ISBN 0-89871-230-0

- [178] persönliche Mitteilung
TU Hannover, Institut für Werkstoffkunde, März, 2005
- [179] R.C. Smith, K.S. Baker
Optical properties of the clearest natural waters
Applied Optics, Vol 20, No. 2, 15. Jan. 1981, Seite 177-184

9. Abbildungsverzeichnis

Bild 3-1:	Einflussfaktoren auf die erfolgreiche Abtötung von Mikroorganismen	11
Bild 3-2:	Franck-Condon-Prinzip; starke, mittlere, schwache und sehr schwache Absorption schematisch dargestellt	12
Bild 3-3:	Emissionsspektrum eines Quecksilber-Niederdruckstrahlers NN 50/81	13
Bild 3-4:	Emissionsspektrum eines Quecksilber-Mitteldruckstrahlers DQ 2023	14
Bild 3-5:	Absorptionsspektrum der DNS und Proteine	14
Bild 3-6:	Absorptionsspektren von Tryptophan (Try), Tyrosine (Tyr), Phenylalanine (Phe), Cystine (Cys ₂), Cysteine (Cys), Histidin (His)	15
Bild 3-7:	Absorptionsbanden verschiedener Chromophoren, n. HARM [6], MASSCHELEIN [28]	15
Bild 3-8:	Grafische Zusammenstellung des Absorptionsspektrums der DNS und Tötung von <i>Escherichia coli</i> als Funktion der Wellenlänge	16
Bild 3-9:	Emissionsspektrum eines <i>multi-wave</i> - Strahlers NNI 120/84	18
Bild 3-10:	Dimerisierung des Thymins, n. LODISH et al. [24]	23
Bild 3-11:	<i>Point Source Summation Method</i> - PSS - Methode	33
Bild 3-12:	Isolinien des Strahlungsflusses Φ , nach ([20], [21], [23])	35
Bild 3-13:	Transmission von dest. Wasser im Vergleich mit Ethanol (p.a.)	36
Bild 3-14:	Bestrahlung H im Reaktor; verschiedenen Durchsätzen, turbulenter Strömungsansatz, parallele Strömungsschichten, Arbeiten ([20], [21])	41
Bild 3-15:	Darstellung des Reaktors {A-1-3}	47
Bild 3-16:	Darstellung des Reaktors {A-1-0}	47
Bild 3-17:	Darstellung des Reaktors {A-1-7}; {A<11221111>}	49
Bild 3-18:	Vollständiges Emissionsspektrum des Quecksilbers, n. Hellwege	51
Bild 3-19:	Schema des Mess- und Prüfstandes für UV - Reaktoren	57
Bild 4-1:	Extinktion von dest. Wasser	63
Bild 4-2:	Vergleich der Extinktionsmoduli dest. Wasser/Trinkwasser	64
Bild 4-3:	Hypothetische Bahnkurve des Volumenelementes durch V_{eff} des UV-Reaktors	66
Bild 4-4:	Zylindrische Strahlungsquellen, (multiple) MPSS - Methode	68
Bild 4-5:	Integration über die definierte Oberflächeneigenschaft der Plasma-Strahlungsquelle (und Tangentenmethode)	72
Bild 4-6:	Vertikaler Öffnungswinkel ω und Teilöffnungswinkel α in R^3	75
Bild 4-7:	Bestrahlungsstärke E_{St} ; $m_n=0,022[1/mm]$, $x_0=0$, $y_0=(33/43/53)$, $z_0=200$ [mm]	76
Bild 4-8:	Bestrahlungsstärke E_{St} ; $m_n=0,022[1/mm]$, $x_0=0$, $y_0=33$, $z_0=(438/200)$ [mm]	76
Bild 4-9:	Bestrahlungsstärke E_{St} ; $m_n=(0,011/0,022/0,044)[1/mm]$, $x_0=0$, $y_0=33$, $z_0=200$ in [mm]	76
Bild 4-10:	Relative spektrale Empfindlichkeit $s=s(\lambda)$, des photobiologischen Vorgangs, entspricht Sensibilität $k^*=k^*(\lambda)$	90

Bild 5-1:	Elektronisches Modell des Reaktors {A-1-0} - GEOSTAR - FLOWPLUS - Anfangsbedingungen am Zufluss (v_m) und Abfluss (p_0) symbolisch eingetragen.	96
Bild 5-2:	Elektronisches Modell des Reaktors {A-1-0} - SolidWorks - FloWorks verschieden Bahnen des Mikroorganismus eingetragen	96
Bild 5-3:	Bahnlinie c-23 des Mikroorganismus im Reaktor {A-1-0} - Auswahl	97
Bild 5-4:	Bahnlinie c-23 des Mikroorganismus im effektiven Bereich des Reaktors {A-1-0}	98
Bild 5-5:	Untersuchung des Bereiches L_{eff} mit der Projektions-Methode, A-1-0_c-23	99
Bild 5-6:	Untersuchung des Bereiches L_{eff} mit der Datensatz-Methode, A-1-0_c-23	99
Bild 5-7:	Wirbelbildung und Steitigkeit im Zufluss-Bereich des UV-Reaktors {A-1-0}	100
Bild 5-8:	Elektronisches Modell des Reaktors {A-1-7} - GEOSTAR - FLOWPLUS- Anfangsbedingungen am Zufluss (v_m) und Abfluss (p_0) symbolisch eingetragen.	101
Bild 5-9:	Elektronisches Modell des Reaktors {A-1-7} - SolidWorks - FloWorks	102
Bild 5-10:	Elektronisches Modell des Reaktors {A-1-7}b - SolidWorks - FloWorks, verschieden Bahnen des Mikroorganismus eingetragen	102
Bild 5-11:	Bahnlinie c-49ad des Mikroorganismus im Reaktor {A-1-7} - Auswahl	103
Bild 5-12:	Bahnlinie c-49ad des Mikroorganismus im Reaktor {A-1-7} - Bereich L_{eff}	104
Bild 5-13:	Kontinuität der Bahnlinie c-49ad des Mikroorganismus im Reaktor {A-1-7} - Projektions-Methode	105
Bild 5-14:	Bahnlinie c-1 des Mikroorganismus im Reaktor {A-1-7}b - Auswahl	105
Bild 5-15:	Bahnlinie c-3 des Mikroorganismus im Reaktor {A-1-7}b - Auswahl	106
Bild 5-16:	Stetigkeit Bahnlinie c-1 des Mikroorganismus im Reaktor {A-1-7}b - Auswahl	106
Bild 5-17:	Stetigkeit Bahnlinie c-3 des Mikroorganismus im Reaktor {A-1-7}b - Auswahl	107
Bild 5-18:	Untersuchung (Geschwindigkeit) des Nahbereiches des Zuflusses der UV-Reaktoren {A-1-7}	107
Bild 5-19:	Einfluss der Partikelgröße auf das Simulationsergebnis; 0,1 bis 0,000 1 mm	109
Bild 5-20:	Anwendung der Modelle turbulente Strömung, UV-Reaktor {A-1-0} (links) und UV-Reaktor {A-1-7} (rechts)	112
Bild 5-21:	Auswirkungen (Strömungsgeschwindigkeit) der Lochblechefolge im Reaktor nach SCHENCK und KOSCHITZKY	113

Bilder der Anlagen A1 bis A7

Bild A2-1: RTD-Methode, Signal: Tracer -ein- oder Tracer -aus-	2
Bild A2-2: Analyse des Tracer-Signals nach dem UV-Reaktor	2
Bild A3-1: Systematik der UV-Reaktoren	2
Bild A3-2: Festlegungen zur Bezeichnungsweise der Reaktorgeometrie	2
Bild A3-3 Systematik bekannter Reaktorkonstruktionen	15-24
Bild A4-1: Visualisierung der Verfahrensschritte Ellipse	2
Bild A4-2: Visualisierung der Verfahrensschritte zusammengesetzte Leitlinie	2
Bild A4-3: Ergebnisse der Berechnungen für eine Ellipse (Verfahrensdemonstration)	3
Bild A7-1: Vergleich der Modelle Anwendung auf Reaktor {A-1-0}	7
Bild A7-2: Vergleich der Modelle Anwendung auf Reaktor {A-1-7}	7
Bild A7-3: Vergleich der Modelle Anwendung auf Reaktor {A-1-7}b	7
Bild A7-4: Vergleich der Modelle Anwendung auf Reaktor {A-1-7}b - Details	7
Bild A7-5: Symbolische Darstellung der Wirkung der Bestrahlungsstärke E_{St} auf eine Elementarzelle im UV-Reaktor {A-1-0}; Position ($x_0=0, y_0=r_w=40, z_0=190$), Maße in [mm]	8

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Absorptionsmaxima der Chromophoren n. TURRO [26]	16
Tabelle 3-2:	Absorptionswellenlänge	17
Tabelle 3-3:	Bestrahlungs- (Dosis-) werte	22
Tabelle 3-4:	Bestrahlungswerte für die Inaktivierung von Einzelspezies	25
Tabelle 3-5:	Organismengruppen und Abmessungen	28
Tabelle 3-6:	Systematik der UV-Reaktor- Konstruktionen	48
Tabelle 3-7:	Bewährte UV- Reaktorkonstruktionen	48
Tabelle 3-8:	Firmenvergleich	49
Tabelle 3-9:	Vergleich von Strahlungsquellen-Quecksilber - (~)druckstrahlern	52
Tabelle 3-10:	Vergleich von Hochleistungsstrahlungsquellen	53
Tabelle 3-11:	EXCIMER - Strahler für Desinfektionszwecke und Extinktionswerte	55
Tabelle 5-1:	Werte-Vergleich; Anwendung auf Bahnen eines Mikroorganismus	110
Tabelle 5-2:	Werte-Vergleich; turbulenter Strömungsansatz # Schichtenströmung	111
Tabelle 5-3:	Untersuchung der Radien ausgewählter Mikroorganismen - Bahnen	112
<i>Tabellen in den Anlagen A1 bis A7</i>		
Tabelle A1-1	Bestrahlungs-(Dosis) werte (Summenwerte)	2-3
Tabelle A1-2	Bestrahlungswerte für die Inaktivierung von Einzelspezies	4-8
Tabelle A 2-1:	Parameter der RTD - Methode	3-4
Tabelle A3-1-1:	Systematik der UV-Reaktoren - Klasse {A} „geschlossen UV - Reaktoren“, Gruppe {1} „Zylinderförmige Reaktoren“	7-10
Tabelle A3-2-1:	Systematik der UV-Reaktoren - Klasse {A} „geschlossen UV - Reaktoren“, Gruppe {2} „Quaderförmige Reaktoren“	11
Tabelle A3-3-1:	Systematik der UV-Reaktoren - Klasse {B} „offene UV - Reaktoren“, Gruppe {1} „Rinnenförmige Reaktoren“	12
Tabelle A3-4-1:	Systematik der UV-Reaktoren - Klasse {B} „offene UV - Reaktoren“, Gruppe {2} „Kaskadenförmige Reaktoren“	13
Tabelle A3-5-1:	Systematik der UV-Reaktoren - Klasse {B} „offene UV - Reaktoren“, Gruppe {3} „Beckenförmige Reaktoren“	14
Tabelle A3-6	Tabellarische Aufstellung der Firmen-Korrespondenzen	25-26
Tabelle A4-1:	Mathematische Ansätze - Bereichs- und Integrationsgrenzen - Berechnung	4
Tabelle A4-2:	Mathematische Ansätze - Strahlungsberechnung in R^2	5
Tabelle A5-1:	Reynolds - Zahlen und Geschwindigkeitswerte u	2-3
Tabelle A5-2:	Beispielreaktoren - Parameter	4
Tabelle A5-3:	Beispielreaktoren - <u>Parameter für Berechnungen</u>	5
Tabelle A6-1:	Beurteilungsparameter - Auswahl von Mikroorganismus - Bahnen Reaktor {A-1-0}	2

Tabelle A6-2:	Beurteilungsparameter - Auswahl von Mikroorganismus - Bahnen Reaktor {A-1-7} und {A-1-7}b	3
Tabelle A6-3:	Statistik zur Mikroorganismus - Bahnen c23 im Reaktor {A-1-0} (beispielgebend)	4
Tabelle A6-4:	Bestrahlung H von Mikroorganismus - Bahnen im Reaktor {A-1-0} unter den angegebenen Strömungsverhältnissen (beispielgebend)	5
Tabelle A6-5:	Statistik zur Mikroorganismus - Bahnen c45 im Reaktor {A-1-7} (beispielgebend)	6
Tabelle A6-6:	Bestrahlung H von Mikroorganismus - Bahnen im Reaktor {A-1-7} unter den angegebenen Strömungsverhältnissen (beispielgebend)	7
Tabelle A6-7:	Statistik zur Mikroorganismus - Bahnen c3 im Reaktor {A-1-7}b (beispielgebend)	8
Tabelle A6-8:	Bestrahlung H von Mikroorganismus - Bahnen im Reaktor {A-1-7}b unter den angegebenen Strömungsverhältnissen (beispielgebend)	9
Tabelle A7-1:	Vergleich der Ansätze nach Gleichung (3.35), (3.20) und (3.22), PSS-Methode und <i>spread-sheet</i> -Variante des <i>GFM</i> ; {A-1-0}	2
Tabelle A7-2:	Vergleich der Ansätze nach Gleichung (3.35), (3.20) und (3.22), PSS-Methode und <i>spread-sheet</i> -Variante des <i>GFM</i> ; {A-1-7}	3
Tabelle A7-3:	Vergleich der Ansätze nach Gleichung (3.35), (3.20) und (3.22), PSS-Methode und <i>spread-sheet</i> -Variante des <i>GFM</i> ; {A-1-7}b	4
Tabelle A7-4:	Statistik der Anwendung der PSS-Methode; UV-Reaktor {A-1-0}	5
Tabelle A7-5:	Statistik der Anwendung der PSS-Methode; UV-Reaktor {A-1-7}	5
Tabelle A7-6:	Statistik der Anwendung der PSS-Methode; UV-Reaktor {A-1-7}b	5
Tabelle A7-7:	Statistik der Anwendung der <i>spread-sheet</i> -Variante der <i>GFM</i> ; {A-1-0}	6
Tabelle A7-8:	Statistik der Anwendung der <i>spread-sheet</i> -Variante der <i>GFM</i> ; {A-1-7}	6
Tabelle A7-9:	Statistik der Anwendung der <i>spread-sheet</i> -Variante der <i>GFM</i> ; {A-1-7}b	6

11. Verzeichnis der Anlagen

Anlage	Thematik	Seiten
Anlage 1:	MIKROBIOLOGIE - <i>Bestrahlungswerte und Bestrahlungswerte für Einzelspezies</i> -	A1: 1 - 8
Anlage 2:	RTD - METHODE - <i>Residence-Time-Distribution-Method</i> -	A2: 1 - 4
Anlage 3:	KLASSIFIZIERUNG von UV-Reaktor-Konstruktionen	A3: 1 - 28
Anlage 4:	TANGENTEN - METHODE	A4: 1 - 5
Anlage 5:	REYNOLDSSche Zahlen - Abmessungen	A5: 1 - 5
Anlage 6:	NUMERISCHE SIMULATION - <i>UV-Reaktoren {A-1-0}, {A-1-7} und {A-1-7}b</i> -	A6: 1 - 9
Anlage 7:	DISKUSSION DER RESULTATE - <i>Beispielgebend UV-Reaktoren {A-1-0}, {A-1-7} und {A-1-7}b</i> -	A7: 1 - 8

Danksagung

Vor allem gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. R. Koch, der meine Arbeit von der ersten Stunde an mit großem Interesse und Wohlwollen betreut hat. Stets war ich mir seines Rates sicher und ich hoffe, dass über den Abschluß der Promotion hinaus unsere fachliche Freundschaft erhalten bleibt und in viele Projektanträge mündet, welche auf der Basis meiner Arbeit stehen.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Reif, Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. R. Grabsky und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Berg für die große Mühe, die ermöglichten fachlichen Diskussionen und die wohlwollend gegebenen wertvollen Hinweise.

Besonderen Dank möchte ich den Mitarbeitern der *Desktop Productivity Solutions GmbH*, Berlin, Herrn Dipl.-Ing. Meyer, Herrn Dipl.-Ing. Müller und Frau Ing. Kaczmarek, aussprechen, die mich kurzfristig in ihr Team aufnahmen, mich im notwendigen Umfang in die Software SolidWorks und FloWorks einwiesen und vor allem die leistungsfähige Siemens - Rechentechnik zur Verfügung stellten.

Ein solcher Dank gebührt auch dem Geschäftsführer der Firma *BBPT Gesellschaft für physikalisch-technischen Gerätebau mbH*, Berlin - Adlershof, Herrn Dipl.-Ing. V. Dworak, der stets neben den ermutigenden Worten auch das eine oder andere Fachbuch, eine Dienstreise zu einem Kongreß und entsprechende Rechentechnik spendete bzw. kostenneutral zur Verfügung stellte.

Ich danke allen Kolleginnen und Kollegen der Fakultät 4, Lehrstuhl für Wassertechnik, an der BTU Cottbus für die rege Teilnahme an meinen Vortragsreihen und den einen oder anderen Hinweis, der sich im Zuge der Bearbeitung stets als nützlich und inspirierend erwies.

Ich bedanke mich bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der „Zentralen Bibliothek für Umwelt“ auf dem WISTA - Gelände in Berlin Adlershof, besonders bei Frau Große und Herrn Schildmann, die ab 2003 personell und mit dem ganzen Bücherbestand in das *Erwin - Schrödinger - Zentrum* der Humboldt - Universität - Berlin eingegliedert wurden, für ihre große Unterstützung in allen Fragen der Literatur und Recherchen.

Last but not least möchte ich meiner Familie - meiner Frau Elisabeth und den Kindern Michael und Katharina - danken für das Verständnis, für die Geduld und auch für den Verzicht auf den Vater, wenn das eine oder andere familiäre Vorhaben angesetzt war.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Außerdem erkläre ich, dass ich weder an inländischen noch ausländischen Bildungseinrichtungen mit Promotionsrecht Anträge auf Promotion gestellt habe. Das nunmehr von mir angestrebte Verfahren ist das erste in meiner wissenschaftlichen Laufbahn.

Abschließend erkläre ich, dass die in der Dissertation dargelegten Verfahren und Prinzipien von mir persönlich unter Berücksichtigung der Erklärungen zur Selbständigkeit und zu den Hilfsmitteln entwickelt und aufgestellt wurden.

Schutzrechte anderer werden nicht verletzt.

Berlin / Cottbus, im Monat Mai 2005

Norbert B. Knieling

Thesen zur Arbeit

1. Trinkwasser stellt das erste Lebensmittel dar. Es wird aus Süßwasser gewonnen und muss vor seinem Gebrauch aufbereitet werden. Eine kostengünstige Methode mikrobiologische auf den Menschen pathogen wirkende Keime zu vernichten, ist die Anwendung der UV-Strahlung im Aufbereitungsprozess.
2. Benutztes Trinkwasser fällt als Abwasser an und wird in Kläranlagen aufbereitet, bevor es in die Natur zurückgegeben wird. Abwasser enthält außerordentlich große Zahlen verschiedenster und gefährlicher Spezies. Diese sind ebenfalls vorsorglich zu vernichten. Die Chlorung weist gravierende Nachteile auf, da die Natur und der Mensch durch Chlor und Chlor-Reaktionsprodukte belastet und gefährdet werden. Die UV-Desinfektion von Abwasser stellt hier ebenfalls eine kostengünstige und umweltschonende Alternative dar.
3. Die Desinfektion von Trinkwasser und Abwasser findet technisch in UV-Reaktoren statt. In diesen beeinflussen eine Vielzahl von Faktoren die Desinfektionsprozesse. Diese Faktoren werden in der Arbeit hinsichtlich ihres Einflusses auf die UV-Desinfektion bewertet.
4. Die auf der Literaturlauswertung basierenden Untersuchungen offenbaren eine aus der Vergangenheit bis in die Gegenwart reichende weitestgehend voneinander gelöste theoretische und experimentelle Arbeitsweise hinsichtlich der mathematischen Beschreibung der Vorgänge. Sehr viele Arbeiten stammen aus dem Bereich der Mikrobiologie, Molekularbiologie, Biochemie und Biophysik. Wenige Arbeiten stammen aus der Fluidmechanik und dem Bereich der UV-Reaktorkonstruktion. Die wissenschaftlich befriedigende Untersuchung und der Aufbau eines prognosefähigen Modells ist nicht allein mit den Kenntnissen und Methoden aus nur einem Fachgebiet möglich.
5. Die Literatur führt aus, dass das Absorptionsspektrum der DNS entscheidend für die Einschätzung der Effizienz der Abtötung pathogener mikrobiologischer Spezies ist. Allerdings gibt es weitere molekularbiologische Zellbausteine deren Absorptionsspektren ebenfalls zur Einschätzung herangezogen werden müssen (RNS, Proteine, Chromophoren). Auch wenn ein durchschnittlicher Wert der Bestrahlung ($H = 40 \text{ [mJ/cm}^2\text{]}$) auf nur einer Wellenlänge $\lambda = 253,7\text{nm}$) für eine sichere Desinfektion von Trinkwasser in der Literatur angegeben wird, ist das Erreichen dieses Wertes im Modellzusammenhang und unter den definierten Voraussetzungen einzeln zu bewerten.
6. Weite Verbreitung in der Praxis haben Ansätze zur Berechnung der Bestrahlungsstärke, die zwar unter verschiedenen Ausgangssituationen formuliert wurden, in ihrem Kern jedoch eine unendlich lange Linienstrahlungsquelle als Näherung für die Plasmastrahlungsquelle verwenden und sich auf zylindersymmetrische Verhältnisse in der Betrachtungsebene bzw. Aufenthaltsebene des Mikroorganismus beziehen. Als prinzipieller Mangel dieser Ansätze sind

berechnet Werte im Reaktor zu klein und Werte im Bereich der Zuflüsse und Abflüsse zu groß.

7. Bislang berücksichtigt die PSS -Methode als einziges Modell auch die Strahlungsanteile bei der Berechnung der Bestrahlungsstärke E_{St} , deren Quellen außerhalb der Aufenthaltsebene des Mikroorganismus liegen. Gleichwohl ist eine Linienstrahlungsquelle der Kern dieses Modells.
8. Die sich im UV-Reaktor ausbildenden Strömungsverhältnisse werden unzureichend berücksichtigt. Der sogenannte *plug-flow* und der davon abgeleitete UV-Reaktor sind eine unbefriedigende Modellbildung, da sich hinter dieser eine Verdrängungsströmung verbirgt, deren Geschwindigkeitsprofil über den freien Reaktorquerschnitt einer Konstanten entspricht, die aus dem Reaktorquerschnitt und dem Durchsatz berechnet wird. Die Annahme einer derartigen Verdrängungsströmung mit idealer Quervermischung ist experimentell nicht zu verwirklichen und tritt in der Praxis nicht auf. Es ist riskant, darauf aufbauend die Expositionszeit und schließlich die Bestrahlung (Dosis) zu berechnen
9. in der vorgelegten Arbeit werden mikrobiologische, biophysikalische, optische und fluidmechanische Ansätze von einem theoretischen Standpunkt aus vereint. Da biologische, optische und fluidmechanische Effekte den Desinfektionserfolg bzw. den Erfolg der Inhibierung der Mikroorganismen bestimmen, verfügt das entwickelte **Gekoppelte Fluidmechanische Modell (GFM)** über eine *mikrobiologische - (biophysikalische) Modellkomponente*, eine *reaktoroptische Modellkomponente* und eine *fluidmechanische (reaktorhydraulische) Modellkomponente*. Eine die Komponenten verbindende Verfahrensgleichung wurde abgeleitet.
10. Die Bestrahlung H wird über Bestrahlungsstärke E_{St} und die Expositionszeit t_{Ex} definiert. In der vorgelegten Arbeit wird diese Definition erweitert indem die Definition der effektiven Bahnlänge, die Geschwindigkeit einer hypothetischen *Elementarzelle* und die relative spektrale Sensibilität des photobiologischen Vorgangs eingeführt werden. Die reaktoroptische Komponente des *Gekoppelten Fluidmechanischen Modells* betrachtet die Plasmastrahlungsquelle als geraden Kreiszyylinder mit einer strahlenden Oberfläche.
11. Mit der in der Arbeit entwickelten *Tangentenmethode* wird der Anteil der Oberfläche der Plasmastrahlungsquelle bestimmt, welcher tatsächlich den Mikroorganismus bestrahlt. Es wird gezeigt, dass diese Methode auf gerade Zylinder mit einem Kreis als Querschnitt, auf gerade Zylinder mit elliptischen Querschnitt und gerade Zylinder mit einem Querschnitt aus zusammengesetzten analytische gegebenen Funktionen angewendet werden kann. In diesem Fall ist der Strahlungsanteil zusätzlich vom radialen Winkel abhängig. Somit ist das *Gekoppelte Fluidmechanische Modell* auf alle Plasmastrahlungsquellen anwendbar, auch auf die zukünftigen, welche über eine beliebige Geometrie verfügen werden.

12. Die fluidmechanische Komponente des *Gekoppelten Fluidmechanischen Modells* baut auf kontinuumsmechanischen Vorstellungen und Ergebnissen der Elastomechanik auf. Der Begriff der *Elementarzelle* auf der Grundlage des Volumenelementes wird eingeführt und eine Definition des Begriffs gegeben. Die Diskussion der *Navier-Stokesschen* partiellen Differentialgleichungen und deren kontinuumsmechanischen Ableitung vervollständigen das Bild über die *Elementarzelle*. Es wird die Forderung nach der *Erhaltung der Zellwände der Elementarzelle* aufgestellt und begründet.
13. In der Praxis des UV-Reaktorbaus gibt es eine Vielzahl von Konstruktionen. Über eine in der vorgelegten Arbeit entwickelte Methodik werden die Reaktorkonstruktionen vieler, hauptsächlich europäischer, Hersteller klassifiziert und bewertet. Auf diese Weise wurden die UV-Reaktorkonstruktionen bestimmt, die in der Praxis die häufigste Verbreitung aufweisen. Es handelt sich dabei um die UV-Reaktoren mit der Klassifikation {A-1-7}, {A-1-3}, {A-1-11} und {A-1-8}.
14. Die numerische Simulation der Bewegung der *Elementarzelle* im Zusammenhang mit dem *Gekoppelten Fluidmechanischen Modell* erfolgt unter Anwendung der *HENDERSONSchen Gleichung*. Für die Berechnungen wurden mehrere unabhängige kommerziellen Softwarepakete verwendet. Als Beispiele wurde das *Gekoppelte Fluidmechanische Modell* auf den in der Dissertation definierten theoretischen, in der Praxis nicht existierenden, idealen Reaktor, Klassifikation {A-1-0}, und auf zwei Ausführungen des häufigsten Praxis - Reaktors, Klassifikation {A-1-7} angewendet.
15. Die Bahnlänge der *Elementarzelle* im Fluidraum des UV-Reaktors und deren Aufenthaltszeit im Fluidraum werden der effektiven Länge L_{eff} des Reaktors und der Expositionszeit t_{Ex} gegenübergestellt und diskutiert. Die *Projektionsmethode* und *Datensatzmethode* zur numerischen Bestimmung der Bahnanteile des Mikroorganismus im effektiven Bereich des Fluidraumes im UV - Reaktor werden begründet, angewendet und visualisiert. Die Größe der *Elementarzelle* ist hinreichend klein um einen Mikroorganismus zu simulieren.
16. In numerischen Simulationen und Berechnungen werden die Gleichungen basierend auf den Modellvorstellungen der Linienstrahlungsquelle, der PSS-Methode und das *Gekoppelte Fluidmechanische Modell* auf die UV-Reaktorkonstruktionen, Klassifikation {A-1-0}, und auf zwei Ausführungen des Praxis - Reaktors, Klassifikation {A-1-7}, angewendet und gegenüber gestellt.

17. Die Arbeit gibt Empfehlungen für weiterführende und bestätigende Experimente sowie zur technischen Verbesserung der UV-Sensorik und der Strahlerkonstruktionen. Diese sind mehrseitige Bestrahlungsexperimente, ausgedehnte Sensibilitätsmessungen zur Bestimmung des Wertes k^* und Messungen der relativen spektralen Sensibilität $s=s(\lambda)$, des Wirkungsgrades, zu den fluidmechanischen Widerstandsbeiwerten, zur konstruktiven Auslegung der UV-Sensoren und der Gestaltung der Geometrie neuartiger Strahlungsquellen.
18. Auf der Basis des *Gekoppelten Fluidmechanischen Modells* ist es jetzt möglich, eigenständige Numerik - Programme zu schreiben, bzw. das Modell in eine bereits existierende CFD - Software einzubinden. Dadurch können die einzelnen UV-Reaktorkonstruktionen erstmals vor den Prüfstand-Untersuchungen intensiv theoretisch erprobt werden. Diese Arbeitsweise hilft Bearbeitungszeit und den Aufwand für die umfangreiche experimentelle Erprobung zu verringern und somit allgemein Kosten einzusparen.

Anlage 1 # MIKROBIOLOGIE

- Bestrahlungswerte und Bestrahlungswerte für Einzelspezies -

Ziel:	Übersicht der (Summen-) Bestrahlungswerte und Bestrahlungswerte für die Inhibierung von Einzelspezies
Prinzip:	<p>In mikrobiologischen Experimenten werden unter Einfluss eines Bestrahlungswertes H bzw. einer Dosis die Anzahl der überlebenden Organismen bestimmt. Die Bestimmung des Bestrahlungswertes H erfolgt rechnerisch aus den Messwerten der zeitlich konstant angenommenen Bestrahlungsstärke E_{St} und der Expositionszeit t_{Ex} durch Produktbildung.</p> <p>Die Messung erfolgt hauptsächlich in solchen statischen Experimenten und seltener in dynamischen Experimenten (gerührter UV-Reaktor / Durchfluss-UV-Reaktor).</p>
Weiterführende Literatur:	Für die Erstellung der hier angegebenen Tabellen wurde die in der Arbeit herangezogene Literatur verwendet.

Die Definition des Reduktionsfaktors RF befindet sich in der Arbeit, Unterabschnitt 3.1.3., Gleichung (3.12). In den Reduktionsfaktor gehen die Anzahl der Spezies vor der Behandlung N_0 und die Anzahl der Spezies nach der Behandlung N ein. Diese Werte lassen sich auch beispielsweise über die *Chick-Watson-Relation* berechnen. Dafür wird ein Inaktivierungskoeffizient k benötigt, der ebenfalls durch mikrobiologische Experimente bestimmbar ist.

Tabelle A(nlage) 1-1: Bestrahlungs- (Dosis-) werte (Summenwert), die laut Fachliteratur eine sichere Desinfektion garantieren

Zitat	Quelle: Autor/en und Referenz	Bestrahlung in mJ/cm ²	Einschränkungen Organismus / Kommentare
1	H. MARTINY [4]	5 < H < 20 12 < H < 37	Reduktion um 5 log - Stufen Reduktion um 6 log - Stufen Aufschlüsselung auf Organismen, siehe Tabelle dazu
2	Clemens v. SONNTAG [5]	1,3 < H < 19,7 6,0 < H < 8,0 5 < H < 132	Unterteilt nach Bakterien, Hefen, Pilze (Schimmelpilz)
3	W. HARM [6]	H = 2,25 H = 4,5	Untersucht einzelne Species, Einzelwerte, Phagen T2 und T4 auf E. coli.
4	P. GELZHÄUSER [10]	H = 25	Summenwert für eine ausreichende Desinfektion von Trinkwasser
5	BERNHARDT [12]	H _N = 40	Summenwert für eine ausreichende Desinfektion von Trinkwasser über 4 log Stufen
6	P. SCHLEYPEN, H. LOY [13]	50 < H < 90	50mJ/cm ² ausreichend für 3 log Stufen Reduktion von coliformen Bakterien, Transmission min. 70 - 80 %
7	DVGW Regelwerk W293 [15], [17]	H _N = 40	auf den Wellenlängenbereich 240 bis 290 nm verteilt
8	DVGW Regelwerk W294 [16], [17]	H _N = 40	Standard - Laborbestrahlung mit Hg -Niederdruckstrahler bei einer Wellenlänge von 253,7 nm
9	ÖNORM [18]	H _N = 40	bezogen auf eine Strahlung mit einer Wellenlänge von 253,7 nm
10	FIGAWA TM 20-98 [19]	H _N = 40	Bezug auf die Dokumente [15], [16], [17] und [18]
11	ATV - Regelwerk ATV - M205[29]	30 < H _N < 45	Bezug zur sicheren Einhaltung der Grenz- und Leitwerte der EG Badegewässer - Richtlinie für biologisch gereinigtes Abwasser. Gehalt abfiltrierbare Stoffe 5-20mg/l und Transmission 55 - 60 %.
12	FIGAWA - AK „UV- Wasserbehandlung [30]	H _N = 40	Bestrahlung für die sichere Reduktion von trinkwasserrelevanten keimen um min. 4 Zehnerpotenzen
13	O. HOYER [28]	H _N = 40 (H = 25)	Mindestanforderung für die Inaktivierung der wichtigsten pathogenen Keime um > Dekaden durch UV Licht der Wellenlänge 254 nm. Der Klammerausdruck ist veraltet und galt für die Inaktivierung von E. coli.
14	R. JASCHINSKI, A. KOLCH [32]	H _N = 40	„...für die Hygienisierung notwendige Dosis.“
15	A. KOLCH [34]	H _N = 40 (H = 25)	Bei einem einmaligen Durchfluß durch eine UV - Anlage. Wird das Wasser mehrfach zyklisch bestrahlt so reicht eine geringe „Dosis“, die sich summiert. (gefährlich!!)
16	E. R. BLATCHLEY [35]	1. H = 48 (= 60) 2. H = 120 3. 100 < H < 140	gefiltrertes (bzw. nicht gefiltrertes Abwasser) aus Kläranlagen für max. 23 KBE/100ml. Berechneter Wert bei welchem die KBE unterhalb der Nachweisgrenzen lagen. Dosis eines zitierten Autors (CHEN et al.)

Tabelle A(nlage) 1-1: Bestrahlungs- (Dosis-) werte (Summenwert), die laut Fachliteratur eine sichere Desinfektion garantieren (Fortsetzung)

Zitat	Quelle: Autor/en und Referenz	Bestrahlung in mJ/cm ²	Einschränkungen Organismus / Kommentare
17	K.-U. RUDOLPH, Th. NELLE, Ch. OBERG [38]	$10 < H < 150$	Reduktion abwasserrelevanter Bakterien um 3 Zehnerpotenzen; laut Fachliteratur
18	H. BERNHARDT et al. [40]	$H_N = 25$	in den noch laufenden Untersuchungen wird festgestellt werden, ob dieser Wert sicher ist.
19	H.-J. MORISKE, H. RÜDEN [44]	$H_N = 25$	genannte UV - „Dosis genügt um fakultativ und obligat pathogene Mikroorganismen abzutöten. Ab 75 mJ/cm ² nehmen die Mutagenitätsraten bei den Stämmen TA 98 und TA 100 zu.
20	D. SCHOENEN et al.	$H_N = 30$	aus „Untersuchungen zur hygienischen Sicherheit der Trinkwasserdesinfektion mit UV - Strahlen“ DVGW Schriftreihe Wasser Nr. 108, Eschborn
21	H. MARTINY et al. [47]	$H_N = 25$	Mindestbestrahlungs- „Dosis“
22	C. JONAS [50]	$H_N = 25$	Empfohlene Dosis, (Anwendung im Experiment 282 mJ/cm ²)
23	P. GELZHÄUSER [51]	$H = 150$	Mindestbestrahlung für Abwasser aus Kläranlagen
24	H. MARTINY et al. [54]	$10 < H < 86$	Es werden Mindestbestrahlungswerte (Dosen) für einzelne Organismen genannt. Hier Werte für 5 log - Stufen.
25	G.D. HARRIS et al. [55]	$5 < H < 45$	Es werden Mindestbestrahlungswerte (Dosen) für einzelne Organismen genannt. Hier Werte für 3 log - Stufen. Photoreaktivierung wird nicht berücksichtigt.
26	G.D. HARRIS et al. [58]	$H = 5$	Bestrahlung, die in der exp. Arbeit verwendet wurde.
27	J.S. SLADE et al. [60]	$H = 25$	eingestellte Apparatekonstante mit welcher gearbeitet wurde. Gleicher Desinfektionserfolg, wie die Anwendung von Chlor 1,5 mg / l.
28	G. ZUKOVŠ et al. [62]	$126 < H < 480$	Betriebswerte in einem Desinfektionsbecken eines Kläranlagenabflusses. Dieser wurde für Felduntersuchungen genutzt.
29	J.D. JOHNSON, R.G. QUALLS [68]	$10 < H < 80$ $H = 30$ $H = 21$	Literaturwerte zitiert hauptsächlich E. coli, Gesamt Coli Bacillus subtilis Sporen um 4 log - Stufen Gesamt Coli um 4 log - Stufen
30	O.K. SCHEIBLE C.D. BASSELL [69]	$H = 130$	es werden durchschnittliche Reduktionsraten angegeben 240 000 auf 109 Gesamt Coli 71 000 auf 28 Gesamt Fäkale Die Aussagen beziehen sich auf das Abwasser von Kläranlagen
31	B.F. SEVERIN [70]	$H = 35$ $41,2 < H < 103$	Herstellerangaben der Apparatur zur Desinfektion von Trinkwasser Experimentell eingebrachte Bestrahlung an Proben aus dem Abwasser von Kläranlagen für eine 4 log Stufen Reduktion
32	E. NOLDE, W. DOTT [75]	$H = 143,5$	Versuch mit Grauwasser, Reduktionswerte von einzelnen Species werden angegeben

Tabelle A 1-2: Bestrahlungswerte für die Inaktivierung von Einzelspezies

Gruppe	Organismus	Farbe	Bestrahlung H [mJ]cm ²	RF -Faktor	Quelle	Referenz	Jahr	Kommentar
Algen	<i>Blaualgen</i>		300,00	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht, HG-MD-Strahlungsquelle
Algen	<i>Blaualgen</i>		600,00					
Algen	<i>Chlorella vulgaris</i>		14,00	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht, HG-MD-Strahlungsquelle
Algen	<i>Grünalgen</i>		360,00-600,00	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht, HG-MD-Strahlungsquelle
Bacteria	<i>Aerobacter aeromonas</i>		5,00	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht, HG-MD-Strahlungsquelle
Bacteria	<i>Bacillus anthracis</i>		4,50		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Bacillus anthracis</i>		4,50	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Bacillus dysenteriae</i>		2,20		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Bacillus megatherium sp. (spores)</i>		2,70		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Bacillus megatherium sp. (veg.)</i>		1,30		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Bacillus paratyphosus</i>		3,20		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Bacillus paratyphosus</i>		3,20	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Bacillus subtilis</i>		5,80		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Bacillus subtilis spores</i>		30,00-40,00	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht, HG-MD-Strahlungsquelle
Bacteria	<i>Bacillus subtilis spores</i>		8,00-12,00	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein		2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Bacillus subtilis spores</i>		11,60		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Bacillus subtilis spores</i>		30,11	RF(lg) = -4	J.D. Johnson et al.	[72]	1984	Präparation der Organismen in der Arbeit
Bacteria	<i>Bacterium megaterium (spores)</i>		2,80	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Bacterium megaterium (vegetativ)</i>		1,10	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Bacterium prodigiosus</i>		0,70	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Candida albicans (A6 011165)</i>		143,50	RF(lg) = -4,03	E. Nolde et al.	[75]	1991	Versuche mit Referenzstämmen in Grauwasser, dynamisch
Bacteria	<i>Citrobacter freundii</i>		3,0-4,0	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Citrobacter freundii</i>		11,85	RF(lg) = -3,92	H. Martiny	[4]	1991	T = 84,4%; TW kalt; Reaktor A
Bacteria	<i>Citrobacter freundii</i>		43,15	RF(lg) = -4,09	H. Martiny	[4]	1991	T = 77,0%; TW kalt; Reaktor B
Bacteria	<i>Corynebacterium diphtheriae</i>		3,40		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Corynebacterium diphtheriae</i>		3,40	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht

Tabelle A1-2: Bestrahlungswerte für die Inaktivierung von Einzelspezies (Fortsetzung)

Gruppe	Organismus	Farbe	Bestrahlung H [mJ/cm ²]	RF -Faktor	Quelle	Referenz	Jahr	Kommentar
Bacteria	<i>Dysneteri bacilli</i>		2,20	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Eberthella typhosa</i>		2,10		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Eberthella typhosa</i>		2,10	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Enterobacter cloacae</i>		10,44	RF(lg) = -4,08	H. Martiny	[4]	1991	T = 80,6%; TW kalt; Reaktor A
Bacteria	<i>Enterobacter cloacae</i>		26,27	RF(lg) = -4,08	H. Martiny	[4]	1991	T = 79,02%; TW kalt; Reaktor B
Bacteria	<i>Enterobacter cloacae</i> (ATCC 13047)		6,50	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Enterococcus faecalis</i> (ATCC 19433)		8,00	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Enterococcus faecium</i>		7,53	RF(lg) = -4,13	H. Martiny	[4]	1991	T = 70,9%; TW kalt
Bacteria	<i>Enterococcus faecium</i>		25,64	RF(lg) = -3,70	H. Martiny	[4]	1991	T = 78,6%; TW kalt; Reaktor A
Bacteria	<i>Escherichia coli</i>		3,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Escherichia coli</i>		3,00	RF(lg) = -4	J.D. Johnson et al.	[72]	1984	Präparation der Organismen in der Arbeit
Bacteria	<i>Escherichia coli</i>		16,66	RF(lg) = -4,06	H. Martiny	[4]	1991	T= 76,9%; TW kalt; Reaktor A
Bacteria	<i>Escherichia coli</i>		19,78	RF(lg) = -4,51	H. Martiny	[4]	1991	T = 78,9%; TW kalt; 12,5°C; Reaktor A
Bacteria	<i>Escherichia coli</i>		19,78	RF(lg) = -4,65	H. Martiny	[4]	1991	T = 78,7%; TW kalt; 32,5°C; Reaktor A
Bacteria	<i>Escherichia coli</i>		19,97	RF(lg) = -4,13	H. Martiny	[4]	1991	T = 79,2%; TW kalt; 32,5°C; Reaktor A
Bacteria	<i>Escherichia coli</i>		20,00	RF(lg) = -4	A.H. Havelaar et al.	[57]	1987	dynamisch im Flachbettreaktor
Bacteria	<i>Escherichia coli</i>		25,85	RF(lg) = -5,17	H. Martiny	[4]	1991	T= 78,8%; TW kalt; Reaktor B
Bacteria	<i>Escherichia coli</i> (ATCC 11229)		8,57	RF(lg) = -4	Bernhardt et al.	[12]	1993	Petrischalen Standardisierung, Bonn - Wiener - Versuche
Bacteria	<i>Escherichia coli</i> (ATCC 11229)		23,57	RF(lg) = -4	Bernhardt et al.	[12]	1990	Quarz - Küvetten
Bacteria	<i>Escherichia coli</i> (ATCC 11229)		2,50	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Escherichia coli</i> (ATCC 11229)		5,00	RF(lg) = -4	G.D. Harris et al.	[58]	1987	ohne Photoreaktivierung
Bacteria	<i>Escherichia coli</i> (ATCC 11229)		10,69	RF(lg) = -3	G.D. Harris et al.	[58]	1987	mit Photoreaktivierung
Bacteria	<i>Escherichia coli</i> (K12 A8 XII)		143,50	RF(lg) = -7,43	E. Nolde et al.	[75]	1991	Versuche mit Referenzstämmen in Grauwasser, dynamisch
Bacteria	<i>Escherichia coli</i> (wild)		5,00	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Escherichia coli</i> (wild)		5,00	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht, HG-MD-Strahlungsquelle
Bacteria	<i>Klebsiella pneumoniae</i>		2,50	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Klebsiella pneumoniae</i>		9,33	RF(lg) = -4,84	H. Martiny	[4]	1991	T =77,1%; TW kalt; Reaktor A
Bacteria	<i>Klebsiella pneumoniae</i>		25,85	RF(lg) = -4,39	H. Martiny	[4]	1991	T =78,8%; TW kalt; Reaktor B
Bacteria	<i>Klebsiella pneumoniae</i> (A10 7799 III)		143,50	RF(lg) = -6,26	E. Nolde et al.	[75]	1991	Versuche mit Referenzstämmen in Grauwasser, dynamisch

Tabelle A1-2: Bestrahlungswerte für die Inaktivierung von Einzelspezies (Fortsetzung)

Gruppe	Organismus	Farbe	Bestrahlung H [mJ/cm ²]	RF -Faktor	Quelle	Referenz	Jahr	Kommentar
Bacteria	<i>Legionella pneumophila</i>		2,0-5,0	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht, Hg-MD-Strahlungsquelle
Bacteria	<i>Legionella pneumophila</i>		0,92	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Legionella pneumophila</i>		9,70	RF(lg) = -4,87	H. Martiny	[4]	1991	T =78,3%; TW kalt; Reaktor B, Hungermedium
Bacteria	<i>Legionella pneumophila</i>		10,87	RF(lg) = -4,38	H. Martiny	[4]	1991	T =81,9%; TW kalt; Reaktor A
Bacteria	<i>Micrococcus candidus</i>		6,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Micrococcus candidus</i>			RF(lg) = -1	W.J. Masschelein		2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Micrococcus spaeroides</i>		10,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Neisseria cattarrhalis</i>		4,40		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Neisseria cattarrhalis</i>		4,40	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Phytomonas tumefaciens</i>		4,40		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Phytomonas tumefaciens</i>		4,40	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Proteus vulgaris</i>		2,70	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Proteus vulgaris</i>		3,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>		5,0-6,0	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht, HG-MD-Strahlungsquelle
Bacteria	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>		5,50		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>		5,50	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Pseudomonas aeruginosa (PII B 16853 A1)</i>		143,50	RF(lg) = -5,6	E. Nolde et al.	[75]	1991	Versuche mit Referenzstämmen in Grauwasser, dynamisch
Bacteria	<i>Pseudomonas fluorescens</i>		3,50		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Pseudomonas fluorescens</i>		3,50	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Salmonella enteritidis</i>		4,00	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Salmonella enteritidis</i>		4,50		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Salmonella enteritidis</i>		10,97	RF(lg) = -4,45	H. Martiny	[4]	1991	T =82,2%; TW kalt; Reaktor A
Bacteria	<i>Salmonella enteritidis</i>		25,85	RF(lg) = -4,64	H. Martiny	[4]	1991	T =78,8%; TW kalt; Reaktor B
Bacteria	<i>Salmonella spec. (F6 0893176 VI)</i>		143,50	RF(lg) = -5,93	E. Nolde et al.	[75]	1991	Versuche mit Referenzstämmen in Grauwasser, dynamisch
Bacteria	<i>Salmonella typhi (ATC19430)</i>		2,50	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Salmonella typhimurium</i>		4,80	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Salmonella typhimurium</i>		8,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Salmonella typhimurium</i>		8,00	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht

Tabelle A1-2: Bestrahlungswerte für die Inaktivierung von Einzelspezies (Fortsetzung)

Gruppe	Organismus	Farbe	Bestrahlung H [mJ/cm ²]	RF -Faktor	Quelle	Referenz	Jahr	Kommentar
Bacteria	<i>Sarcina lutea</i>		19,70		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Serratia marcescens</i>		2,40		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Serratia marcescens</i>		2,50	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Serratia marcescens</i>		11,36	RF(lg) = -5,30	H. Martiny	[4]	1991	T =83,3%; TW kalt; Reaktor A
Bacteria	<i>Serratia marcescens</i>		72,84	RF(lg) = -4,43	H. Martiny	[4]	1991	T =73,0%; TW kalt; Reaktor B
Bacteria	<i>Shigella paradysenteriae</i>		1,70		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Shigella paradysenteriae</i>		2,20	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Spirillum rubrum</i>		4,40		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Staphylococcus albus</i>		1,80		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Staphylococcus aureus</i>		2,60		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Staphylococcus aureus (KII CCM 885 B1)</i>		143,50	RF(lg) = -4,76	E. Nolde et al.	[75]	1991	Versuche mit Referenzstämmen in Grauwasser, dynamisch
Bacteria	<i>Streptococcus faecalis</i>		8,00	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Streptococcus faecalis (A5 KVI DSM 20371)</i>		143,50	RF(lg) = -5,4	E. Nolde et al.	[75]	1991	Versuche mit Referenzstämmen in Grauwasser, dynamisch
Bacteria	<i>Streptococcus faecalis (Wildform)</i>		8,20	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht, HG-MD-Strahlungsquelle
Bacteria	<i>Streptococcus faecalis (Wildform)</i>		9,58	RF(lg) = -4	G.D. Harris et al.	[55]	1987	ohne Photoreaktivierung
Bacteria	<i>Streptococcus faecalis (Wildform)</i>		15,00	RF(lg) = -3	G.D. Harris et al.	[55]	1987	mit Photoreaktivierung
Bacteria	<i>Streptococcus haemolyticus</i>		2,20		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Streptococcus haemolyticus</i>		2,20	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Streptococcus lactis</i>		6,10	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Bacteria	<i>Streptococcus lactis</i>		6,20		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Streptococcus viridans</i>		2,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Bacteria	<i>Streptococcus viridans</i>		2,00	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht

Tabelle A1-2: Bestrahlungswerte für die Inaktivierung von Einzelspezies (Fortsetzung)

Gruppe	Organismus	Farbe	Bestrahlung H [mJ/cm ²]	RF -Faktor	Quelle	Referenz	Jahr	Kommentar
Hefen	<i>Backhefe</i>		3,9-6,0	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Hefen	<i>Brauhefe (Bier)</i>		3,30	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Hefen	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>		6,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Hefen	<i>Saccharomyces ellipsoides</i>		6,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Hefen	<i>Saccharomyces spec.</i>		8,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Pilze	<i>Aspergillus flavus</i>	gelb-grün	60,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Pilze	<i>Aspergillus glaucus</i>	blau-grün	44,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Pilze	<i>Aspergillus niger</i>	schwarz	44,00-132,00	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht, HG-MD-Strahlungsquelle
Pilze	<i>Aspergillus niger</i>	schwarz	132,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Pilze	<i>Mucor racemocus A</i>	hellgrau	17,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Pilze	<i>Mucor racemocus B</i>	hellgrau	17,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Pilze	<i>Oospora lactis</i>	farblos	5,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Pilze	<i>Penicillium digitatum</i>	oliev	44,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Pilze	<i>Penicillium expansum</i>	oliev	13,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Pilze	<i>Penicillium roqueforti</i>	grün	13,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Pilze	<i>Rhizopus nigricans</i>	schwarz	111,00		C. von Sonntag	[5]	1988	
Virus	<i>Coxsackievirus A-9</i>		35,96	RF(lg) = -3	O.K. Scheible et al.	[69]	1981	in Petrischale
Virus	<i>Coxsackievirus B-1</i>		46,40	RF(lg) = -3	O.K. Scheible et al.	[69]	1981	in Petrischale
Virus	<i>Echovirus 1</i>		32,48	RF(lg) = -3	O.K. Scheible et al.	[69]	1981	in Petrischale
Virus	<i>Echovirus 11</i>		35,96	RF(lg) = -3	O.K. Scheible et al.	[69]	1981	in Petrischale
Virus	<i>Poliovirus</i>		3,2-5,8	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Virus	<i>Poliovirus</i>		23,33	RF(lg) = -3	G.D. Harris et al.	[55]	1987	Photoreaktivierung nicht nachgewiesen
Virus	<i>Poliovirus 1</i>		32,48	RF(lg) = -3	O.K. Scheible et al.	[69]	1981	in Petrischale
Virus	<i>Poliovirus 2</i>		35,96	RF(lg) = -3	O.K. Scheible et al.	[69]	1981	in Petrischale
Virus	<i>Poliovirus 3</i>		31,32	RF(lg) = -3	O.K. Scheible et al.	[69]	1981	in Petrischale
Virus	<i>Reovirus</i>		11,00	RF(lg) = -1	W.J. Masschelein	[28]	2002	in Wasser, 20 °C, pH=7, ohne Tageslicht
Virus	<i>Reovirus</i>		45,00	RF(lg) = -3	G.D. Harris et al.	[55]	1987	Photoreaktivierung nicht nachgewiesen
Virus	<i>Reovirus 1</i>		46,40	RF(lg) = -3	O.K. Scheible et al.	[69]	1981	in Petrischale

Anlage 2 # RTD - METHODE

- Residence-Time-Distribution-Method -

Ziel:	Experimentelle Untersuchung der Strömungsverhältnisse und der Verweilzeiten in einem UV-Reaktor
Prinzip:	Vor dem UV-Reaktor wird ein Tracer Einschalt-, Ausschalt- oder ein Rechteckimpuls in die Strömung eingeleitet; Kochsalzlösung. Der Konzentrationsverlauf unter verschiedenen Betriebsmodi wird experimentell nach dem UV-Reaktor, vorzugsweise automatisch, erfasst. Wird die Ausgangs- oder Endkonzentration des Tracers erreicht, liegt der Zahlenwert $C_{Tr}=1$ vor.
Weiterführende Literatur:	STOVER, et al. [80], SEVERIN et al. [87] bis [90], KREFT et al. [93], SCHEIBLE [94], MEREDITH [96], NIEUWSTAD et al. [98], ABU GHARARAH et al. [99], WESTERTERP et al. [100], DANKWERTS [101], LEVENSPIEL [102].

Die RTD-Methode ist eine experimentelle Methode, die in der Arbeit näher beschrieben wird. Sie ist in der Lage die fluidmechanischen Verhältnisse in einem UV-Reaktor über Kennzahlen zu charakterisieren. Allerdings ist es sehr schwierig die experimentellen Anfangsbedingungen zu schaffen, welche die theoretischen Ableitungen erfüllen. Selbst unter der Verwendung raffinierter Mischer dürfte es nur schwierig möglich sein, einen Rechteckimpuls zu erzeugen. Durch ein elektromagnetisches Signal müsste beispielsweise eine Querschnittsebene des betreffenden Mediums komplett in einen detektierbaren Zustand versetzt werden, welcher schließlich den Anfang der Untersuchung darstellt. Gleiche Schwierigkeit treten bei der Gestaltung des Einschalt- bzw. Ausschaltimpulses auf. Hier können bislang nur näherungsweise die idealen Impulsformen erzielt werden. Gleichwohl handelt es sich hier um eine interessante und vielversprechende Methodik, die experimentell verfeinert werden sollte. Nachstehend weitere Bilder zur Verfahrensdarstellung.

Die Differentiation der Meßresultate nach dem Einschalt- bzw. Ausschaltvorgang des Tracers führt qualitativ zu einer Meßwertverteilung (Bild A2-2), die der Verweilzeit des Tracers im System entspricht und deren Parameterdiskussion (Bewertungsparameter):

t_f	Zeit bis zum ersten Nachweis des Tracers,
t_{10}	Zeit bis 10 % den Reaktor durchströmt haben,
t_p	Zeit bis zum Nachweis der maximalen Tracerkonzentration,
t_{50}	Zeit bis 50 % den Reaktor durchströmt haben,
t_m	Zeit Mittelwert, mittlere RT - diskret; meßtechnisch,
t_m^i	Zeit Mittelwert, mittlere RT - integraler Ansatz,
t_{RT}^{th}	theoretische mittlere Verweilzeit,
t_{90}	Zeit bis 90 % den Reaktor durchströmt haben,
t_e	Zeit bis 100 % den Reaktor durchströmt haben,

schließlich eine Einschätzung der fluidmechanischen Verhältnisse im UV-Reaktor erlauben.

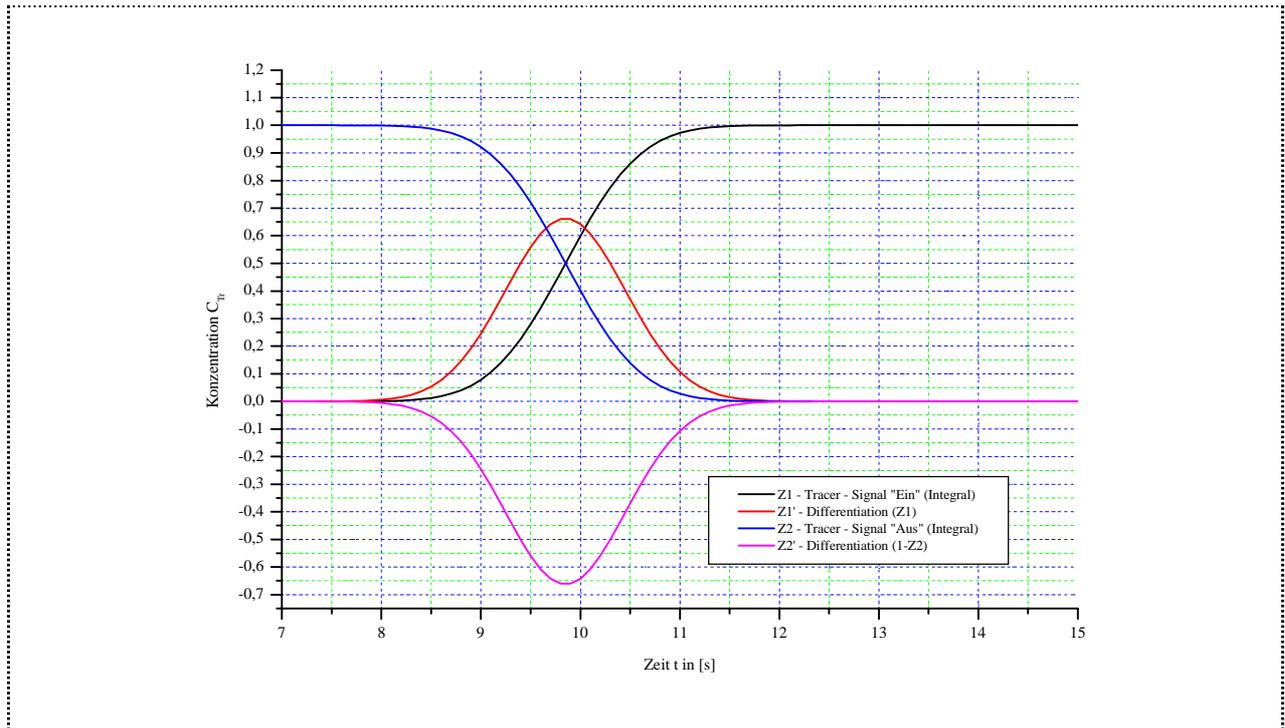


Bild A2-1: RTD-Methode, Signal: Tracer -ein- oder Tracer -aus-

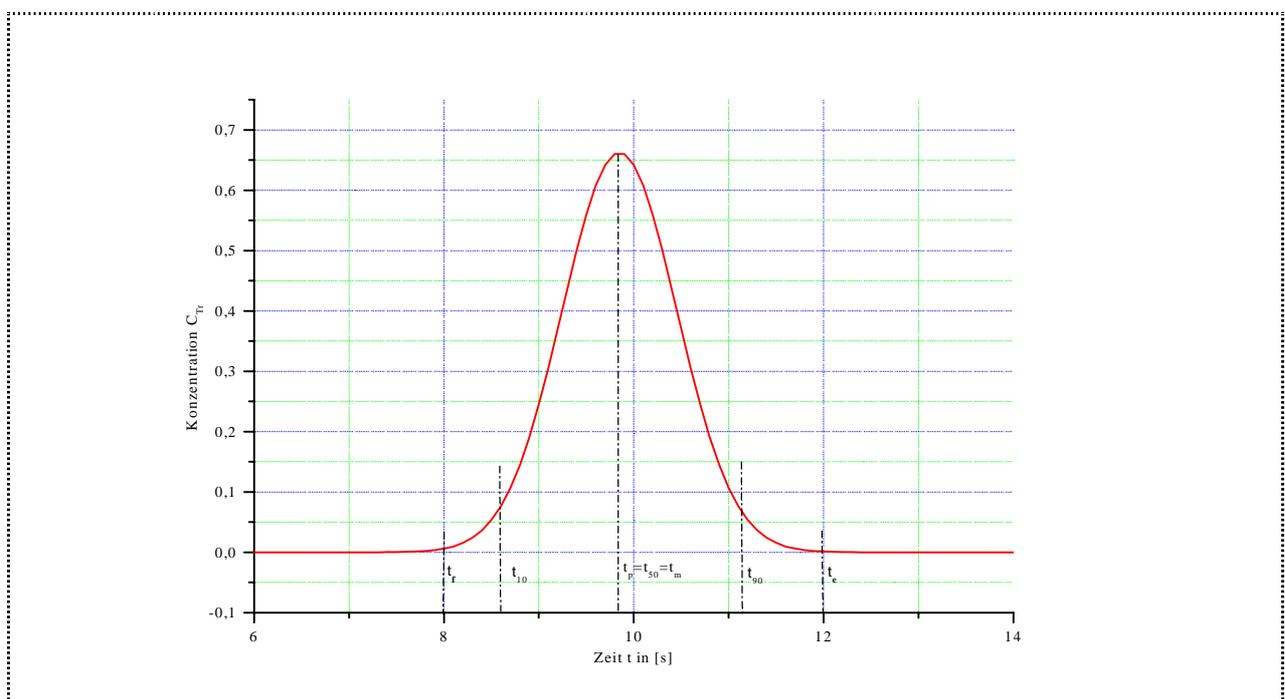


Bild A2-2: Analyse des Tracer-Signals nach dem UV-Reaktor

Tabelle A2-1: Parameter der RTD - Methode

parametrischer Ausdruck nach STOVER, et al. [80]	Bedeutung / Erläuterung
$\frac{t_f}{t_{RT}^{th}} \left\{ \begin{array}{l} = 1 \\ \rightarrow 0 \end{array} \right\}$	<p>Maß für die Kurzschlußströmung, ideale Pfropfenströmung hat den Wert 1 # = 1; <i>plug - flow</i>; KREFT et al. [93] # = 1 bestes Maß für Kurzschlüsse ; SCHEIBLE [94]</p> <p>zunehmende Durchmischung $\rightarrow 0$ # < 1; Kurzschlüsse KREFT et al. [93]</p>
$\frac{t_P}{t_{RT}^{th}} \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow 1 \\ \rightarrow 0 \end{array} \right\}$	<p>Maß für den durchschnittlichen Grad der Kurzschlußströmung, Totwassergebiete werden angezeigt. Pfropfenströmung Wert $\rightarrow 1$ # = 1; idealer <i>plug - flow</i>; KREFT, et al. [93] # = 1; idealer <i>plug - flow</i>; SCHEIBLE [94].</p> <p>zunehmende Durchmischung $\rightarrow 0$ # << 1; Kurzschlüsse, schlechte Auslastung; KREFT, et al. [93] # $\rightarrow 0$ mit zunehmender Durchmischung dann Kurzschlüsse; SCHEIBLE [94].</p>
$\frac{t_{90}}{t_{10}} \left\{ \begin{array}{l} = 1 \\ = 21,9 \\ < 2 \end{array} \right\}$	<p>Morill - Dispersions - Index</p> <p>ideale Pfropfenströmung hat den Wert 1 # < 2; bester Wert für UV - Reaktoren; SCHEIBLE [94].</p> <p>ideale Durchmischung hat den Wert 21,9 # = 1; idealer <i>plug - flow</i>; SCHEIBLE [94].</p> <p>ideale Reaktor hat den Wert < 2</p>
$\frac{t_m^i}{t_{RT}^{th}} \left\{ \begin{array}{l} = 1 \\ \ll 1 \\ > 1 \end{array} \right\}$	<p>Der Parameter hat den Wert 1, wenn das effektive Reaktorvolumen beteiligt ist, # ≤ 1; KREFT et al. [93] # = 1 SCHEIBLE [94]</p> <p>genutzte Volumen ist kleiner als das effektive Reaktorvolumen, # $V_{\text{eff}} \ll V_R$ Totwasser - Gebiete, SCHEIBLE [94]</p> <p>nach Def. nicht erlaubt</p>
$\frac{t_{50}}{t_m^i} \left\{ \begin{array}{l} \geq 1 \\ < 1 \end{array} \right\}$	<p>Maß für die Verschiebung der RTD # Abweichung von 1 entspricht der Verschiebung, KREFT et al. [93]</p> <p>eine Verschiebung nach links ist nachteilig für eine optimale Konstruktion # << 1, <i>tailing effect</i>, Totwasser - Gebiete, KREFT et al. [93]</p>

Tabelle A2-1: Parameter der RTD - Methode (Fortsetzung)

parametrischer Ausdruck nach STOVER, et al. [80]	Bedeutung / Erläuterung
$t_m^i = \frac{\int_0^{\infty} C_c \cdot t dt}{\int_0^{\infty} C_c dt}$	integrale Form für die Berechnung der mittleren Verweilzeit t_m des Volumenelementes im Reaktor
$t_m = \frac{\sum_i t_i C_{ci} \Delta t_i}{\sum_i C_{ci} \Delta t_i}$	diskrete Form für die Berechnung der mittleren Verweilzeit t_m des Volumenelementes im Reaktor
$\sigma^2 = \frac{\sum_i t_i^2 C_{ci} \Delta t_i}{\sum_i C_{ci} \Delta t_i} - t_m^2$	Standardabweichung σ der Grundgesamtheit σ

Anlage 3 # KLASSIFIZIERUNG von UV-Reaktor-Konstruktionen

Ziel:	Bestimmung der in der Praxis des UV-Reaktorenbaus bewährtesten Konstruktion.
Prinzip:	<p>Einteilung in Klassen, Gruppen, Typen über eine Datenbank für Reaktorkonstruktionen; Verwendung von definierten Ordnungsparametern, Merkmalgruppen und Merkmalen, Sortierung nach in der Arbeit entwickeltem Zahlencode.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Klasse {A} geschlossene UV - Reaktoren <ol style="list-style-type: none"> 1. Gruppe „Zylinderförmige UV - Reaktoren“ 2. Gruppe „Quaderförmige UV - Reaktoren“ • Klasse {B} (einseitig) offene UV - Reaktoren <ol style="list-style-type: none"> 1. Gruppe „Rinnenförmige UV - Reaktoren“ 2. Gruppe „Kaskadenförmige UV - Reaktoren“ 3. Gruppe „Beckenförmige UV - Reaktoren“ • Ordnungsparameter <ul style="list-style-type: none"> <i>Hauptgeometrie, <1-2, 1-3> - {Gruppen}</i> <i>Hauptströmungsrichtung, <1-2></i> <i>Zufluss, <1-4></i> <i>Abfluss, <1-6></i> <i>Arbeitsrichtung, <1-3></i> <i>Strahlungsquelle, <1-5></i> <i>Anzahl der Strahlungsquellen, <1-2></i> <i>Anordnung der Strahlungsquellen, <1-6></i>
Weiterführende Literatur:	<p>Eine Systematik wurde in der Literatur noch nicht vorgestellt. Ansätze hierzu enthalten allerdings die Empfehlungen, Richtlinien und Arbeiten:</p> <p>FIGAWA [19], ATV Regelwerk [29], HOYER [31], RUDOLPH et al. [38] STOVER et al. [80], NIEUWSTAD et al. [98].</p>

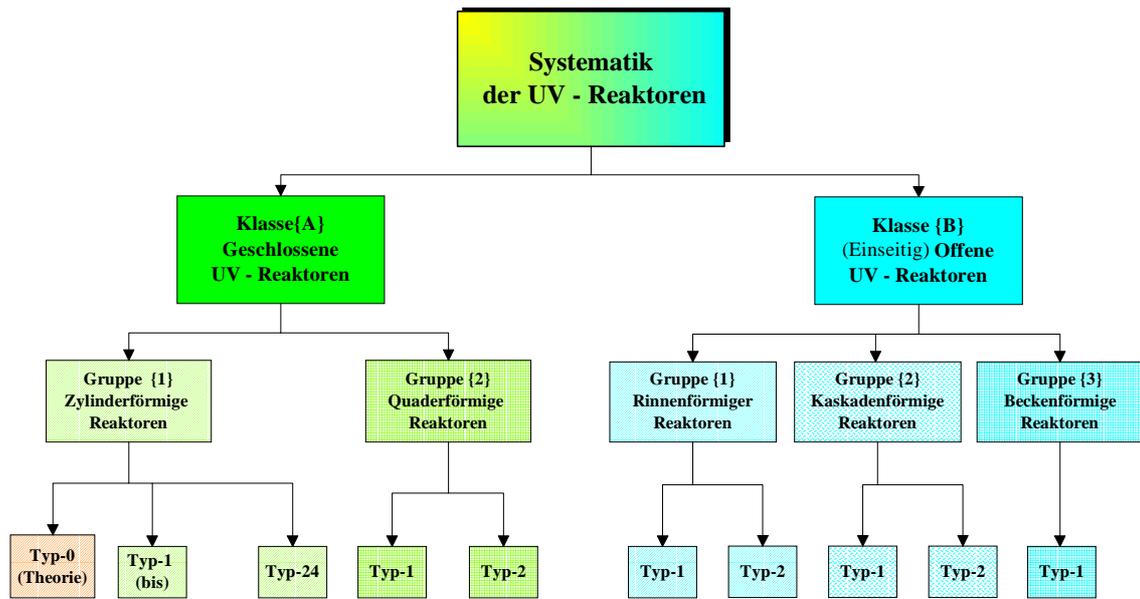


Bild A3-1: Systematik der UV-Reaktoren

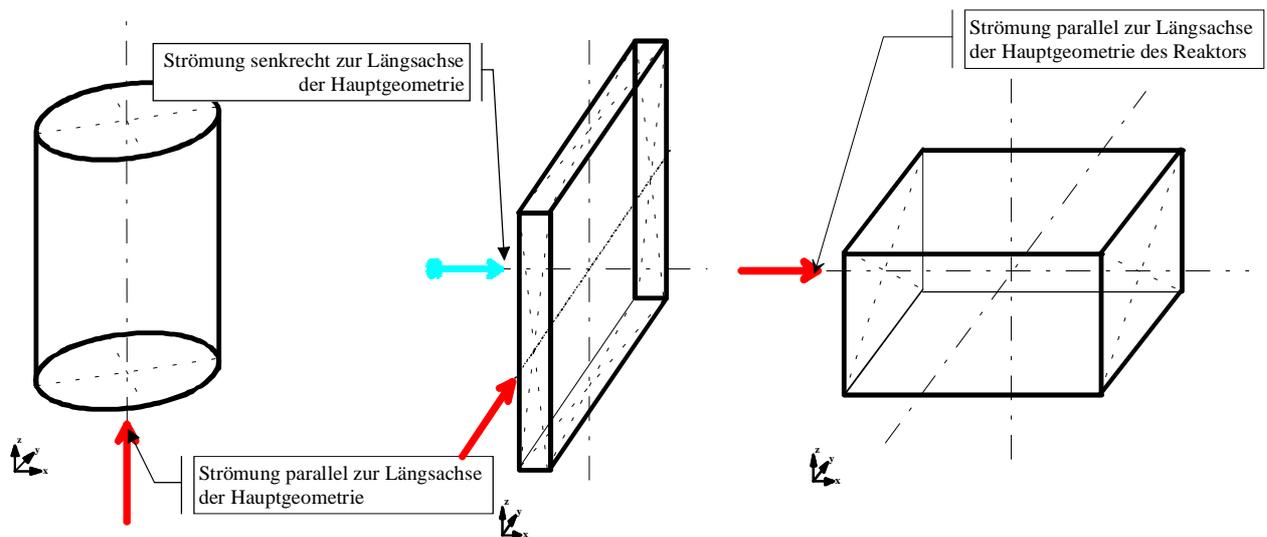


Bild A3-2: Festlegungen zur Bezeichnungsweise der Reaktorgeometrie

Die Anwendung des Verfahrens erfolgte bei der Analyse von bislang 69 Reaktormodellen die sich im Produktionsprogramm der Hersteller befinden, vgl. Korrespondenz in dieser Anlage.

1. Ordnungsparameter - Hauptgeometrie (des Reaktorgrundkörpers) <Merkmal - Code 1-2, 3>

Der Reaktorgrundkörper umschließt den Raum, in welchem das betreffende „durchströmende“ Medium der UV-Strahlung ausgesetzt wird. Der Reaktorgrundkörper stellt bildlich den „Behälter“ für das mit der Strahlung zu behandelnden Fluid dar. In ihm bildet sich die Hauptströmungsrichtung aus. Außerdem können in diesen Raum Gase und Chemikalien zweckmäßig eingeleitet werden. In den Reaktorgrundkörper werden im allgemeinen die Strahlungsquelle/Strahlungsquellen eingebaut. Die fluidmechanischen Verhältnisse, die optischen Verhältnisse und die mikrobiologischen Wirkungen im Reaktorgrundkörper sind Gegenstand der Untersuchung eines *gekoppelten fluidmechanischen Modells*.

In der Praxis gibt es zwei bzw. drei geometrische Grundformen, die zur Klassifizierung herangezogen wurden (Bild A3 - 1) Es handelt sich dabei für die Klasse der geschlossenen Reaktoren - Klasse {A} - um die Merkmale Zylinderform <1> und Quaderform <2>. Für die Klasse der einseitig offenen Reaktoren - Klasse {B} - handelt es sich um die Rinnenform <1>, die Kaskadenform <2> und die Beckenform <3>. Der erste Ordnungsparameter entspricht der Einteilung in Gruppen.

2. Ordnungsparameter - Hauptströmungsrichtung <Merkmal - Code 1-2>

Die Hauptströmungsrichtung stellt sich im Innern des Reaktors unter Vernachlässigung von Turbulenzeffekten ein. Der Ort des Zuflusses, der Ort des Abflusses und deren konstruktive Auslegung legen in Verbindung mit der Hauptgeometrie die Hauptströmungsrichtung (HSR) im UV-Reaktor fest. Diese kann parallel zur Längsachse <1> der Hauptgeometrie bzw. senkrecht <2> dazu erfolgen. Bei dieser Festlegung sind der Zufluss und der Abfluss gleichberechtigt. Die Längsachse der Hauptgeometrie wurde unter Verwendung der Definition der Symmetrieebene und der Symmetrieachse nach BRONSTEIN et al. [119] bestimmt, Bild A3-1.

3. Ordnungsparameter - Zufluss <Merkmal - Code 1-4>

Sowohl der Ort des Zuflusses / der Zuflüsse und des Abflusses als auch die in diesen herrschenden fluidmechanischen Bedingungen - Strömungsgeschwindigkeit, Druck, etc. - bestimmen wesentlich die sich im Reaktorinnern einstellenden Strömungsverhältnisse.

In der Praxis haben sich Zuflussanbringungen, die parallel zur Hauptströmungsrichtung <1>, die senkrecht zur Hauptströmungsrichtung <2>, die senkrecht zur Hauptströmungsrichtung und zur Mittellinie versetzt <3> und die zur Mittellinie versetzt und unter einem Anstellwinkel <4> wirken, durchgesetzt. Die zuletzt genannte Form des Zuflusses tritt als symmetrisch verteilte (120° Winkel) Zuflüsse auf und erzwingt im Reaktor eine schraubelinienförmige Drehströmung.

4. Ordnungsparameter - Abfluss <Merkmal - Code 1-6>

Der Abfluss beeinflusst wie der Zufluss über seine Lage, Dimensionierung und durch die an diesem herrschenden fluidmechanischen Bedingungen die Ausbildung der Strömungsverhältnisse im UV-Reaktor. In der Praxis des UV-Reaktorbaus haben sich die Bauformen parallel zur Hauptströmungsrichtung <1>, senkrecht zur Hauptströmungsrichtung <2>, senkrecht zur

Hauptströmungsrichtung und zum Zufluss (zur Fließrichtung im Zufluss) entgegengesetzt <3>, senkrecht zur Hauptströmungsrichtung im Winkel <4>, senkrecht zur Hauptströmungsrichtung in Drehrichtung zur Reaktormittelachse versetzt <5> und senkrecht zur Hauptströmungsrichtung, entgegengesetzt zur Einströmrichtung und in Drehrichtung <6> versetzt, durchgesetzt.

5. Ordnungsparameter - Arbeitsrichtung <Merkmal - Code 1-3>

Da die UV-Reaktoren in seltenen Fällen allein stehende und allein wirkende Geräte sind, ist deren Einbindung in eine komplexe Aufbereitungsanlage zu berücksichtigen. Dadurch gibt es Einbauformen, die eine Orientierung zur Schwerkraftwirkung mit sich bringen. In der Praxis ist die Arbeitsrichtung entgegen der Schwerkraft <1> und senkrecht zur Wirkung Schwerkraft <2> anzutreffen. Die Arbeitsrichtung parallel zur Wirkung der Schwerkraft <3> gibt es in der Praxis entsprechend den untersuchten Quellen nicht. Vorsorglich ist diese in das Ordnungssystem aufgenommen wurden, da dieser Anwendungsfall vom theoretischen Standpunkt aus nicht ausgeschlossen werden kann.

6. Ordnungsparameter - Strahlungsquelle <Merkmal - Code 1-5>

Im Allgemeinen befindet sich die Strahlungsquelle im Reaktorinnern. Der Strahler wird von einem Schutzrohr umhüllt, welches geeignet dimensioniert ist. Es wird aus Quarzglas bzw. aus einem Material gefertigt, das für die Strahlung des relevante UV-Strahlungsbereiches durchlässig ist.

Für die fluiddynamischen Betrachtungen ist die Geometrie des Schutzrohres und seine Einbauweise in den UV-Reaktor wichtig. Zweckmäßig wird zwischen der Strahlereinbauweise, die eine Strömung längs der Strahleroberfläche <1> und senkrecht zur Strahleroberfläche <3> ergibt, unterschieden.

In wenigen Reaktorkonstruktionen befinden sich diese Strahlungsquellen außerhalb des Reaktors (WEDECO {A_11}). Auch in diesem Fall sind die Strahler zylinderförmig. Das Schutzrohr wird in diesem Fall dazu verwendet, das Wasser oder das betreffenden Fluid durch die positive Strahlungsgeometrie zu lenken. Die Längsachse der außerhalb des Fluids angeordneten Strahler verläuft parallel zur Hauptströmungsrichtung <2>.

Als Ausnahmen werden zylindrische Strahler berücksichtigt, die sich außerhalb des Fluids befinden und deren Längsachsen senkrecht zur Hauptströmungsrichtung <4> orientiert sind.

Eine weitere Abweichung hinsichtlich der Strahlergeometrie stellt eine Bauform dar, in der ein spiralenförmiger Strahler verwendet wird (UTG und UMEX {A_12}). Das Fluid wird in dieser Anwendung durch ein Rohr aus einem UV durchlässigen Material geleitet, welches im Innern der Spirale angeordnet ist. Auf diese Weise verlaufen die Symmetrieachse der Spirale und die Hauptströmungsrichtung parallel <5>.

Der Raum zwischen Strahler und Fluid kann geschickt zur Ozonherstellung benutzt werden.

7. Ordnungsparameter - Anzahl der Strahlungsquellen <Merkmal - Code 1-2>

Gewöhnlich befindet sich eine Strahlungsquelle ($n=1$) <1> im UV-Reaktor. Mit zunehmenden Durchsatz und weiteren nachteiligen Eigenschaften des Fluids (Färbung, Trübung, Partikelinhalt, etc.) ist es nicht selten, dass ein Strahler die geforderte Leistung nicht mehr erbringen kann und demzufolge mehrere Strahler ($n>1$) <2> zum Einsatz kommen müssen.

8. Ordnungsparameter - Anordnung der Strahlungsquellen <Merkmal - Code 1-6>

Reicht ein Strahler für die Strahlungsintensität bzw. geforderte Dosis aus, so wird dieser meistens zentrisch <1> im UV Reaktor parallel zur Längsachse und parallel zur Hauptströmungsrichtung eingesetzt. Die exzentrische <2> Anordnung des Strahlers wird dann verwendet, wenn der Abflussanschluß in die Abdeckelung des Reaktors eingelassen wurde.

Mehrere Strahler werden im Fall der zylindrischer Hauptgeometrie ringförmig <3> angeordnet. Es kommt in der Praxis vor, dass mehrere Ringe konzentrisch <4> angeordnet werden, um eine befriedigende Wirkung bei einem großen Durchsatz zu erreichen. Befindet sich ein Strahler im Zentrum eines Strahlerringes, so wird dieser Umstand als Spezialfall der Anordnung von mehreren konzentrischen Ringen erfaßt. Liegt eine quaderförmige Hauptgeometrie vor, so erfolgt auch die Strahleranordnung rechteckig in Flucht <5>, wenn mehrere Strahlerreihen zum Einsatz kommen. Für den Fall, dass die Strahlerreihen im geringen Abstand zueinander angeordnet werden, ist eine versetzte Anordnung <6> der Strahler aus fluidmechanischer Sicht günstig (siehe weiter unten).

In den folgenden Tabelle werden die Ergebnisse der Anwendung des Verfahrens beispielhaft dargestellt; Reaktoren {A-1-0} und {A-1-1}. Die Statistik zu diesen und schließlich die Benennung der am häufigsten im Einsatz befindlichen UV-Reaktorkonstruktion befindet sich im Kapitel 3., Abschnitt 3.3. der Arbeit. Auf die Wiedergabe des gesamten Inhaltes der Datenbank wird aus Platzgründen verzichtet. Grafische Darstellungen verdeutlichen die Vielzahl der verschiedenen UV-Reaktorkonstruktionen.

Ordnungsparameter	Merkmal	Code
1. Hauptgeometrie {Gruppenparameter}	zylinderförmig - „Zylinderförmige Reaktoren“; Gruppe {1}	1
	quaderförmig - „Quaderförmige Reaktoren“; Gruppe {2}	2
	<frei verfügbar; Code 3-n>	3
2. Hauptströmungsrichtung	parallel zur Längsachse der Hauptgeometrie	1
	senkrecht zur Längsachse der Hauptgeometrie	2
3. Zufluss	parallel zur Hauptströmungsrichtung (HSR) im Reaktor	1
	senkrecht zur Hauptströmungsrichtung im Reaktor	2
	senkrecht zur Hauptströmungsrichtung, zur Reaktormittelachse <u>versetzt</u>	3
	<u>Zuflüsse mit Anstellwinkel, versetzt</u>	4
4. Abfluss	parallel zur HSR im Reaktor	1
	senkrecht zur HSR im Reaktor	2
	senkrecht zur HSR im Reaktor - entgegengesetzt zur Zuflussrichtung	3
	senkrecht zur HSR im Reaktor - im Winkel (Drehwinkel bezogen auf Zufluss)	4
	senkrecht zur HSR im Reaktor, in Drehrichtung, zur Reaktormittelachse <u>versetzt</u>	5
	senkrecht zur HSR im Reaktor - entgegengesetzt, in Drehrichtung, <u>versetzt</u>	6
5. Arbeitsrichtung	gegen die Schwerkraft	1
	in Richtung der Schwerkraft	2
	senkrecht zur Schwerkraft	3
6. Strahlungsquelle	zylindrisch im Fluid; parallel zur Hauptströmungsrichtung	1
	zylindrisch außerhalb des Fluids, parallel Hauptströmungsrichtung	2
	zylindrisch im Fluid; senkrecht zur Hauptströmungsrichtung	3
	zylindrisch außerhalb des Fluids; senkrecht zur Hauptströmungsrichtung	4
	(zylindrisch) spiralförmig außerhalb des Fluids, Spiralenachse parallel zur HSR	5
7. Anzahl der Strahlungsquellen	Ein Strahler n=1	1
	Anzahl der Strahler n>1	2
8. Anordnung der Strahlungsquellen	zentrisch	1
	exzentrisch	2
	Strahleranordnung in einem konzentrischem Ring m=1	3
	Strahleranordnung in mehreren konzentrischen Ringen m>1	4
	Strahleranordnung rechteckig in Flucht	5
	Strahleranordnung rechteckig versetzt	6
Kennzahl		

Tabelle A3-1-01: Systematik der UV-Reaktoren - Klasse {A} „geschlossen UV - Reaktoren“, Gruppe {1} „Zylinderförmige Reaktoren“

Ordnungsparameter	Merkmal	Code	Typ-0	Typ-1
1. Hauptgeometrie {Gruppenparameter}	zylinderförmig - „Zylinderförmige Reaktoren“; Gruppe {1}	1	1	1
	quaderförmig - „Quaderförmige Reaktoren“; Gruppe {2}	2		
	<frei verfügbar; Code 3-n>	3		
2. Hauptströmungsrichtung	parallel zur Längsachse der Hauptgeometrie	1	1	1
	senkrecht zur Längsachse der Hauptgeometrie	2		
3. Zufluss	parallel zur Hauptströmungsrichtung (HSR) im Reaktor	1	1	1
	senkrecht zur Hauptströmungsrichtung im Reaktor	2		
	senkrecht zur Hauptströmungsrichtung, zur Reaktormittelachse <u>versetzt</u>	3		
	<u>Zuflüsse mit Anstellwinkel, versetzt</u>	4		
4. Abfluss	parallel zur HSR im Reaktor	1	1	1
	senkrecht zur HSR im Reaktor	2		
	senkrecht zur HSR im Reaktor - entgegengesetzt zur Zuflussrichtung	3		
	senkrecht zur HSR im Reaktor - im Winkel (Drehwinkel bezogen auf Zufluss)	4		
	senkrecht zur HSR im Reaktor, in Drehrichtung, zur Reaktormittelachse <u>versetzt</u>	5		
	senkrecht zur HSR im Reaktor - entgegengesetzt, in Drehrichtung, versetzt	6		
5. Arbeitsrichtung	gegen die Schwerkraft	1	1	1
	in Richtung der Schwerkraft	2		
	senkrecht zur Schwerkraft	3		
6. Strahlungsquelle	zylindrisch im Fluid; parallel zur Hauptströmungsrichtung	1	1	
	zylindrisch außerhalb des Fluids, parallel Hauptströmungsrichtung	2		2
	zylindrisch im Fluid; senkrecht zur Hauptströmungsrichtung	3		
	zylindrisch außerhalb des Fluids; senkrecht zur Hauptströmungsrichtung	4		
	(zylindrisch) spiralförmig außerhalb des Fluids, Spiralenachse parallel zur HSR	5		
7. Anzahl der Strahlungsquellen	Ein Strahler n=1	1	1	
	Anzahl der Strahler n>1	2		2
8. Anordnung der Strahlungsquellen	zentrisch	1	1	
	exzentrisch	2		
	Strahleranordnung in einem konzentrischem Ring m=1	3		3
	Strahleranordnung in mehreren konzentrischen Ringen m>1	4		
	Strahleranordnung rechteckig in Flucht	5		
	Strahleranordnung rechteckig versetzt	6		
Kennzahl			<11111111>	<11111223>

Tabelle A3-1-02: Systematik der UV-Reaktoren - Klasse {A} „geschlossen UV - Reaktoren“, Gruppe {1} „Zylinderförmige Reaktoren“

Ordnungsparameter	Code	Typ-2	Typ-3	Typ-4	Typ-5	Typ-6	Typ-7	Typ-8	Typ-9
1. Hauptgeometrie	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2								
	3								
2. Hauptströmungsrichtung	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2								
3. Zufluss	1	1	1	1	1				
	2					2	2	2	2
	3								
	4								
4. Abfluss	1	1				1			
	2		2	2	2		2	2	2
	3								
	4								
	5								
	6								
5. Arbeitsrichtung	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2								
	3								
6. Strahlungsquelle	1		1	1	1	1	1	1	1
	2								
	3								
	4								
	5	5							
7. Anzahl der Strahlungsquellen	1	1	1				1		
	2			2	2	2		2	2
8. Anordnung der Strahlungsquellen	1		1				1		
	2					2			
	3	3		3				3	
	4				4				4
	5								
	6								
Kennzahl		<11111513>	<11121111>	<11121123>	<11121124>	<11211122>	<11221111>	<11221123>	<11221124>

Tabelle A3-1-03: Systematik der UV-Reaktoren - Klasse {A} „geschlossen UV - Reaktoren“, Gruppe {1} „Zylinderförmige Reaktoren“

Ordnungsparameter	Code	Typ-10	Typ-11	Typ-12	Typ-13	Typ-14	Typ-15	Typ-16	Typ-17
1. Hauptgeometrie	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2								
	3								
2. Hauptströmungsrichtung	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2								
3. Zufluss	1								
	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	3								
	4								
4. Abfluss	1								
	2	2	2	2					
	3				3	3	3	3	
	4								4
	5								
	6								
5. Arbeitsrichtung	1	1			1	1			1
	2								
	3		3	3			3	3	
6. Strahlungsquelle	1		1	1	1	1	1	1	1
	2	2							
	3								
	4								
	5								
7. Anzahl der Strahlungsquellen	1		1		1		1		1
	2	2		2		2		2	
8. Anordnung der Strahlungsquellen	1		1		1		1		1
	2								
	3	3		3		3		3	
	4								
	5								
	6								
Kennzahl		<11221223>	<11223111>	<11223123>	<11231111>	<11231123>	<11233111>	<11233123>	<11241111>

Tabelle A3-1-04: Systematik der UV-Reaktoren - Klasse {A} „geschlossen UV - Reaktoren“, Gruppe {1} „Zylinderförmige Reaktoren“

Ordnungsparameter	Code	Typ-18	Typ-19	Typ-20	Typ-21	Typ-22	Typ-23	Typ-24	Typ-25
1. Hauptgeometrie	1	1	1	1	1	1	1	1	n.n.
	2								
	3								
2. Hauptströmungsrichtung	1	1	1	1	1	1			
	2						2	2	
3. Zufluss	1						1	1	
	2	2	2						
	3			3	3				
	4					4			
4. Abfluss	1						1	1	
	2					2			
	3								
	4	4	4						
	5			5					
	6				6				
5. Arbeitsrichtung	1	1	1	1	1	1	1		
	2								
	3							3	
6. Strahlungsquelle	1	1	1	1	1	1			
	2								
	3						3	3	
	4								
	5								
7. Anzahl der Strahlungsquellen	1			1	1	1			
	2	2	2				2	2	
8. Anordnung der Strahlungsquellen	1			1	1	1			
	2								
	3	3					3	3	
	4		4						
	5								
	6								
Kennzahl		<11241123>	<11241124>	<11351111>	<11361111>	<11421111>	<12111323>	<12113323>	

Tabelle A3-2-01: Systematik der UV-Reaktoren - Klasse {A} „geschlossen UV - Reaktoren“, Gruppe {2} „Quaderförmige Reaktoren“

Ordnungsparameter	Merkmal	Code	Typ-1	Typ-2
1. Hauptgeometrie {Gruppenparameter}	zylinderförmig - „Zylinderförmige Reaktoren“; Gruppe {1}	1		
	quaderförmig - „Quaderförmige Reaktoren“; Gruppe {2}	2	2	2
	<frei verfügbar; Code 3-n>	3		
2. Hauptströmungsrichtung	parallel zur Längsachse der Hauptgeometrie	1	1	
	senkrecht zur Längsachse der Hauptgeometrie	2		2
3. Zufluss	parallel zur Hauptströmungsrichtung (HSR) im Reaktor	1	1	1
	senkrecht zur Hauptströmungsrichtung im Reaktor	2		
	senkrecht zur Hauptströmungsrichtung, zur Reaktormittelachse <u>versetzt</u>	3		
	<u>Zuflüsse mit Anstellwinkel, versetzt</u>	4		
4. Abfluss	parallel zur HSR im Reaktor	1	1	1
	senkrecht zur HSR im Reaktor	2		
	senkrecht zur HSR im Reaktor - entgegengesetzt zur Zuflussrichtung	3		
	senkrecht zur HSR im Reaktor - im Winkel (Drehwinkel bezogen auf Zufluss)	4		
	senkrecht zur HSR im Reaktor, in Drehrichtung, zur Reaktormittelachse <u>versetzt</u>	5		
	senkrecht zur HSR im Reaktor - entgegengesetzt, in Drehrichtung, versetzt	6		
5. Arbeitsrichtung	gegen die Schwerkraft	1	1	
	in Richtung der Schwerkraft	2		
	senkrecht zur Schwerkraft	3		3
6. Strahlungsquelle	zylindrisch im Fluid; parallel zur Hauptströmungsrichtung	1	1	
	zylindrisch außerhalb des Fluids, parallel Hauptströmungsrichtung	2		
	zylindrisch im Fluid; senkrecht zur Hauptströmungsrichtung	3		3
	zylindrisch außerhalb des Fluids; senkrecht zur Hauptströmungsrichtung	4		
	(zylindrisch) spiralförmig außerhalb des Fluids, Spiralenachse parallel zur HSR	5		
7. Anzahl der Strahlungsquellen	Ein Strahler n=1	1		
	Anzahl der Strahler n>1	2	2	2
8. Anordnung der Strahlungsquellen	zentrisch	1		
	exzentrisch	2		
	Strahleranordnung in einem konzentrischem Ring m=1	3		
	Strahleranordnung in mehreren konzentrischen Ringen m>1	4		
	Strahleranordnung rechteckig in Flucht	5	5	5
	Strahleranordnung rechteckig versetzt	6		
Kennzahl			<21111125>	<22113325>

Tabelle A3-3-01: Systematik der UV-Reaktoren - Klasse {B} „offene UV - Reaktoren“, Gruppe {1} „Rinnenförmige Reaktoren“

Ordnungsparameter	Merkmal	Code	Typ-1	Typ-2
1. Hauptgeometrie {Gruppenparameter}	rinnenförmig - „Rinnenförmige Reaktoren“ Gruppe {1}	1	1	1
	kaskadenförmig - „Kaskadenförmige Reaktoren“ Gruppe{2}	2		
	beckenförmig - „Beckenförmige - Reaktoren“ Gruppe {3}	3		
2. Hauptströmungsrichtung	parallel zur Längsachse der Hauptgeometrie	1	1	1
	senkrecht zur Längsachse der Hauptgeometrie	2		
3. Zufluss	parallel zur Hauptströmungsrichtung (HSR) im Reaktor	1	1	1
	senkrecht zur Hauptströmungsrichtung im Reaktor	2		
	senkrecht zur Hauptströmungsrichtung, zur Reaktormittelachse <u>versetzt</u>	3		
	<u>Zuflüsse mit Anstellwinkel, versetzt</u>	4		
4. Abfluss	parallel zur HSR im Reaktor	1	1	1
	senkrecht zur HSR im Reaktor	2		
	senkrecht zur HSR im Reaktor - entgegengesetzt zur Zuflussrichtung	3		
	senkrecht zur HSR im Reaktor - im Winkel (Drehwinkel bezogen auf Zufluss)	4		
	senkrecht zur HSR im Reaktor, in Drehrichtung, zur Reaktormittelachse <u>versetzt</u>	5		
	senkrecht zur HSR im Reaktor - entgegengesetzt, in Drehrichtung, versetzt	6		
5. Arbeitsrichtung	gegen die Schwerkraft	1		
	in Richtung der Schwerkraft	2		
	senkrecht zur Schwerkraft	3	3	3
6. Strahlungsquelle	zylindrisch im Fluid; parallel zur Hauptströmungsrichtung	1	1	
	zylindrisch außerhalb des Fluids, parallel Hauptströmungsrichtung	2		
	zylindrisch im Fluid; senkrecht zur Hauptströmungsrichtung	3		3
	zylindrisch außerhalb des Fluids; senkrecht zur Hauptströmungsrichtung	4		
	(zylindrisch) spiralförmig außerhalb des Fluids, Spiralenachse parallel zur HSR	5		
7. Anzahl der Strahlungsquellen	Ein Strahler n=1	1		
	Anzahl der Strahler n>1	2	2	2
8. Anordnung der Strahlungsquellen	zentrisch	1		
	exzentrisch	2		
	Strahleranordnung in einem konzentrischem Ring m=1	3		
	Strahleranordnung in mehreren konzentrischen Ringen m>1	4		
	Strahleranordnung rechteckig in Flucht	5	5	5
	Strahleranordnung rechteckig versetzt	6		
Kennzahl			<11113125>	<11113325>

Tabelle A3-4-01: Systematik der UV-Reaktoren - Klasse {B} „offene UV - Reaktoren“, Gruppe {2} „Kaskadenförmige Reaktoren“

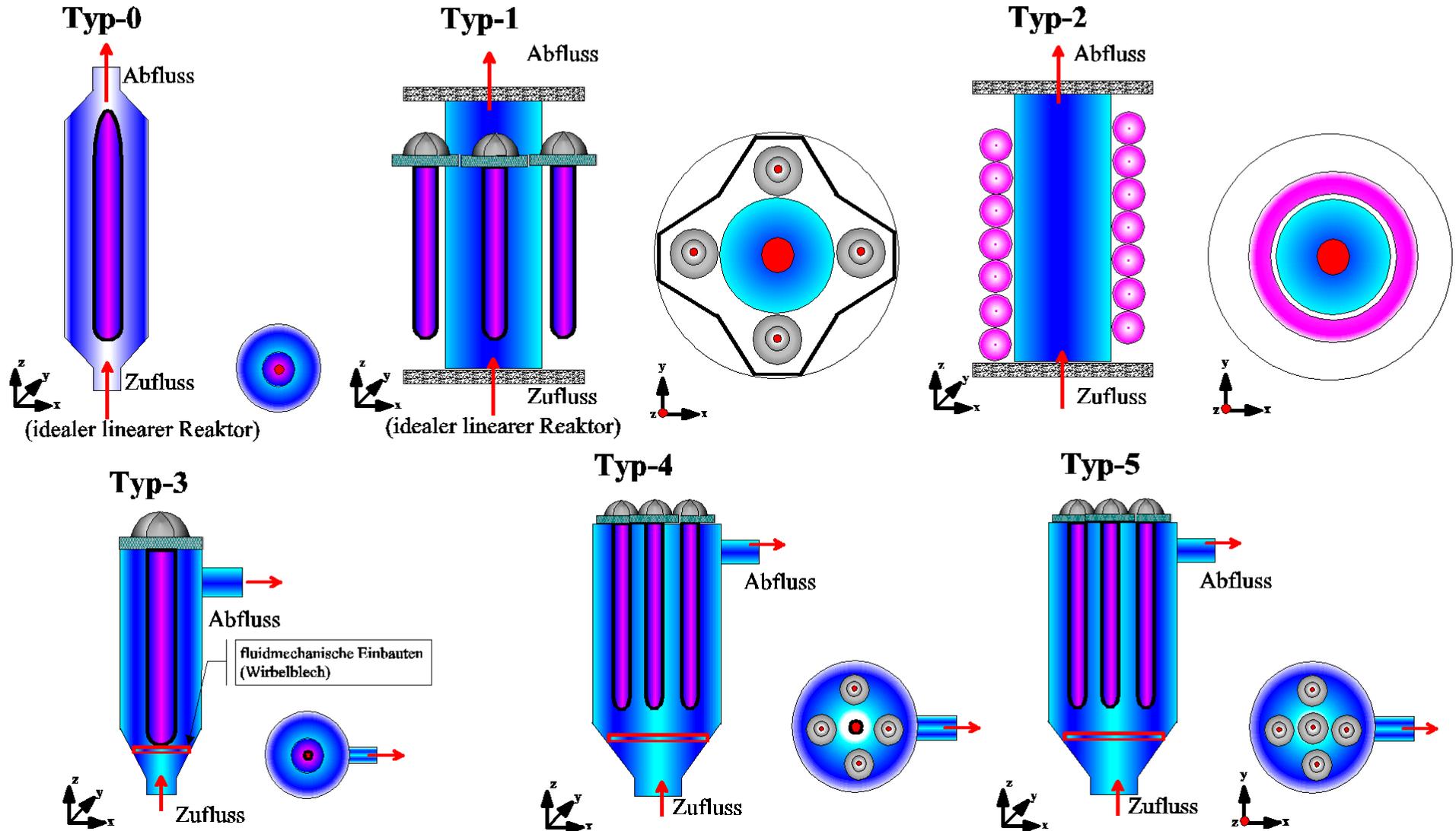
Ordnungsparameter	Merkmal	Code	Typ-1	Typ-2
1. Hauptgeometrie {Gruppenparameter}	rinnenförmig - „Rinnenförmige Reaktoren“ Gruppe {1}	1		
	kaskadenförmig - „Kaskadenförmige Reaktoren“ Gruppe {2}	2	2	2
	beckenförmig - „Beckenförmige - Reaktoren“ Gruppe {3}	3		
2. Hauptströmungsrichtung	parallel zur Längsachse der Hauptgeometrie	1	1	
	senkrecht zur Längsachse der Hauptgeometrie	2		2
3. Zufluss	parallel zur Hauptströmungsrichtung (HSR) im Reaktor	1	1	1
	senkrecht zur Hauptströmungsrichtung im Reaktor	2		
	senkrecht zur Hauptströmungsrichtung, zur Reaktormittelachse <u>versetzt</u>	3		
	<u>Zuflüsse mit Anstellwinkel, versetzt</u>	4		
4. Abfluss	parallel zur HSR im Reaktor	1	1	1
	senkrecht zur HSR im Reaktor	2		
	senkrecht zur HSR im Reaktor - entgegengesetzt zur Zuflussrichtung	3		
	senkrecht zur HSR im Reaktor - im Winkel (Drehwinkel bezogen auf Zufluss)	4		
	senkrecht zur HSR im Reaktor, in Drehrichtung, zur Reaktormittelachse <u>versetzt</u>	5		
	senkrecht zur HSR im Reaktor - entgegengesetzt, in Drehrichtung, versetzt	6		
5. Arbeitsrichtung	gegen die Schwerkraft	1		
	in Richtung der Schwerkraft	2		
	senkrecht zur Schwerkraft	3	3	3
6. Strahlungsquelle	zylindrisch im Fluid; parallel zur Hauptströmungsrichtung	1		
	zylindrisch außerhalb des Fluids, parallel Hauptströmungsrichtung	2		
	zylindrisch im Fluid; senkrecht zur Hauptströmungsrichtung	3		
	zylindrisch außerhalb des Fluids; senkrecht zur Hauptströmungsrichtung	4	4	4
	(zylindrisch) spiralförmig außerhalb des Fluids, Spiralenachse parallel zur HSR	5		
7. Anzahl der Strahlungsquellen	Ein Strahler n=1	1		1
	Anzahl der Strahler n>1	2	2	
8. Anordnung der Strahlungsquellen	zentrisch	1		
	exzentrisch	2		
	Strahleranordnung in einem konzentrischem Ring m=1	3		
	Strahleranordnung in mehreren konzentrischen Ringen m>1	4		
	Strahleranordnung rechteckig in Flucht	5		5
	Strahleranordnung rechteckig versetzt	6	6	
Kennzahl			<21113426>	<22113415>

Tabelle A3-5-01: Systematik der UV-Reaktoren - Klasse {B} „offene UV - Reaktoren“, Gruppe {3} „Beckenförmige - Reaktoren“

Ordnungsparameter	Merkmal	Code	Typ-1	Typ-2
1. Hauptgeometrie {Gruppenparameter}	rinnenförmig - „Rinnenförmige Reaktoren“ Gruppe {1}	1		
	kaskadenförmig - „Kaskadenförmige Reaktoren“ Gruppe{2}	2		
	beckenförmig - „Beckenförmige - Reaktoren“ Gruppe {3}	3	3	
2. Hauptströmungsrichtung	parallel zur Längsachse der Hauptgeometrie	1		
	senkrecht zur Längsachse der Hauptgeometrie	2	2	
3. Zufluss	parallel zur Hauptströmungsrichtung (HSR) im Reaktor	1		
	senkrecht zur Hauptströmungsrichtung im Reaktor	2	2	
	senkrecht zur Hauptströmungsrichtung, zur Reaktormittelachse <u>versetzt</u>	3		
	<u>Zuflüsse mit Anstellwinkel, versetzt</u>	4		
4. Abfluss	parallel zur HSR im Reaktor	1		
	senkrecht zur HSR im Reaktor	2	2	
	senkrecht zur HSR im Reaktor - entgegengesetzt zur Zuflussrichtung	3		
	senkrecht zur HSR im Reaktor - im Winkel (Drehwinkel bezogen auf Zufluss)	4		
	senkrecht zur HSR im Reaktor, in Drehrichtung, zur Reaktormittelachse <u>versetzt</u>	5		
	senkrecht zur HSR im Reaktor - entgegengesetzt, in Drehrichtung, versetzt	6		
5. Arbeitsrichtung	gegen die Schwerkraft	1		
	in Richtung der Schwerkraft	2		
	senkrecht zur Schwerkraft	3	3	
6. Strahlungsquelle	zylindrisch im Fluid; parallel zur Hauptströmungsrichtung	1		
	zylindrisch außerhalb des Fluids, parallel Hauptströmungsrichtung	2		
	zylindrisch im Fluid; senkrecht zur Hauptströmungsrichtung	3		
	zylindrisch außerhalb des Fluids; senkrecht zur Hauptströmungsrichtung	4	4	
	(zylindrisch) spiralförmig außerhalb des Fluids, Spiralenachse parallel zur HSR	5		
7. Anzahl der Strahlungsquellen	Ein Strahler n=1	1	1	
	Anzahl der Strahler n>1	2		
8. Anordnung der Strahlungsquellen	zentrisch	1		
	exzentrisch	2		
	Strahleranordnung in einem konzentrischem Ring m=1	3		
	Strahleranordnung in mehreren konzentrischen Ringen m>1	4		
	Strahleranordnung rechteckig in Flucht	5	5	
	Strahleranordnung rechteckig versetzt	6		
Kennzahl			<32223415>	

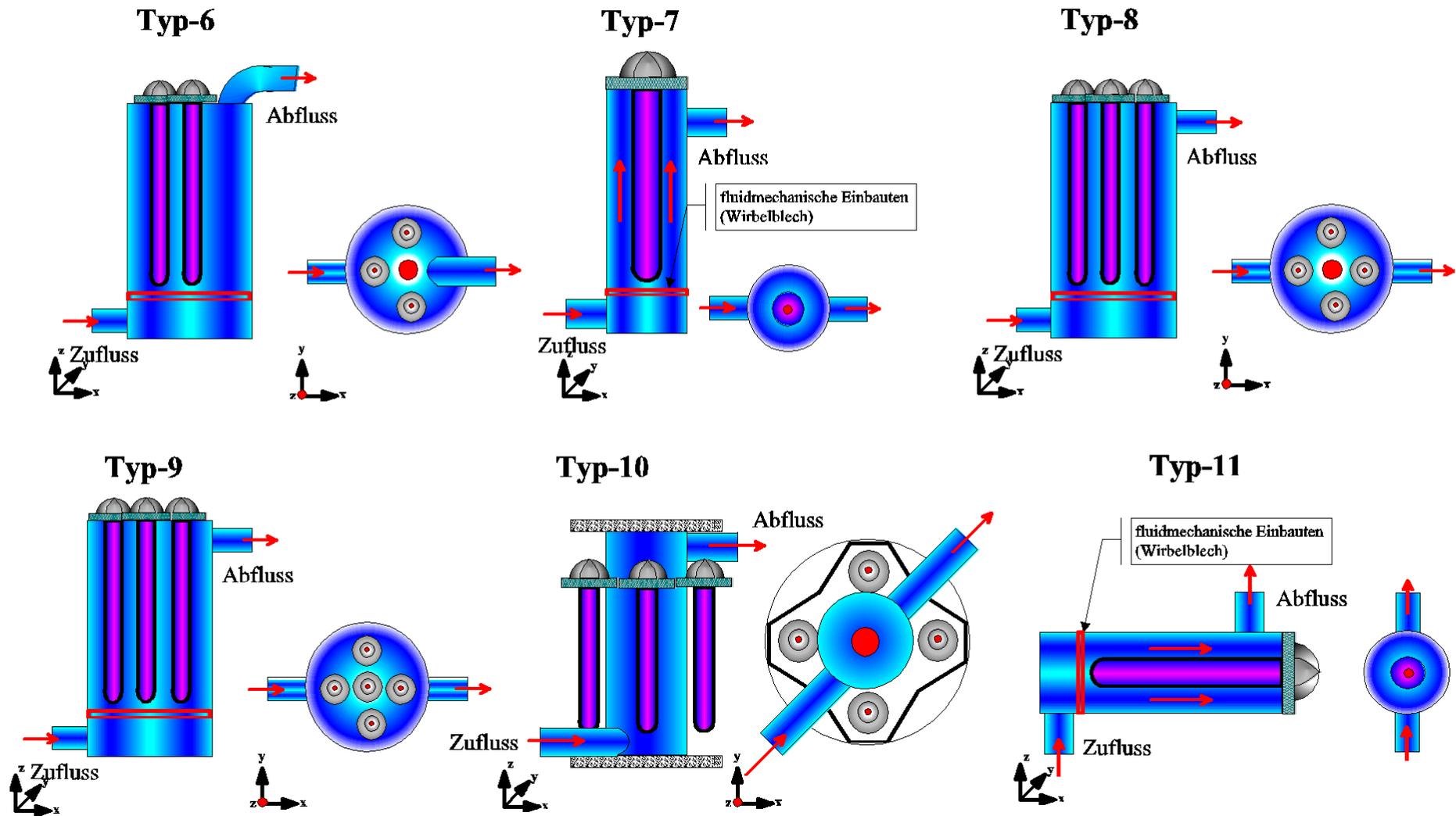
Systematik bekannter Reaktorkonstruktionen - Teil 1

Klasse {A}, Gruppe {1} "Zylinderförmige Reaktoren"



Systematik bekannter Reaktorkonstruktionen - Teil 2

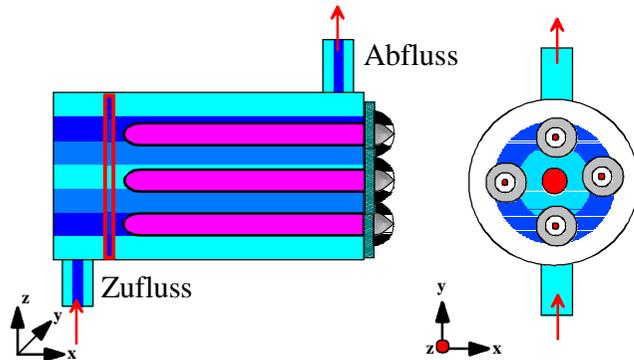
Klasse {A}, Gruppe {1} "Zylinderförmige Reaktoren"



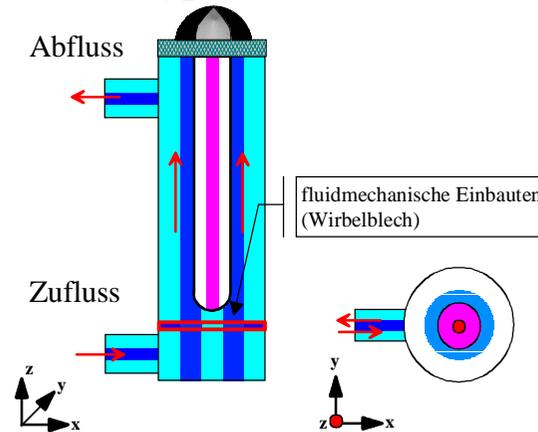
Systematik bekannter Reaktorkonstruktionen - Teil 3

Klasse {A}, Gruppe {1} "Zylinderförmige Reaktoren"

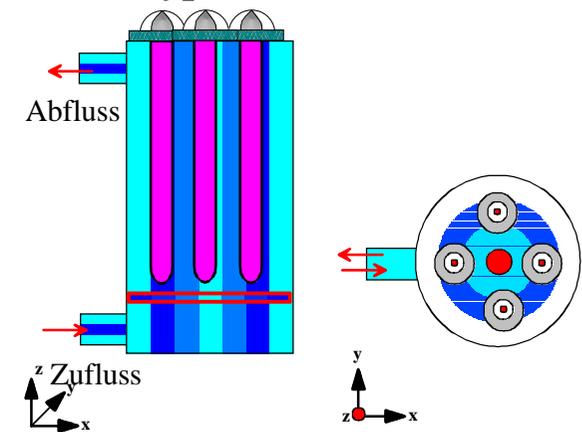
Typ-12



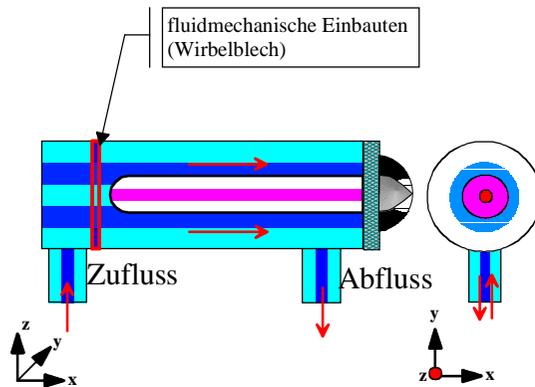
Typ-13



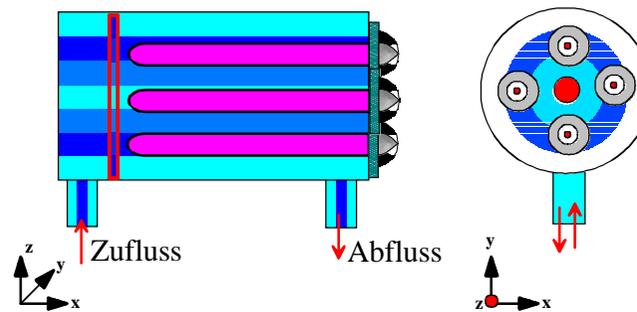
Typ-14



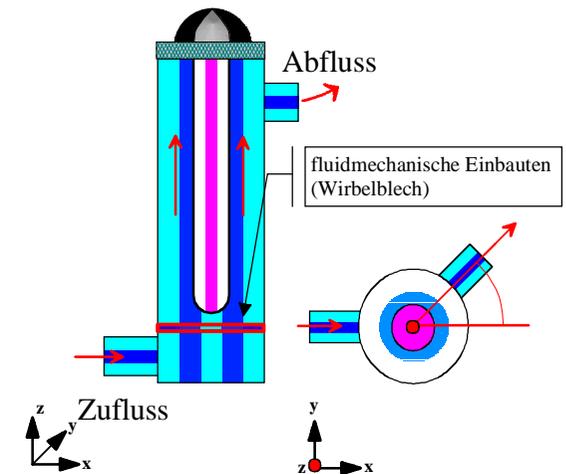
Typ-15



Typ-16



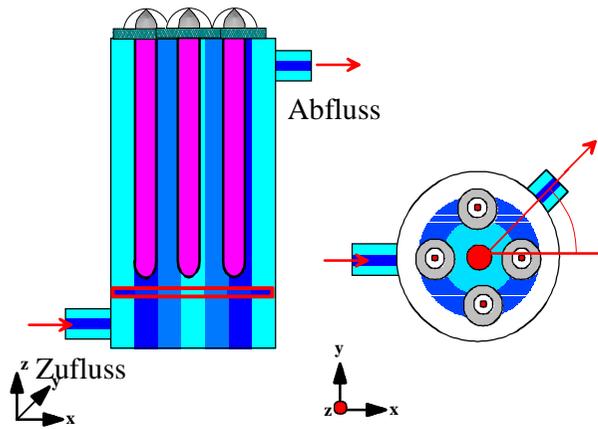
Typ-17



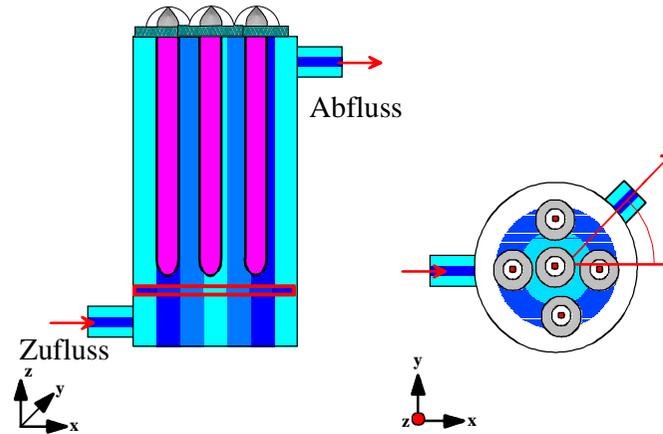
Systematik bekannter Reaktorkonstruktionen - Teil 4

Klasse {A}, Gruppe {1} "Zylinderförmige Reaktoren"

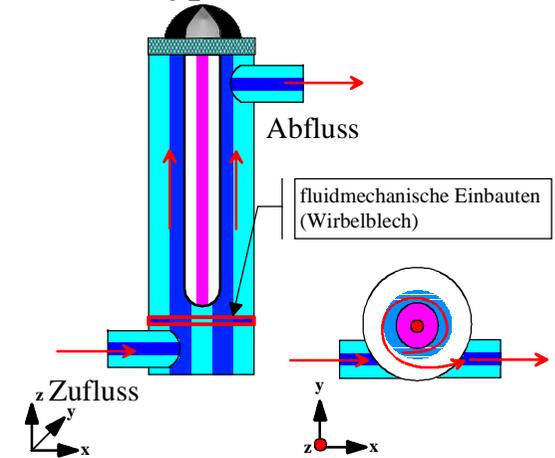
Typ-18



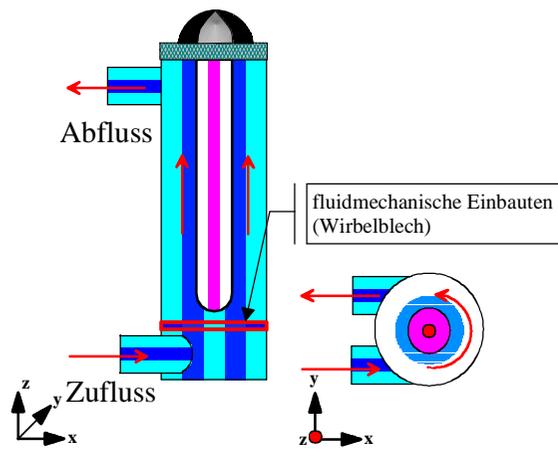
Typ-19



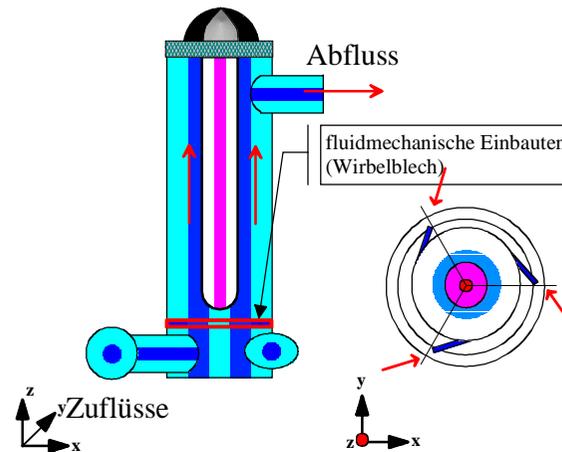
Typ-20



Typ-21



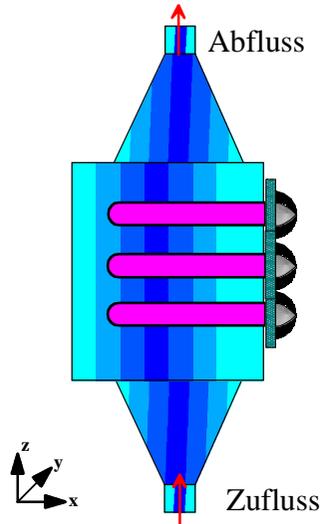
Typ-22



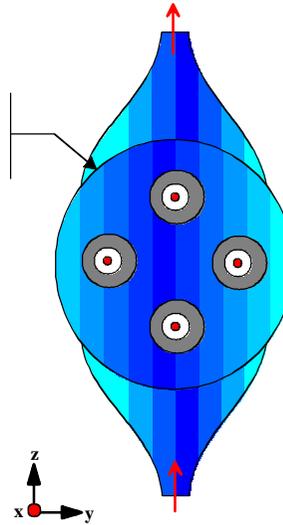
Systematik bekannter Reaktorkonstruktionen - Teil 5

Klasse {A}, Gruppe {1} "Zylinderförmige Reaktoren"

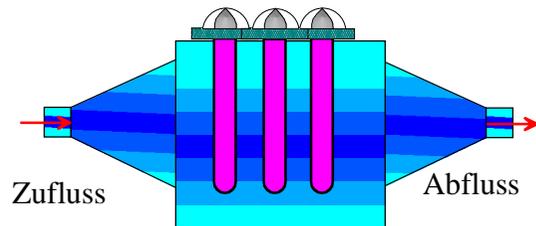
Typ-23



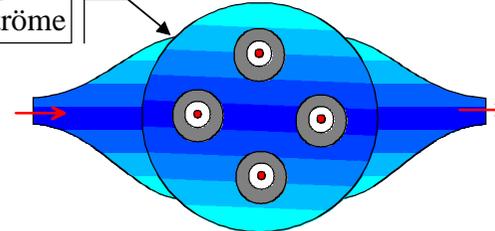
Bauform für große
Volumenströme



Typ-24



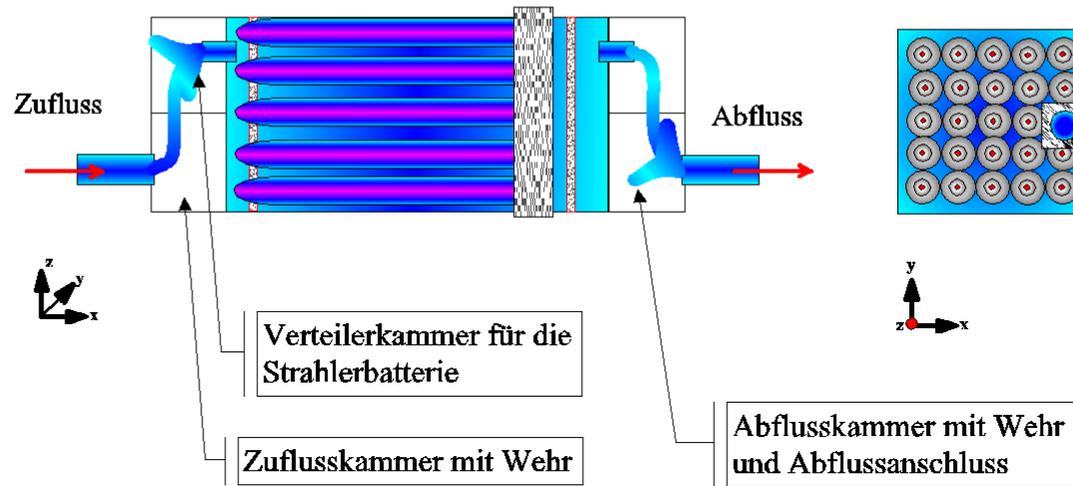
Bauform für große
Volumenströme



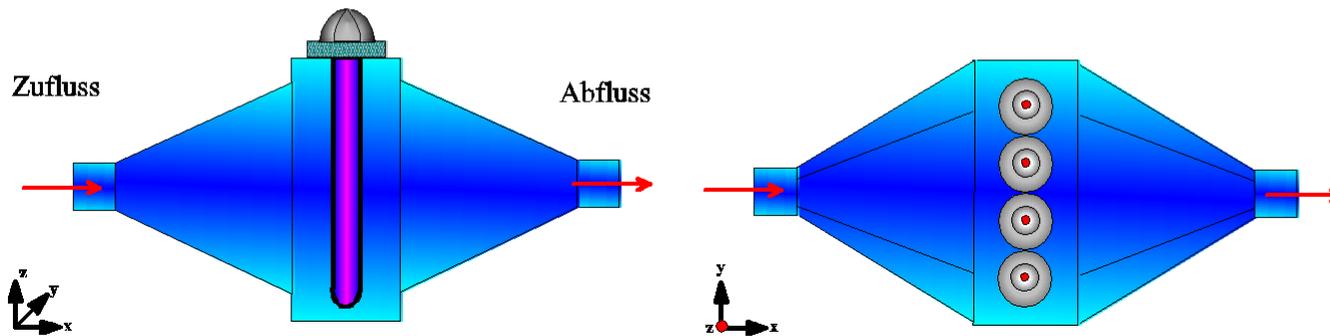
Systematik bekannter Reaktorkonstruktionen - Teil 6

Klasse {A}, Gruppe {2} "Quaderförmige Reaktoren"

Typ-1



Typ-2



Systematik bekannter Reaktorkonstruktionen - Teil 7

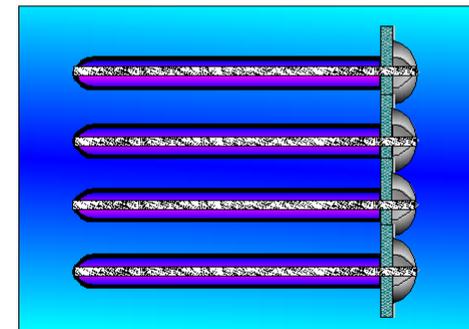
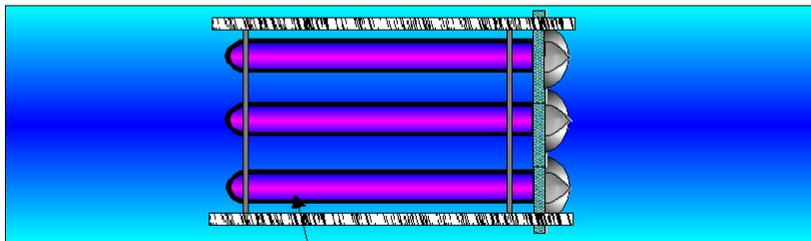
Klasse {B}, Gruppe {1} "Rinnenförmige Reaktoren"

Typ-1

Abflußrinne in einem Klärwerk mit UV-Desinfektion

Zufluss

Abfluss



Strahlerbatterie mit Kippmechanismus
und automatischer Reinigung

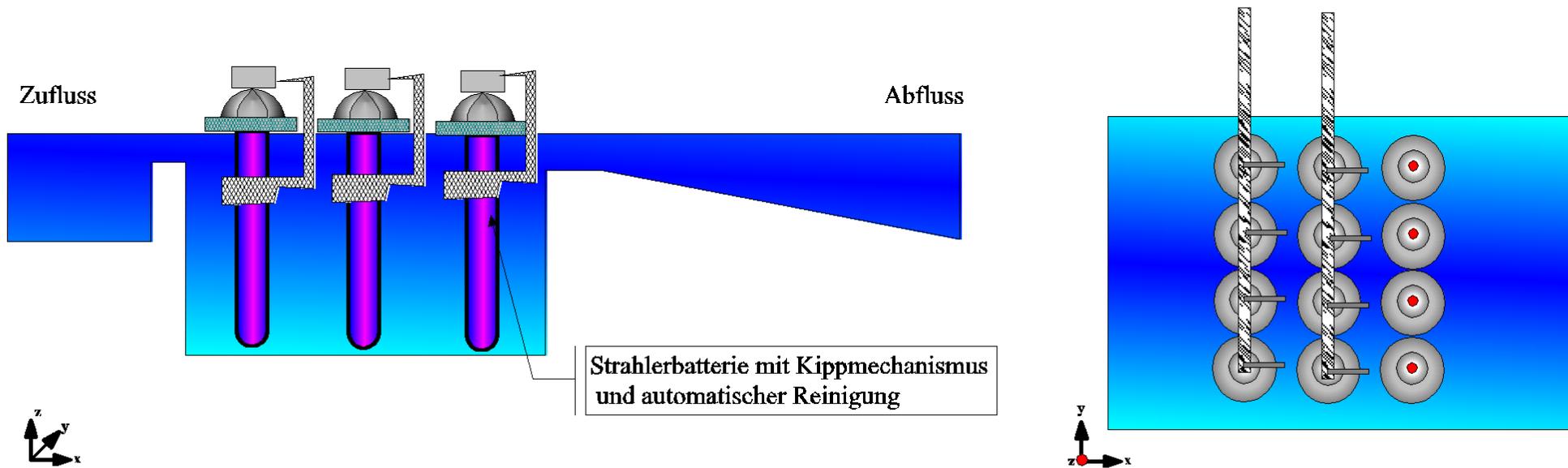


Systematik bekannter Reaktorkonstruktionen - Teil 8

Klasse {B}, Gruppe {1} "Rinnenförmige Reaktoren"

Typ-2

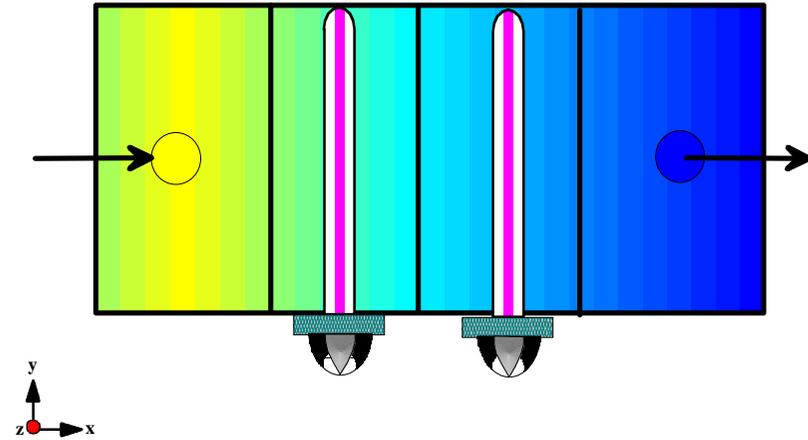
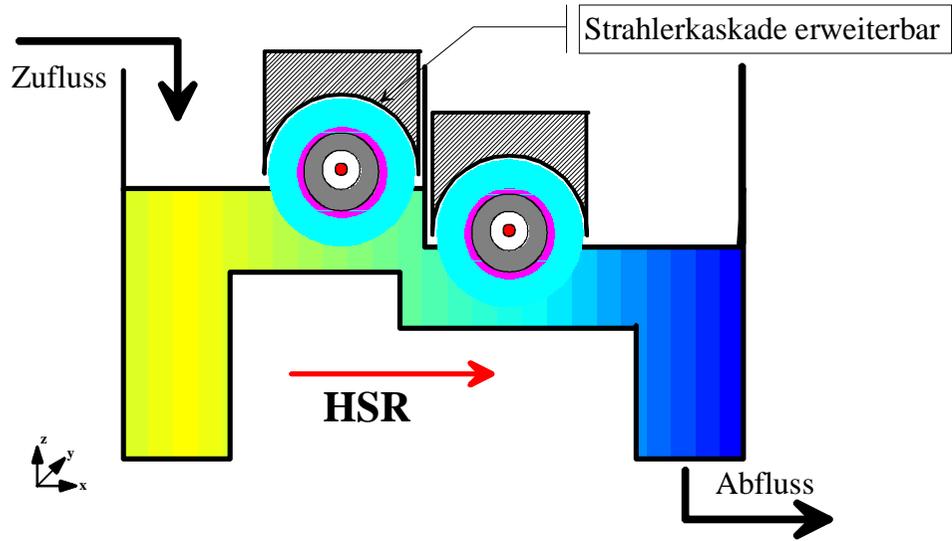
Abflußrinne in einem Klärwerk mit UV-Desinfektion



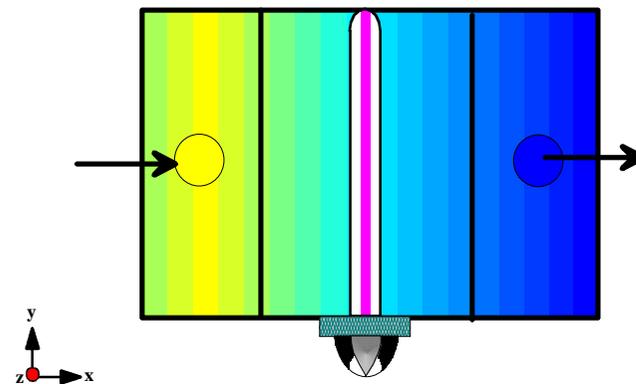
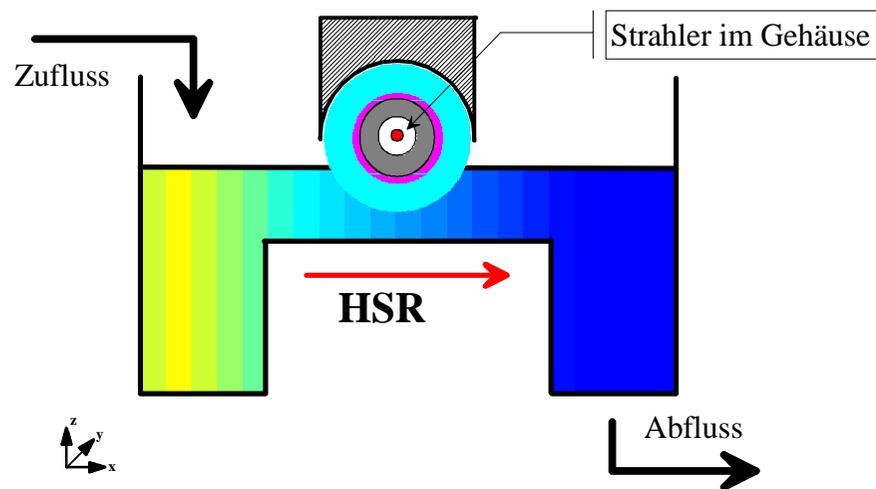
Systematik bekannter Reaktorkonstruktionen - Teil 9

Klasse {B}, Gruppe {2} "Kaskadenförmige Reaktoren"

Typ-1

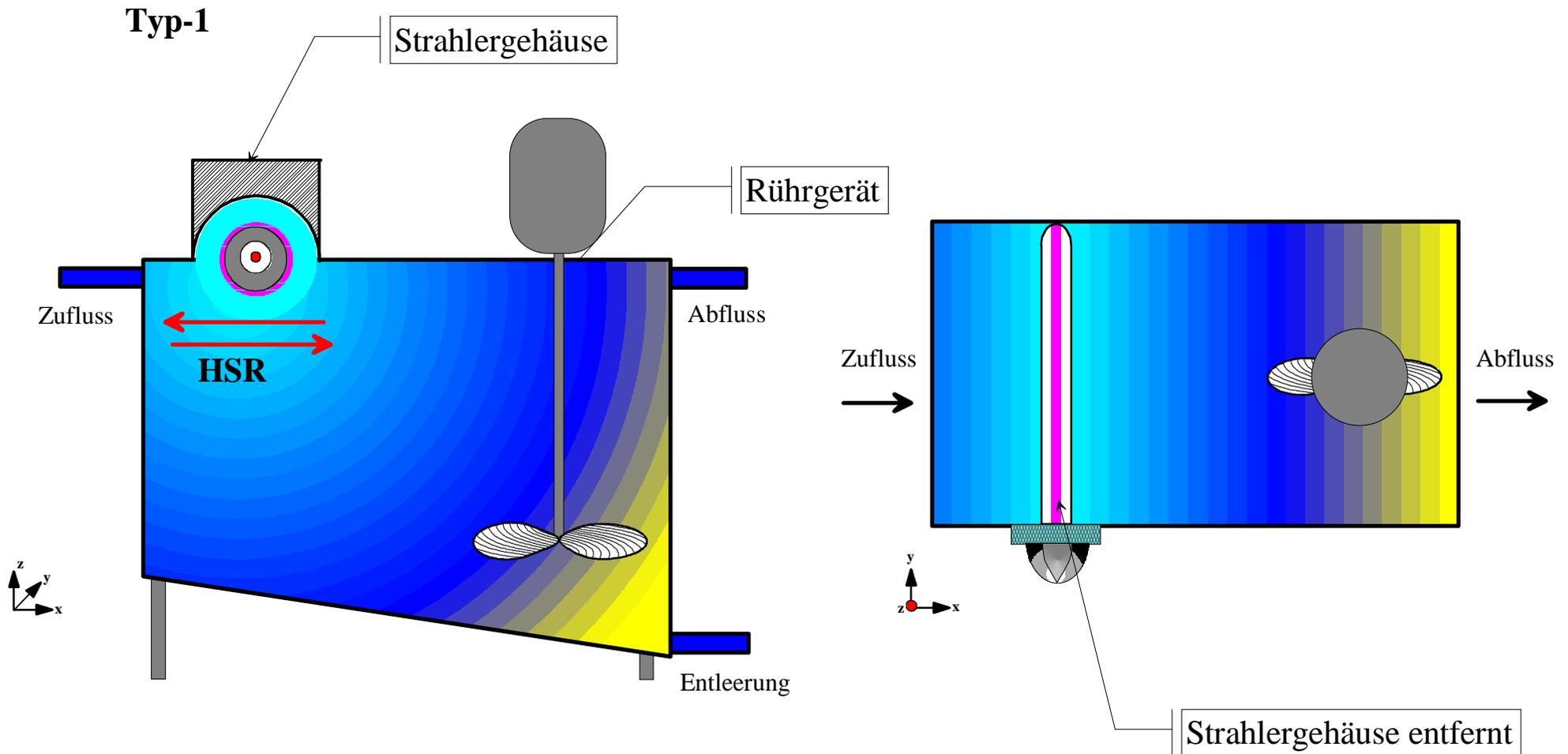


Typ-2



Systematik bekannter Reaktorkonstruktionen - Teil 10

Klasse {B}, Gruppe {3} "Beckenförmige - Reaktoren"



Firmenunterlagen (Korrespondenzen)

- [K 1] AQUA-Butzke Werke AG
D-45964 GLADBECK, Beisenstr. 39-41
- [K 2] AQUA-Butzke Werke AG
D-14974 LUDWIGSFELDE, Parkstr. 1-5
- [K 3] Chemviron Carbon GmbH
D-63263 NEU-ISENBURG, Martin-Bahaim-Str. 6
- [K 4] DELTA UV Entkeimungstechnik
D-4817 LEOPOLDSHÖHE, Herforder Str. 240a, PF 1162
- [K 5] DÜKER - Eisenwerke AG & Co. KGaA
D-63844 LAUFACH, Postfach 1120
- [K 6] ENVIRO - CHEMIE Abwassertechnik GmbH
D-64380 ROSSDORF, In den Leppsteinswiesen 9
- [K 7] G.E.R.U.S.
BERLIN
- [K 8] G.L.E. mbH (NARVA)
D-10365 BERLIN, Herzbergstr. 26
- [K 9] grünbeck -WASSERAUFBEREITUNG
D-89416 HÖCHSTÄDT a.d. Donau, Industriestr. 1
- [K 10] Heraeus Noblelight GmbH,
Heraeusstr. 12-14, D-63450 HANAU
- [K 11] KATADYN Deutschland GmbH
D-80672 MÜNCHEN, PF 210226
- [K 12] NSW Umwelttechnik
D-26944 NORDENHAM, PF 1464
- [K13] steril air Deutschland
D-78476 ALLENSBACH, Zur Halde 16
- [K 14] UEBERALL Umweltschutz GmbH
D-25436 UETERSEN, Tornescher Weg 105
- [K 15] UMEX GmbH Dresden
D-01217 DRESDEN, Gostritzer Str. 61-63
- [K 16] UTG Umwelttechnik und Gerätebau GmbH
ERFURT, Rudolfstr. 47

- [K 17] UV - Consulting Peschl
D-55294 BODENHEIM, PF 52
- [K 18] UV SYSTEME GmbH
D-69123 HEIDELBERG, Wieblinger Weg 100
- [K 19] UVAUDES Umwelttechnik GmbH & Co. KG.
D-82362 WEILHEIM, Am Frischanger 2
- [K 20] VitaTech UV-Systeme GmbH
D-63579 FREIGERICHT, Brunnenstr. 11-13
- [K 21] WaCo Wassertechnik Consult GmbH
D-22605 HAMBURG, Grottenstr. 3
- [K 22] WEDECO KATADYN GmbH
D-32051 HERFORD, Boschstr. 4
- [K 23] WEDECO GmbH
D-06749 BITTERFELD, Röhrenstr. 17
- [K 24] Wolfgang Schenk GmbH
D-06886 Lutherstadt WITTENBERG, Arthur-Schnitzler-Str. 10a
- [K 25] BERSON UV techniek
NL 5674 TL NUENEN, P.O. Box 90
(D-12163 BERLIN, Feuerbachstr.45; Anschrift des Vertreters in Deutschland)
- [K 26] BWT Wassertechnik GmbH
A-5310 MONDSEE, Walter-Simmer-Str. 4
- [K 27] USF Wallace&Tiernan GmbH
D-89312 GÜNZBURG, Auf der Weide 10
- [K 28] Trojan Technologies Deutschland GmbH
D-63825 SCHÖLLKRIPPEN, Industriestr. 1a
- [K 29] VISA UV-Technologie GmbH
A-5020 SALZBURG, Vogelweider Str. 56
- [K30] NARVA
Brand - Erbisdorfer Lichtquellenproduktions- und Vertriebsgesellschaft mbH
Industriegebiet Nord
Erzstr. 22
D-09618 BRAND - ERBISDORF

Anlage 4 # TANGENTEN - METHODE

Ziel:	Definition der Integrationsgrenzen in R^2 und R^3 sowie Untersuchung des Anteils Strahlungsquellen-Oberfläche an der Bestrahlung des Mikroorganismus bzw. der <i>Elementarzelle</i> .
Prinzip:	Der Ort des Mikroorganismus definiert den Anteil der Oberfläche der Strahlungsquelle, die sich an seiner Bestrahlung beteiligt. Die Schnittpunkte der Polaren (zum Ort des Mikroorganismus) mit der Erzeugenden der Geometrie der Plasma-Strahlungsquelle wird berechnet. Die Integrationsgrenzen werden festgelegt.
Weiterführende Literatur:	SMIRNOV, FICHTENHOLZ, BRONSTEIN u.a.. Auch TRIEBEL [170], COURANT et al. [171] und KNOPP [172].

In R^2 wird die Ellipse bzw. der Kreis in beliebiger Lage, die bzw. der schließlich die Leitkurven für die Erzeugenden der betrachteten Geometrien der Strahlungsquellen bilden, durch die bekannte Gleichung

$$\frac{(x-c)^2}{a^2} + \frac{(y-d)^2}{b^2} = 1 \quad (4.1)$$

mit der Lage des Mittelpunktes bei c, d und mit der großen Halbachse a und der kleinen Halbachse b beschrieben. Daraus ist trivial die Kreisgleichung und die jeweiligen Gleichungen für die Mittelpunktslagen sofort ableitbar. Für die allgemeine Definition der Tangentengleichung an die vorstehenden Leitkurven und den Berührungspunkt P_1 gilt

$$\frac{(x-c) \cdot (x_1-c)}{a^2} + \frac{(y-d) \cdot (y_1-d)}{b^2} = 1 \quad (4.2)$$

deren Sonderfälle Kreis und Mittelpunkt - Lagen sofort hingeschrieben werden können. Im hier betrachteten Anwendungsfall gibt es für die Ellipse und den Kreis jeweils zwei Lösungen und somit zwei Tangentenberührungspunkte, P_1 und P_2 , bezüglich des Punktes P_0 . Die Tangentenberührungspunkte P_1 und P_2 erfüllen außerdem die Gleichung der Polaren

$$\frac{(x_0-c) \cdot (x-c)}{a^2} + \frac{(y_0-d) \cdot (y-d)}{b^2} = r_q^2 \quad (4.3)$$

identisch, wodurch eine Methode zur Verfügung steht, den strahlenden Bereich auf dem Umfang festzulegen, indem man die Schnittpunkte der Polaren mit der Leitlinie berechnet, Bilder A4-1 und A4-2.

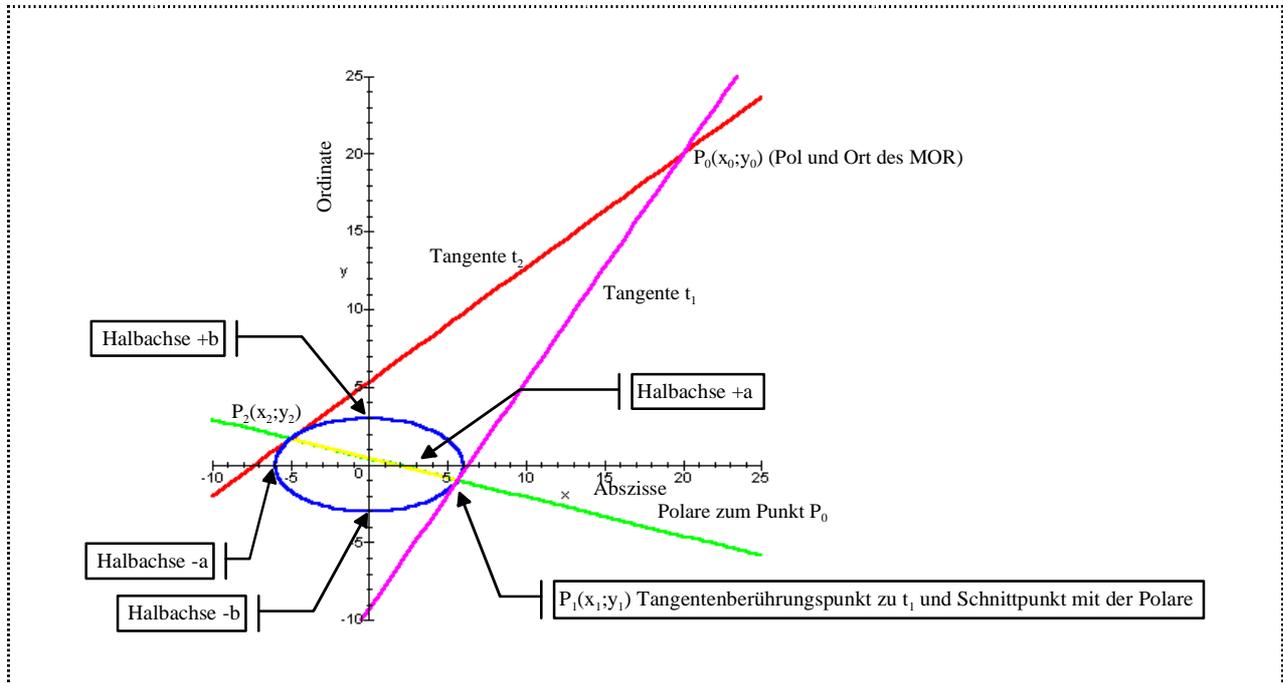


Bild A4-1: Visualisierung der Verfahrensschritte Ellipse

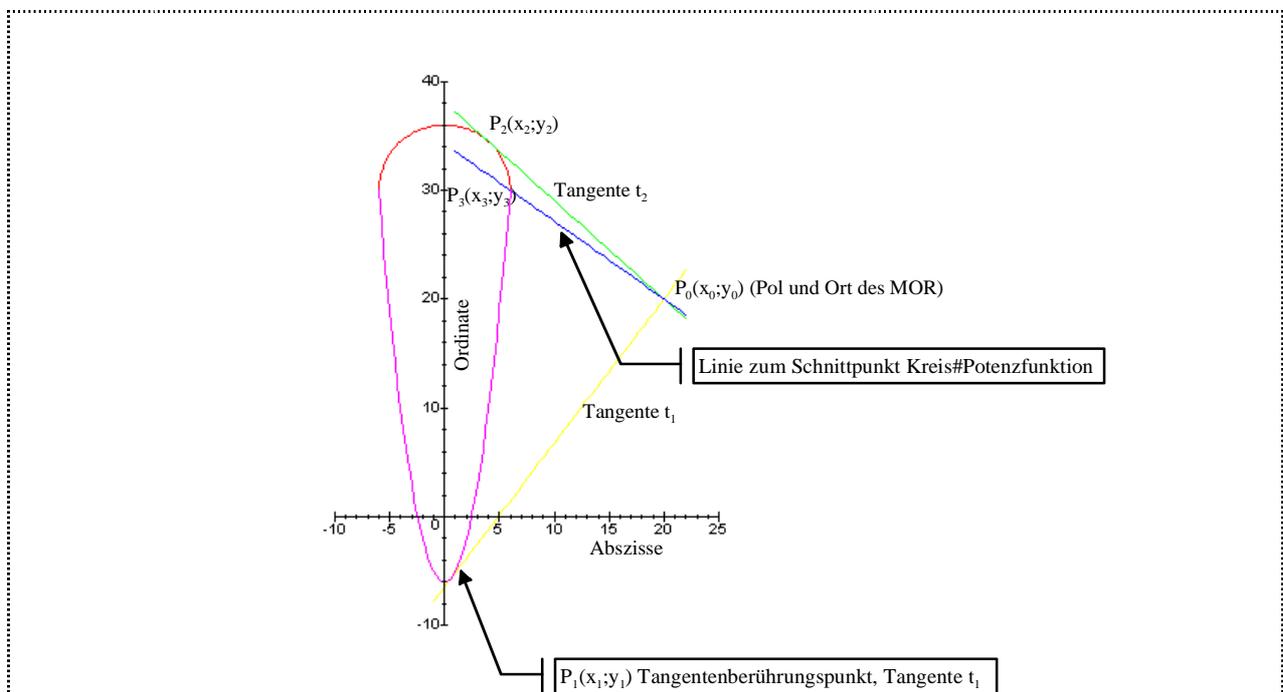


Bild A4-2: Visualisierung der Verfahrensschritte zusammengesetzte Leitlinie

Da die Arbeit einen engen Bezug zur ingenieurtechnischen Anwendung anstrebt und eine Implementierung der Erkenntnisse in Simulationsprogramme vorschlägt, werden die vorstehenden Verfahrensgleichungen zur Gebietsdefinition in der Tabelle A4-1 „*Mathematische Ansätze - Be-*

reichs- und Integrationsgrenzen - Berechnung“ hier als Zusammenstellung wiedergegeben. Bei einer Strahlergeometrie, die sich aus zusammengesetzten analytischen Funktionen ergibt, ist nach dem Beispiel, Bild A4-2, und nach den Formeln der zuvor zitierten Tabelle zu verfahren.

Die Folge aus einer in den Bildern verdeutlichten Strahlergeometrie, die derzeit nicht in der Anwendung ist, besteht in einer nicht zylindersymmetrischen Verteilung des Strahlenflusses Φ im effektiven Volumen V_{eff} des UV-Reaktors. Dieser Sachverhalt ist aus den Entfernungen der Punkte der Leitlinien bis zum Ort des Mikroorganismus ableitbar. Den Ableitungen der *GFM* folgend beeinflusst dieser Umstand auch die Bestrahlung H . Das Bild A4-3 verdeutlichen diese Konsequenz. Die Integrationsgrenzen für die reaktoroptische Komponente der *GFM* lassen sich mit der Tangentenmethode auch für diese Fälle bestimmen.

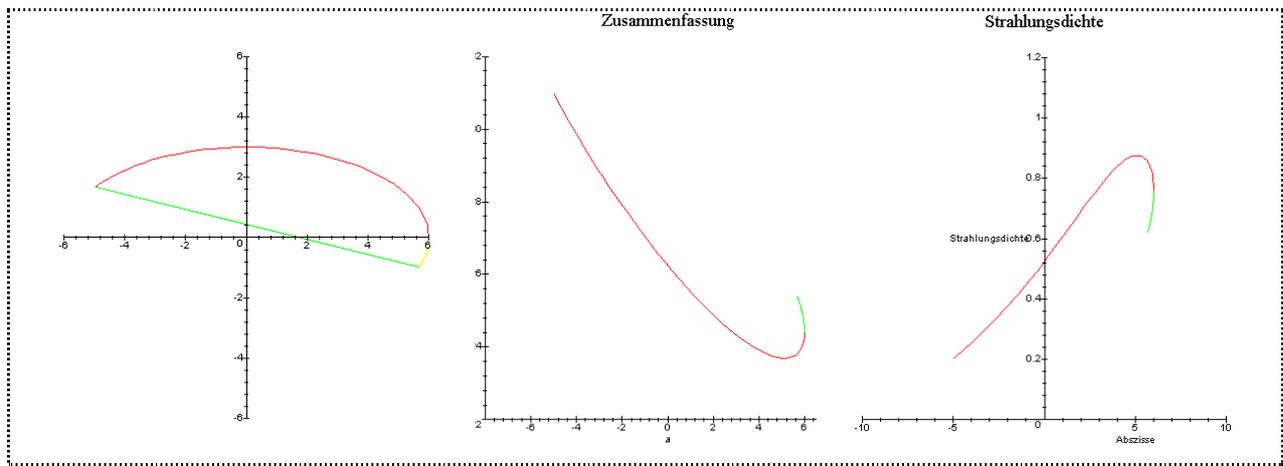


Bild A4-3: Ergebnisse der Berechnungen für eine Ellipse (Verfahrensdemonstration)

Vorstehende Grafiken wurden für den Fall berechnet, dass die Strahlungsquelle einen elliptischen Querschnitt mit den Halbachsen 6 cm und 3 cm hat (Mittelpunktlage). Der Mikroorganismus befindet sich im Punkt $P_0 = (20,20)$ in \mathbb{R}^2 . Im mittleren Bildabschnitt werden die Entfernungen zu den Tangenten-Berührungspunkte dargestellt. Da sich hier die Bestrahlungsstärke auf eine Linie -Ausschnitt der Erzeugenden- bezieht, wurde als Synonym die Strahlungsdichte verwendet. Der Strahlungsfluss wurde mit dem Zahlenwert 100 und der Extinktionsmodulus $m_n = 0,2$ [1/cm] angesetzt.

Auf der Basis der EXIMER-Strahler lassen sich zukünftig fluidmechanisch günstige Strahlungsquellen schaffen.

Tabelle A4-1: Mathematische Ansätze - Bereichs- und Integrationsgrenzen - Berechnung

Geometrie		Ellipse	Kreis	Kombination
Gleichung / Formalismus		kartesisch bzw. parametrisch mit $x = a \cdot \cos(\varphi)$ und $y = b \cdot \sin(\varphi)$	kartesisch bzw. parametrisch mit $x = R \cdot \cos(\varphi)$ und $y = R \cdot \sin(\varphi)$	kartesisch
Gleichung in allg. Lage		$\frac{(x-c)^2}{a^2} + \frac{(y-d)^2}{b^2} = 1$	$(x-c)^2 + (y-d)^2 = r_Q^2$	willkürlich gewählte Abmessungen eines kombiniert geformten Strahlers (Halbkreis und Potenzfunktion)
Tangente	$P_1(x_1; y_1)$	$\frac{(x-c) \cdot (x_1-c)}{a^2} + \frac{(y-d) \cdot (y_1-d)}{b^2} = 1$	$(x-c) \cdot (x_1-c) + (y-d) \cdot (y_1-d) = r_Q^2$	
Polare	$P_0(x_0; y_0)$	$\frac{(x_0-c) \cdot (x-c)}{a^2} + \frac{(y_0-d) \cdot (y-d)}{b^2} = r^2$	$(x_0-c) \cdot (x-c) + (y_0-d) \cdot (y-d) = r_Q^2$	
Gleichung MP - Lage		$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$	$x^2 + y^2 = r_Q^2$	$x^2 + (y-d)^2 = r_Q^2$ nur oberer Teil; $d=30, r_Q=6$ $y + d_2 = x^2$ ganzer DB; $d_2=6$
Tangente	$P_1(x_1; y_1)$	$\frac{x \cdot x_1}{a^2} + \frac{y \cdot y_1}{b^2} = 1$	$x \cdot x_1 + y \cdot y_1 = r_Q^2$	$x \cdot x_1 + (y-d) \cdot (y_1-d) = r_Q^2$
Tangente	$P_2(x_2; y_2)$			$y - y_0 = \left(\frac{y_2 - y_0}{x_2 - x_0} \right) \cdot (x - x_0)$ $m_2 = \frac{d}{dx_2} (x_2^2 - d_2) = 2x_2$
Polare	$P_0(x_0; y_0)$	$\frac{x_0 \cdot x}{a^2} + \frac{y_0 \cdot y}{b^2} = 1$	$x_0 \cdot x + y_0 \cdot y = r_Q^2$	$x_0 \cdot x + (y_0 - d) \cdot (y - d) = r_Q^2$
Schnittpunkte	$P_3(x_3; y_3)$			$x_3^2 + (y_3 - 30)^2 = r_Q^2$ $y_3 = x_3^2 + d_2$

Tabelle A4-2: Mathematische Ansätze - Strahlungsberechnung in R²

Geometrie		Ellipse	Kreis	Kombination
Gleichung / Formalismus				
Schnittpunkte # Integrationsgrenzen	P _i (x _i ;y _i)	Schnitt Ellipse (in MP - Lage) und Polare für P ₀	Schnitt Kreis (in MP - Lage) und Polare für P ₀	Schnitt Halbkreis, Potenzfunktion und Tangentenberührungspunkte für P ₀
Entfernung nach P ₀ bzw. Ort des MOR	P ₀ (x ₀ ;y ₀)	$ \mathbf{r} = \mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}$	$ \mathbf{r} = \mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}$	$ \mathbf{r} = \mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}$
Länge des strahlenden Bogens bzgl. MOR P ₀		$S_{MOR} = \int_{P_1}^{P_2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx$	$S_{MOR} = \int_{P_1}^{P_2} \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} dt$	$S_{MOR} = \int_{P_1}^{P_2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx$
Gesamtlänge des strahlenden Bogens		$S_B = \int_{P_1}^{P_3} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx + \int_{P_2}^{P_3} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx$	$S_B = \int_0^{2\pi} \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} dt$	$S_B = \int_{P_1}^{P_3} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx + \int_{P_2}^{P_3} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx$
Anteil der strahlenden Kurve am Gesamtumfang	R[%]	$R = \frac{S_{MOR}}{S_B} \cdot 100$	$R = \frac{S_{MOR}}{S_B} \cdot 100$	$R = \frac{S_{MOR}}{S_B} \cdot 100$
Def. Strahlungsflussdichte	$\Phi_{D0} = \frac{\Phi_0}{S_B}$ [W/Länge]	$\Phi_D = \Phi_{D0} e^{-m_n \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}}$	$\Phi_D = \Phi_{D0} e^{-m_n \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}}$	$\Phi_D = \Phi_{D0} e^{-m_n \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}}$
Strahlungsfluss	Φ in [W]	$\Phi = \int_A^E \Phi(S) dS$	$\Phi = \int_A^E \Phi(S) dS$	$\Phi = \int_A^E \Phi(S) dS$
Strahlungsfluss	Φ in [W]		$\Phi = \int_A^E \Phi(S(x, y(x))) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx$	

Anlage 5 # REYNOLDSSche Zahlen - Abmessungen

Ziel:	Für die Simulationsrechnungen sind die UV-Reaktorgeometrie und Anfangsbedingungen vorzugeben.
Prinzip:	Wahl der UV-Reaktorgeometrie nach Gesichtspunkten der Arbeit. Berechnung der Reynolds - Zahlen für Einschätzungszwecke - Verdrängungsströmung, laminare Strömung, turbulente Strömung
Weiterführende Literatur:	BOLLRICH et al. [120], TRUCKENBRODT [122], IDELCHIK [124], KOSCHITZKY et al. [11] u a.

Die Untersuchungen der Vielzahl der UV-Reaktorkonstruktionen, vergleiche Arbeit und Anlage 3, gestatteten die Auswahl solcher auf die die *Gekoppelten Fluidmechanischen Modelle* exemplarisch und für Testzwecke angewendet werden sollten. Eine Einschätzung der Strömungsverhältnisse im Reaktor ist über die Reynolds - Zahl möglich. Hierfür wird die mittlere Strömungsgeschwindigkeit benötigt, die aus dem betreffenden Durchsatz mit dem der Reaktor betrieben wird ausgerechnet wurde. Dabei wird sich auf Herstellerangaben, vgl. Anlage 3, und auf eigene Erfahrungen bezogen [20] bis [23].

Gleichzeitig sind die mittleren Geschwindigkeiten die Anfangsbedingungen für die Simulationsrechnungen. In der Simulation ist zu beachten, dass der Zufluss genügend lang ist, so dass sich bereits dort ein Strömungsprofil ausbilden kann. Gleiches trifft auf die Gestaltung des Abflusses zu. In den Technischen Dokumentationen ([132] bis [136]) zu den Programmen werden Erfahrungswerte und Verhältnisse angegeben, die für eine sichere Simulationsrechnung vorteilhaft sind. Diese wurden während der Rechnungen bestätigt.

Tabelle A5-1: Reynolds - Zahlen und Geschwindigkeitswerte u

Reaktor Modell	{A-1-0}	{A-1-0}	{A-1-0}	{A-1-0}
Theorie				
	Zufluss	Zufluss	Ringspalt	Ringspalt
	Durchmesser: 20mm		Ringspalt: 20mm	
Volumenstrom	Geschwindigkeit (MW)	Reynolds-Zahl	Geschwindigkeit (MW)	Reynolds-Zahl
in [m ³ /h]	in [mm/s]	n. [120]	in [mm/s]	n. [120]
0,250	221,049	4.377,199	18,421	729,533
0,500	442,097	8.754,397	36,841	1.459,066
0,750	663,146	13.131,596	55,262	2.188,599
1,000	884,194	17.508,795	73,683	2.918,132
1,250	1.105,243	21.885,993	92,104	3.647,666
1,500	1.326,291	26.263,192	110,524	4.377,199
1,750	1.547,340	30.640,391	128,945	5.106,732
2,000	1.768,388	35.017,589	147,366	5.836,265
2,250	1.989,437	39.394,788	165,786	6.565,798
2,500	2.210,485	43.771,987	184,207	7.295,331
2,750	2.431,534	48.149,185	202,628	8.024,864
3,000	2.652,582	52.526,384	221,049	8.754,397
3,250	2.873,631	56.903,583	239,469	9.483,930
3,500	3.094,679	61.280,781	257,890	10.213,464
3,750	3.315,728	65.657,980	276,311	10.942,997
4,000	3.536,777	70.035,178	294,731	11.672,530
4,250	3.757,825	74.412,377	313,152	12.402,063
4,500	3.978,874	78.789,576	331,573	13.131,596
4,750	4.199,922	83.166,774	349,994	13.861,129
5,000	4.420,971	87.543,973	368,414	14.590,662

Reaktor Modell	{A-1-3}	{A-1-3}	{A-1-3}	{A-1-3}
Schenck#Koschitzky				
	Zufluss	Zufluss	Ringspalt	Ringspalt
	Durchmesser: 50mm		Ringspalt: 37mm	
Volumenstrom	Geschwindigkeit (MW)	Reynolds-Zahl	Geschwindigkeit (MW)	Reynolds-Zahl
in [m ³ /h]	in [mm/s]	n. [120]	in [mm/s]	n. [120]
0,250	35,368	1.750,879	6,035	442,141
0,500	70,736	3.501,759	12,069	884,283
0,750	106,103	5.252,638	18,104	1.326,424
1,000	141,471	7.003,518	24,139	1.768,565
1,250	176,839	8.754,397	30,173	2.210,706
1,500	212,207	10.505,277	36,208	2.652,848
1,750	247,574	12.256,156	42,242	3.094,989
2,000	282,942	14.007,036	48,277	3.537,130
2,250	318,310	15.757,915	54,312	3.979,272
2,500	353,678	17.508,795	60,346	4.421,413
2,750	389,045	19.259,674	66,381	4.863,554
3,000	424,413	21.010,554	72,416	5.305,695
3,250	459,781	22.761,433	78,450	5.747,837
3,500	495,149	24.512,312	84,485	6.189,978
3,750	530,516	26.263,192	90,519	6.632,119
4,000	565,884	28.014,071	96,554	7.074,260
4,250	601,252	29.764,951	102,589	7.516,402
4,500	636,620	31.515,830	108,623	7.958,543
4,750	671,988	33.266,710	114,658	8.400,684
5,000	707,355	35.017,589	120,693	8.842,826

Reaktor Modell	{A-1-7}	{A-1-7}	{A-1-7}	{A-1-7}
Ueberall GmbH				
	Zufluss	Zufluss	Ringspalt	Ringspalt
	Durchmesser: 25,4mm		Ringspalt: 30,5mm	
Volumenstrom	Geschwindigkeit (MW)	Reynolds-Zahl	Geschwindigkeit (MW)	Reynolds-Zahl
in [m³/h]	in [mm/s]	n. [120]	in [mm/s]	n. [120]
0,250	137,050	3.446,613	15,929	962,022
0,500	274,101	6.893,226	31,857	1.924,043
0,750	411,151	10.339,839	47,786	2.886,065
1,000	548,201	13.786,452	63,714	3.848,087
1,250	685,252	17.233,066	79,643	4.810,108
1,500	822,302	20.679,679	95,571	5.772,130
1,750	959,353	24.126,292	111,500	6.734,152
2,000	1.096,403	27.572,905	127,428	7.696,173
2,250	1.233,453	31.019,518	143,357	8.658,195
2,500	1.370,504	34.466,131	159,286	9.620,217
2,750	1.507,554	37.912,744	175,214	10.582,239
3,000	1.644,604	41.359,357	191,143	11.544,260
3,250	1.781,655	44.805,970	207,071	12.506,282
3,500	1.918,705	48.252,584	223,000	13.468,304
3,750	2.055,755	51.699,197	238,928	14.430,325
4,000	2.192,806	55.145,810	254,857	15.392,347
4,250	2.329,856	58.592,423	270,785	16.354,369
4,500	2.466,907	62.039,036	286,714	17.316,390
4,750	2.603,957	65.485,649	302,643	18.278,412
5,000	2.741,007	68.932,262	318,571	19.240,434

Reaktor Modell	{A-1-7}b	{A-1-7}b	{A-1-7}b	{A-1-7}b
{{A-1-7} vergrößert)				
	Zufluss	Zufluss	Ringspalt	Ringspalt
	Durchmesser: 25,4mm		Ringspalt: 68,5mm	
Volumenstrom	Geschwindigkeit (MW)	Reynolds-Zahl	Geschwindigkeit (MW)	Reynolds-Zahl
in [m³/h]	in [mm/s]	n. [120]	in [mm/s]	n. [120]
0,250	137,050	3.446,613	3,865	524,215
0,500	274,101	6.893,226	7,729	1.048,431
0,750	411,151	10.339,839	11,594	1.572,646
1,000	548,201	13.786,452	15,459	2.096,862
1,250	685,252	17.233,066	19,323	2.621,077
1,500	822,302	20.679,679	23,188	3.145,292
1,750	959,353	24.126,292	27,053	3.669,508
2,000	1.096,403	27.572,905	30,917	4.193,723
2,250	1.233,453	31.019,518	34,782	4.717,939
2,500	1.370,504	34.466,131	38,647	5.242,154
2,750	1.507,554	37.912,744	42,511	5.766,369
3,000	1.644,604	41.359,357	46,376	6.290,585
3,250	1.781,655	44.805,970	50,240	6.814,800
3,500	1.918,705	48.252,584	54,105	7.339,016
3,750	2.055,755	51.699,197	57,970	7.863,231
4,000	2.192,806	55.145,810	61,834	8.387,447
4,250	2.329,856	58.592,423	65,699	8.911,662
4,500	2.466,907	62.039,036	69,564	9.435,877
4,750	2.603,957	65.485,649	73,428	9.960,093
5,000	2.741,007	68.932,262	77,293	10.484,308

Tabelle A5-2: Beispielreaktoren - Parameter

Reaktor nach		SCHENCK, KOSCHITZKY et al. [11] und BERNHARDT et al. [12] {Klasse, Gruppe, Typ} entspricht {A-1-3}	KNIELING ([20] bis [23]) entspricht {A-1-20}	KNIELING ([20] bis [23]) entspricht {A-1-5}
eff. Länge L_{eff}	in [mm]	580	106	1000
Radius Strahlungsquelle r_{sq}	in [mm]	11	/	12
Radius Schutzrohr r_{Q}	in [mm]	30,5	30	/
Wanddicke Schutzrohr d_{W}	in [mm]	1	/	/
Radius Reaktor r_{W}	in [mm]	67	50	250
Schichtdicke d_{Fl}	in [mm]	36,5	20	verschieden
Strahler		Quecksilber - Mitteldruck Heraeus Noblelight (D)Q5823	Quecksilber - Mitteldruck	Quecksilber - Niederdruck
Anzahl der Strahler n_{St}		1	1	18
Elektrische Leistung P_{el}	in [W]	5800	500	18 x 140
Leistung bei $\lambda = 253,7 \text{ nm}$	in [W]	930 bei ($200 < \lambda < 280 \text{ nm}$)	10	18 x 56
Anteil der Strahleroberfläche bei r_{W} und $z_0 = 0,5 \cdot L_{\text{eff}}$	in [%]	44,75	n.n.	n.n.
Extinktionsmodulus m_{n}	in [$1/\text{cm}^2$]			

Tabelle A5-3: Beispielreaktoren - Parameter für Berechnungen

berechneter Reaktor		idealer linearer Reaktor {Klasse, Gruppe, Typ} {A-1-0} Ableitung nach KNIELING ([20] bis [23])	häufigste industrielle Reaktorkonstruktion {A-1-7} UEBERALL Umweltschutz GmbH	häufigste industrielle Reaktorkonstruktion {A-1-7}_b UEBERALL Umweltschutz GmbH	Experimenteller Reaktor {ABU} nach ABU GHARARAH et al. [99]
eff. Länge L_{eff}	in [mm]	380	840	840	438
Radius Strahlungsquelle r_{Sq}	in [mm]	20	7,5	7,5	13
Radius Schutzrohr r_{Q}	in [mm]	/	/	/	/
Wanddicke Schutzrohr d_{W}	in [mm]	/	/	/	/
Radius Reaktor r_{W}	in [mm]	40	38	76	75
Schichtdicke d_{Fl}	in [mm]	20	30,5	68,5	62
Strahler		Quecksilber - Niederdruck	Quecksilber - Niederdruck	Quecksilber - Niederdruck	Quecksilber - Niederdruck
Anzahl der Strahler n_{St}		1	1	1	1
Elektrische Leistung P_{el}	in [W]	25	40	40	
Leistung bei $\lambda = 253,7 \text{ nm}$	in [W]	10	14	14	10 und 3,5
Anteil der Strahleroberfläche bei r_{W} und $z_0 = 0,5 * L_{\text{eff}}$	in [%]	33,33	43,68	46,85	44,45
Extinktionsmodulus m_{n}	in [1/cm ²]	0,22	0,22	0,22	0,44

Anlage 6 # NUMERISCHE SIMULATION
 - UV-Reaktoren {A-1-0}, {A-1-7} und {A-1-7}b -

Ziel:	Tabellarische Darstellung beispielgebender Werte aus den numerischen Simulationen mit den elektronischen Modellen der genannten UV-Reaktoren.
Prinzip:	Anwendung des <i>GFM</i> mit der Hybrid - Variante und mit der <i>spread-sheet</i> - Variante
Weiterführende Literatur:	KAPITEL 4 der Arbeit

Alle Einzelheiten der numerischen Simulationen an den UV-Reaktormodellen {A-1-0}, {A-1-7} und {A-1-7}b(ig) sind in den entsprechenden Kapitel der Arbeit nachlesbar. Die Zusammenstellung in Tabellenform gestattet es sich schnell über Maximalwerte und Minimalwerte zu informieren.

Bei der Bewertung der Ergebnisse nach der *spread-sheet*-Variante des *GFM* ist zu bedenken, dass unter den Strömungsprofilen Verdrängung, laminare Strömung und turbulente Strömung lediglich die beiden zuletzt genannten vom Ansatz her die Haftbedingungen an der Oberfläche des Strahlers r_q und an der Innenseite der Reaktorwand r_w erfüllen. Wenn die Strömungsgeschwindigkeit $\rightarrow 0$ geht wird die Bestrahlung unendlich groß. In den Berechnungen zu diesen Strömungsprofilen wurde solche Verhältnisse ausgeklammert, indem die Berechnungen in einer geringen Entfernung (0,5 mm) vom betreffenden kritischen Maß durchgeführt wurden.

Wenn sich die Tabellen auf Mikroorganismus - Bahnen beziehen, wurden die *GFM* immer mit der Hybrid-Variante gerechnet.

Es ist möglich die Resultate, die mit der Hybrid-Variante und mit der *spread-sheet*-Variante errechnet wurden, zu vergleichen. Dazu können alle Werte in der Tabelle A6-1, Bahnen A10_c23 - c41, aber nur die Werte der Tabelle A6-4 turbulent $Q=0,67..$ [m^3/h] direkt herangezogen werden. Analog gilt diese Denkweise bei den Reaktoren {A-1-7} und {A-1-7}b für $Q=2,553$ [m^3/h]. Die Volumenstromwerte, hier Q , entsprechen den genannten Anfangswerten der mittleren Strömungsgeschwindigkeit v_m in den Simulationsrechnungen.

Tabelle A6 - 1: Beurteilungsparameter - Auswahl von Mikroorganismus - Bahnen Reaktor {A-1-0}

Bahn	Bahnlänge	eff. Bahnlänge	eff. Bahnlänge	Zeit im Reaktor	Zeit in eff. Länge	eff. Zeit	Bestrahlungsstärke	Bestrahlung
	in [mm]	in [mm]	in [%]	in [s]	in [s]	in [%]	in [mW/cm ²]	in [mJ/cm ²]
							(Summe)	
A10_c23	1611,197111	1382,221641	85,79	34,77297745	33,55575138	96,50	17277,94099	1590,594775
A10_c27	620,7698718	390,0290111	62,83	5,39469199	4,04611282	75,00	55708,63774	1029,646869
A10_c29	712,2268793	478,5085258	67,18	7,65212839	6,31056726	82,47	9737,717425	510,7716896
A10_c31	616,7884848	386,1950141	62,61	4,67514145	3,50588467	74,99	19800,4542	333,2921094
A10_c35	614,8589558	382,222305	62,16	4,69124817	3,43772716	73,28	1590,157744	29,06276018
A10_c38	616,1863929	380,7974534	61,80	5,44312859	3,92615766	72,13	336,305145	16,91758754
A10_c41	616,4639041	387,9672851	62,93	6,42076579	5,28075854	82,24	4874,246657	368,5359745

Tabelle A6 - 2: Beurteilungsparameter - Auswahl von Mikroorganismus - Bahnen Reaktor {A-1-7} und {A-1-7}b

Bahn	Bahnlänge	eff. Bahnlänge	eff. Bahnlänge	Zeit im Reaktor	Zeit in eff. Länge	eff. Zeit	Bestrahlungsstärke (Summe)	Bestrahlung
	in [mm]	in [mm]	in [%]	in [s]	in [s]	in [%]	in [mW/cm ²]	in [mJ/cm ²]
A17_c26	1029,499039	774,503172	75,23	3,37154645	3,13423405	92,96	270,811102	8,00679795
A17_c31	1016,404559	760,1425269	74,79	2,69874621	2,45968123	91,14	303,774504	7,0438447
A17_c36	1016,51501	760,1842546	74,78	2,64393395	2,40590382	91,00	290,270755	6,39920872
A17_c41	1079,74528	837,9601494	77,61	8,38230086	8,14304632	97,15	336,374077	24,33526847
A17_c42	1048,437946	778,5409594	74,26	3,62276939	3,37621312	93,19	205,275832	5,8892812
A17_c43	1676,117673	1126,417031	67,20	5,92010374	4,8901024	82,60	727,23251	16,41158246
A17_c44	1023,163626	765,1445553	74,78	2,99818244	2,76664257	92,28	263,920211	6,47702942
A17_c45	1031,029771	758,7504835	73,59	2,9041723	2,64202657	90,97	213,157189	4,65795598
A17_c46	1511,20027	1016,746494	67,28	5,44213055	4,52911858	83,22	911,260456	43,36945718
A17_c47	1015,882964	759,262094	74,74	2,65307694	2,41563342	91,05	251,621122	5,481298
A17_c48	1085,326115	829,6045269	76,44	5,13852011	4,89487044	95,26	235,035221	9,88137335
A17_c49	1511,288505	1167,660607	77,26	6,03246	5,55121011	92,02	530,638875	13,61703588
A17_c50	1042,302315	792,0348444	75,99	3,53985582	3,30556346	93,38	262,177078	8,11139959

Bahn	Bahnlänge	eff. Bahnlänge	eff. Bahnlänge	Zeit im Reaktor	Zeit in eff. Länge	eff. Zeit	Bestrahlungsstärke (Summe)	Bestrahlung
	in [mm]	in [mm]	in [%]	in [s]	in [s]	in [%]	in [mW/cm ²]	in [mJ/cm ²]
A17_c1(big)	3781,2872	3518,100528	93,04	59,52654185	59,10948583	99,30	1499,191021	176,9822093
A17_c3(big)	3415,05222	1163,981286	34,08	30,56672814	15,02196626	49,14	323,050433	29,488873

Tabelle A6 - 3: Statistik zur Mikroorganismus - Bahnen c23 im Reaktor {A-1-0} (beispielgebend)

Col	Rows	Mean	sd	se	Min	Max	Range	Sum	N
								MOR - Bahn	
								Länge in [mm]	
L	[1:464]	3,51789762	2,77786586	0,12980115	0,02236068	14,3107512	14,28839052	1611,197111	458
								Sum	
								MOR - Bahn (L _{eff} - Bereich)	
								Länge in [mm]	
L	[1:355]	3,89358209	2,78985469	0,14807011	0	13,14760054	13,14760054	1382,221641	355
								Time in [s] L _{ges} / L _{eff}	
T	[1:459]	0,07592353	0,06684172	0,00312331	0,000226156	0,40067209	0,40044594	34,77297745	458
T	[1:355]	0,09452324	0,06439002	0,00341747	0	0,40067209	0,40067209	33,55575138	355
								Bestrahlungsstärke [mW/cm ²]	
								Bestrahlung [mJ/cm ²]	
EstCurve23	[1:355]	48,6702563	145,0967119	7,70093388	0,064647	1304,656597	1304,59195	17277,94099	355
HC23	[1:355]	4,48054866	15,20881942	0,80720032	0	152,0779524	152,0779524	1590,594775	355

Reaktor_{A10}_10Wad_curve23

Tabelle A6 - 4: Bestrahlung H von Mikroorganismus - Bahnen im Reaktor {A-1-0} unter den angegebenen Strömungsverhältnissen (beispielgebend)

Strömung	Verdrängung	Laminar	Laminar	Turbulent	Turbulent	Turbulent	N
	Q=0,25 [m³/h]	Q=0,45 [m³/h]	Q=0,50 [m³/h]	Q=0,67824 [m³/h]	Q=0,75 [m³/h]	Q=1,00 [m³/h]	
				im Einlaß			
r _q	Sum	Sum	Sum	Sum	Sum	Sum	N
Abstand	Bestrahlung	Bestrahlung	Bestrahlung	Bestrahlung	Bestrahlung	Bestrahlung	Anzahl
in [mm]	H in [mJ/cm²]	H in [mJ/cm²]	H in [mJ/cm²]	H in [mJ/cm²]	H in [mJ/cm²]	H in [mJ/cm²]	der Werte
22	21660,6641	16713,47538	15042,12786	5024,018606	4543,320506	3407,49038	38
24	3099,291262	1345,178499	1210,66065	651,0848326	588,7890358	441,59178	38
26	987,1255968	326,4304222	293,78738	195,7003966	176,9757827	132,73184	38
28	458,071881	132,543947	119,28955	87,15745383	78,81822864	59,11367	38
30	267,0396252	74,17767367	66,75991	49,21554782	44,5066042	33,37995	38
32	180,1862178	52,13721581	46,92349	34,2840777	31,00377715	23,25283	38
34	133,5596684	44,16658707	39,7499	26,47857594	23,94510579	17,95883	38
36	105,1726576	45,64785485	41,08307	22,09418746	19,98021561	14,98516	38
38	86,15640626	66,47870853	59,83084	19,98329258	18,07129114	13,55347	38
40	72,47064527	1011,594713	910,43524	49,7871554	45,02352037	33,76764	38

Tabelle A6 - 5: Statistik zur Mikroorganismus - Bahnen c45 im Reaktor {A-1-7} (beispielgebend)

Col	Rows	Mean	sd	se	Min	Max	Range	Sum	N
								MOR - Bahn	
								Länge in [mm]	
L	[1:190]	5,45518397	6,40269471	0,46572751	0,26870058	20,03044932	19,76174874	1031,029771	189
								Sum	
								MOR - Bahn (Leff - Bereich)	
								Länge in [mm]	
L	[1:132]	5,74810972	6,97668619	0,60724259	0,26870058	20,03044932	19,76174874	758,7504835	132
								Zeit [s] in Leff	
T	[1:133]	0,01986486	0,03006671	0,00260711	0,000270528	0,09127774	0,09100722	2,64202657	133
								Bestrahlungsstärke [mW/cm ²]	
								Bestrahlung [mJ/cm ²]	
EstCurve45a	[1:132]	1,61482719	0,21205822	0,0184573	0,805949	1,831424	1,025475	213,157189	132
HC45ad	[1:132]	0,03528755	0,05441467	0,00473619	0,000406854	0,16666859	0,16626174	4,65795598	132
Reaktor_{A17}_14Wad_curve45ad									

Tabelle A6 - 6: Bestrahlung H von Mikroorganismus - Bahnen im Reaktor {A-1-7} unter den angegebenen Strömungsverhältnissen (beispielgebend)

Strömung	Verdrängung	Laminar	Turbulent	Turbulent	
	Q=0,25 [m³/h]	Q=0,5 [m³/h]	Q=0,75 [m³/h]	Q=2,522 [m³/h]	
r _q	Sum	Sum	Sum	Sum	N
Abstand	Bestrahlung	Bestrahlung	Bestrahlung	Bestrahlung	Anzahl
in [mm]	H in [mJ/cm²]	H in [mJ/cm²]	H in [mJ/cm²]	H in [mJ/cm²]	der Werte
12	1046,20346	519,88823	207,58089	60,9931435	84
14	625,97423	233,29829	117,84557	34,62636624	84
16	457,78393	142,33072	82,94185	24,37066329	84
18	359,59046	99,55626	63,21371	18,57397733	84
20	292,35138	75,54441	50,12923	14,72938665	84
22	242,71327	60,82544	40,7447	11,97194585	84
24	204,49887	51,47053	34,50211	10,13769622	84
26	174,26766	45,63978	30,05629	8,83138869	84
28	147,12052	42,50689	26,53161	7,79573876	83
30	129,89359	41,95608	23,73899	6,975186	84
32	113,3168	44,81843	21,5783	6,34031414	84
34	99,42069	54,5319	20,06113	5,89452933	84
36	87,66654	89,42083	19,53066	5,73866019	84
38	77,646	153,03006	71,19261	20,91840587	84

Tabelle A6 - 7: Statistik zur Mikroorganismus - Bahnen c3 im Reaktor {A-1-7}b (beispielgebend)

Col	Rows	Mean	sd	se	Min	Max	Range	Sum	N
								MOR - Bahn	
								Länge in [mm]	
L	[1:641]	5,33601909	5,62666859	0,2224136	0,1118034	50,71594325	50,60413985	3415,05222	640
								Sum	
								MOR - Bahn (L_{eff} - Bereich)	
								Länge in [mm]	
L	[1:121]	9,61968005	11,28426494	1,02584227	0,66128662	50,71594325	50,05465663	1163,981286	121
								Time in [s] $L_{\text{ges}} / L_{\text{eff}}$	
T1	[1:641]	0,04776051	0,07723837	0,00305311	0,000463147	0,87372986	0,87326672	30,56672814	640
T2	[1:121]	0,12414848	0,15143704	0,013767	0,00266871	0,87372986	0,87106115	15,02196626	121
								Bestrahlungsstärke [mW/cm ²]	
								Bestrahlung [mJ/cm ²]	
EstCurve3	[1:121]	2,66983829	9,46945678	0,86085971	0,239155	93,257396	93,018241	323,050433	121
HC3	[1:121]	0,24370969	0,65775669	0,05979606	0,00332131	5,59095585	5,58763454	29,488873	121

Reaktor_{A17}b_14Wad_curve3

Tabelle A6 - 8: Bestrahlung H von Mikroorganismus - Bahnen im Reaktor {A-1-7}b unter den angegebenen Strömungsverhältnissen (beispielgebend)

Strömung	Verdrängung	Laminar	Turbulent	Turbulent	
	0,250 [m³/h]	1,000 [m³/h]	1,250 [m³/h]	2,553 [m³/h]	
A	Sum	Sum	Sum	Sum	N
Radius	Bestrahlung	Bestrahlung	Bestrahlung	Bestrahlung	Anzahl
r_w in [mm]	H in [mJ/cm²]	H in [mJ/cm²]	H in [mJ/cm²]	H in [mJ/cm²]	
12	4312,031864	2195,435277	576,2396171	282,1384729	84
14	2580,015226	938,7466225	327,1365088	160,1725954	84
16	1886,802109	542,4845095	230,244596	112,7323717	84
18	1482,087921	356,8517574	175,4797502	85,91840489	84
20	1204,955378	252,4085658	139,1575452	68,13432493	84
22	1000,366937	187,3392306	113,1063116	55,37911847	84
24	842,8624784	144,0457992	93,55514327	45,80647438	84
26	718,2615532	113,8602288	78,43236539	38,40205904	84
28	606,3718993	90,35977339	65,25035566	31,94788272	83
30	535,369369	75,84803507	56,84886698	27,83434537	84
32	467,0464894	63,52907264	48,99424158	23,98856325	84
34	409,772278	53,98567979	42,50685368	20,81220803	84
36	361,326376	46,47570416	37,09384991	18,16189283	84
38	320,0257212	40,48858634	32,5371325	15,9308326	84
40	284,57259	35,6646831	28,67127157	14,03802956	84
42	253,9467901	31,74504011	25,42127041	12,44676381	84
44	227,3586005	28,54300603	22,95763712	11,24051955	84
46	204,148761	25,9176684	20,80494881	10,18652018	84
48	183,80058	23,76648675	18,91678121	9,26203545	84
50	165,8881366	22,01325252	17,25494202	8,44836566	84
52	150,0608162	20,602846	15,78815913	7,73019934	84
54	136,0278356	19,49769708	14,49073266	7,09495332	84
56	123,5464118	18,67624519	13,34153911	6,53228511	84
58	112,4125491	18,13351842	12,32331012	6,03373978	84
60	102,4538745	17,88464259	11,42216611	5,5925216	84
62	93,5239542	17,97336886	10,6274118	5,20339395	84
64	85,49776398	18,49082241	9,93169176	4,86275547	84
66	78,26808833	19,61823918	9,33178681	4,56902997	84
68	71,7425715	21,73515503	8,83082562	4,32374933	84
70	65,84134967	25,74533942	8,44445228	4,13457319	84
72	60,49510563	34,3820445	8,22145898	4,0253912	84
74	55,64344898	61,34703324	8,3492407	4,08795569	84
76	51,23360837	440,2946866	10,34667338	5,06593879	84

Anlage 7 # DISKUSSION DER RESULTATE

- Beispielgebend UV-Reaktoren {A-1-0}, {A-1-7} und {A-1-7}b -

Ziel:	Tabellarische Darstellung beispielgebender Werte aus den numerischen Simulationen mit den elektronischen Modellen der genannten UV-Reaktoren für Vergleichszwecke in der Diskussion.
Prinzip:	Anwendung der Gleichungen (3.35), (3.20), und (3.22), der PSS-Methode und der <i>GFM</i> mit der Hybrid - Variante und mit der <i>spread-sheet</i> - Variante.
Weiterführende Literatur:	KAPITEL 5 der Arbeit und besonders die Arbeiten ([19] bis[23]), ([78], [79]), [69], [77] und [78].

In den für die Berechnung der Bestrahlung in UV-Reaktoren benutzten Modellen wird die Strahlungsquelle durch einen unendlich langen zylindersymmetrischen Strahler angenähert. Dieser wird in Anlehnung an die Punktstrahlungsquelle Linienstrahlungsquelle genannt. Von ihr wird ein zeitlich konstanter zylindersymmetrischer Strahlungsfluss erzeugt, der in das effektive Volumen des betreffenden Reaktors eindringt und dort vom Transportfluid und von den Mikroorganismen absorbiert wird.

Bei den Ausführungen von Rechnungen an den UV-Reaktoren {A-1-0}, {A-1-7} und {A-1-7}b und auch bei Berechnungen an den Reaktoren {A-1-3} nach SCHENK und KOSCHITZKY und ({ABU}¹) erhält man Werte, die durch die Ansätze selbst, die Strahler und Reaktorgeometrie und die fluidmechanischen Verhältnisse bestimmt werden, vgl. Anlage 5, Tabellen A5-2, A5-3 und Anlage 6.

In der Arbeit werden in der Diskussion die Zahlenwerte der betreffenden Mikroorganismus-Bahn beispielgebend herangezogen. Dabei werden die Werte für die Bestrahlung H , die mit den aufgeführten Modellen berechnet wurden, gegenüber gestellt. Für den Fall der Anwendung der Hybrid-Variante des *GFM* ist das nur möglich, wenn ein Mittelwert des Radius aus den Datensätzen berechnet wird. Dieser Radius-Mittelwert ist schließlich die Eingangsgröße, welche den Vergleich der Werte unter gewissen Einschränkungen erlaubt. Der korrespondierende Wert wurde den in dieser Anlage zusammengestellten und für die Darstellung in der Arbeit den Tabellen A7-1 bis A7-3 entnommen.

¹ Doppelte Klammer, da der Reaktor nicht in die Klassifikation gehört, eine Bezeichnung jedoch notwendig war!

Tabelle A7 - 1: Vergleich der Ansätze nach Gleichung (3.35), (3.20) und (3.22), PSS-Methode und *spread-sheet* -Variante des GFM; auf den UV-Reaktor {A-1-0}

Ansatz	Gleichung (3.35)	Gleichung (3.20)	Gleichung (3.22)	PSS-Methode	GFM_Roptik
	Q=0,67824 [m³/h] 600 [mm/s]				
Radius in [mm]					
22	56,13994773	87,16890209	29,40663929	110,8805606	5024,01861
24	44,60362961	69,25637767	24,32925252	84,42656657	651,0848332
26	37,18289868	57,73415518	21,01642099	67,7777393	195,7003967
28	31,71036286	49,23690931	18,49771167	55,86827659	87,15745368
30	27,43372264	42,59653917	16,46023358	46,85033112	49,21554782
32	25,40922098	39,45308083	15,63644368	42,15905913	34,28407775
34	23,84524809	37,02468884	15,01367472	38,51338935	26,47857594
36	22,83627154	35,45804367	14,68046028	35,96281218	22,09418743
38	22,85806327	35,49187984	14,97597249	35,14779726	19,98329258
40	61,55024589	95,56951111	41,03349726	92,52339882	49,7871554 (1/1000) mm vor Wand

Tabelle A7 - 2: Vergleich der Ansätze nach Gleichung (3.35), (3.20) und (3.22), PSS-Methode und *spread-sheet* -Variante des GFM; auf den UV-Reaktor {A-1-7}

Ansatz	Gleichung (3.35)	Gleichung (3.20)	Gleichung (3.22)	PSS-Methode	GFM_Roptik
	Q=2,552511 [m ³ /h] 1400 [mm/s]				
Radius in [mm]					
12	52,1917243	61,55456049	32,11798418	80,98897451	60,9931435
14	40,61921184	47,90601893	26,44971934	60,59799331	34,62636624
16	32,73308478	38,60517494	23,28884835	47,15331562	24,37066329
18	27,01564883	31,86207033	19,06986976	37,70670152	18,57397733
20	22,69507957	26,76642067	16,50551241	30,77428761	14,72938665
22	19,32955176	22,79714034	14,41525894	25,52027707	11,97194585
24	17,04124825	20,09833092	12,98380819	21,94639569	10,13769622
26	15,38842481	18,14900233	11,94325508	19,3607928	8,83138869
28	14,03499082	16,55277159	11,06985191	17,27362998	7,79573876
30	12,94148877	15,2631028	10,35319102	15,59907289	6,975186
32	12,09748104	14,26768589	9,80049097	14,29537797	6,34031414
34	11,54550538	13,6166896	9,45896827	13,38729085	5,89452933
36	11,52085451	13,58761653	9,53450029	13,11887539	5,73866019
38	42,98604567	50,69744647	35,90043375	48,10494607	20,91840587

(1/1000) mm vor Wand

Tabelle A7 - 3: Vergleich der Ansätze nach Gleichung (3.35), (3.20) und (3.22), PSS-Methode und *spread-sheet* -Variante des GFM; {A-1-7}b

Ansatz	Gleichung (3.35)	Gleichung (3.20)	Gleichung (3.22)	PSS-Methode	GFM_Roptik
	Q=2,552511 [m ³ /h] 1400 [mm/s]				
Radius in [mm]					
12	241,4253889	284,7354424	148,5694701	378,1281208	282,1384729
14	187,8939458	221,6008267	122,3495461	282,8612622	160,1725954
16	151,4147661	178,5775332	103,0909046	220,0603229	112,7323717
18	124,9673893	147,385679	88,21227477	175,9437094	85,91840489
20	104,9815557	123,8145244	76,35022234	143,5750105	68,13432493
22	89,4134964	105,4536624	66,68125155	119,0475227	55,37911847
24	76,99969351	90,81290867	58,66643315	99,98980652	45,80647438
26	66,91441387	78,91839926	51,93357494	84,88105472	38,40205904
28	58,59454166	69,10599923	46,21541314	72,70311455	31,94788272
30	51,64276164	60,90711771	41,31420931	62,75017267	27,83434537
32	45,77079028	53,9817551	37,0801339	54,51928554	23,98856325
34	40,76448629	48,07735462	33,39741046	47,64266085	20,81220803
36	36,46156387	43,00251752	30,17508734	41,8463321	18,16189283
38	32,73688741	38,60965974	27,34069718	36,92223462	15,9308326
40	29,49249604	34,78324688	24,83578614	32,71019628	14,03802956
42	26,70631138	31,49723987	22,65990056	29,1458156	12,44676381
44	24,60723643	29,02160531	21,02365831	26,43975333	11,24051955
46	22,73279486	26,81090183	19,54595446	24,0605786	10,18652018
48	21,054306	24,83130361	18,20912951	21,96172046	9,26203545
50	19,54794094	23,05470703	16,99820951	20,10431005	8,44836566
52	18,19385533	21,45770777	15,90051222	18,45679382	7,73019934
54	16,97554512	20,02084111	14,90535669	16,99305215	7,09495332
56	15,87938746	18,7280403	14,00386926	15,69119496	6,53228511
58	14,89435176	17,56629597	13,18889163	14,53330266	6,03373978
60	14,01189569	16,52553335	12,45501839	13,50531495	5,5925216
62	13,22610795	15,5987807	11,79883011	12,59621221	5,20339395
64	12,53425854	14,78281827	11,21947617	11,79852958	4,86275547
66	11,93815838	14,07978184	10,71997895	11,10988588	4,56902997
68	11,44742191	13,50101062	10,31026079	10,53505742	4,32374933
70	11,088122	13,07725479	10,01507794	10,09364262	4,13457319
72	10,93126635	12,89226031	9,90001481	9,84526685	4,0253912
74	11,23741917	13,25333485	10,20330084	10,0155385	4,08795569
76	14,09251827	16,62061907	12,82672322	12,43244362	5,06593879

Tabelle A7 - 4: Statistik der Anwendung der PSS-Methode; UV-Reaktor {A-1-0}

Col	A	Rows	Mean	sd	se	Min	Max	Range	Sum	N
H1	22	[1:38]	2,99677191	0,33459068	0,05500637	1,6442696	3,20701006	1,56274046	110,8805606	37
H2	24	[1:38]	2,2817991	0,260365	0,04280374	1,24702646	2,4460294	1,19900294	84,42656657	37
H3	26	[1:38]	1,83183079	0,21296037	0,03501047	0,99924371	1,96688874	0,96764503	67,7777393	37
H4	28	[1:38]	1,50995342	0,17850709	0,02934639	0,82314016	1,62393836	0,80079821	55,86827659	37
H5	30	[1:38]	1,26622517	0,15201865	0,02499171	0,69033997	1,36407153	0,67373155	46,85033112	37
H6	32	[1:38]	1,13943403	0,13877291	0,02281413	0,62158749	1,22955082	0,60796334	42,15905913	37
H7	34	[1:38]	1,04090241	0,12849202	0,02112396	0,56835652	1,1251326	0,55677608	38,51338935	37
H8	36	[1:38]	0,9719679	0,12151976	0,01997773	0,53132654	1,05241201	0,52108547	35,96281218	37
H9	38	[1:38]	0,94994047	0,12020298	0,01976125	0,51997333	1,03031426	0,51034093	35,14779726	37
H10	40	[1:38]	2,5006324	0,32005868	0,05261732	1,3707347	2,7168548	1,3461201	92,52339882	37

Tabelle A7 - 5: Statistik der Anwendung der PSS-Methode; UV-Reaktor {A-1-7}

Col	A	Rows	Mean	sd	se	Min	Max	Range	Sum	N
H1	12	[1:84]	0,97577078	0,06343789	0,00696321	0,49734023	0,99454138	0,49720115	80,98897451	83
H2	14	[1:84]	0,7300963	0,04872961	0,00534877	0,37235566	0,74466271	0,37230705	60,59799331	83
H3	16	[1:84]	0,56811224	0,03892643	0,00427273	0,28999466	0,57996592	0,28997126	47,15331562	83
H4	18	[1:84]	0,45429761	0,03193338	0,00350514	0,23212297	0,46423621	0,23211324	37,70670152	83
H5	20	[1:84]	0,37077455	0,02670986	0,00293179	0,18964254	0,37927875	0,18963621	30,77428761	83
H6	22	[1:84]	0,30747322	0,02267545	0,00248895	0,15742847	0,31485385	0,15742538	25,52027707	83
H7	24	[1:84]	0,26441441	0,01994037	0,00218874	0,13552525	0,2710474	0,13552214	21,94639569	83
H8	26	[1:84]	0,23326256	0,01796897	0,00197235	0,11968273	0,23936228	0,11967955	19,3607928	83
H9	28	[1:84]	0,20811602	0,01635902	0,00179564	0,10689231	0,21378136	0,10688905	17,27362998	83
H10	30	[1:84]	0,18794064	0,01505972	0,00165302	0,09662693	0,19325386	0,09662693	15,59907289	83
H11	32	[1:84]	0,17223347	0,01405595	0,00154284	0,08864278	0,17728205	0,08863927	14,29537797	83
H12	34	[1:84]	0,16129266	0,01339448	0,00147024	0,08309368	0,16618736	0,08309368	13,38729085	83
H13	36	[1:84]	0,15805874	0,01334532	0,00146484	0,08150994	0,16301577	0,08150583	13,11887539	83
H14	38	[1:84]	0,57957766	0,04971801	0,00545726	0,29916573	0,59833146	0,29916573	48,10494607	83

Tabelle A7 - 6: Statistik der Anwendung der PSS-Methode; UV-Reaktor {A-1-7}b

Col	A	Rows	Mean	sd	se	Min	Max	Range	Sum	N
H1	12	[1:85]	3,35879134	0,20505935	0,02237381	1,70041637	3,40083407	1,70041769	282,1384729	84
H2	14	[1:85]	1,90681661	0,1307168	0,01426237	0,96908497	1,93816968	0,96908471	160,1725954	84
H3	16	[1:85]	1,34205204	0,09943939	0,01084973	0,6839385	1,36787673	0,68393822	112,7323717	84
H4	18	[1:85]	1,02283815	0,07999264	0,00872791	0,5223956	1,04479093	0,52239533	85,91840489	84
H5	20	[1:85]	0,81112292	0,06611946	0,00721422	0,41504453	0,83008876	0,41504423	68,13432493	84
H6	22	[1:85]	0,65927522	0,05560661	0,00606718	0,3379195	0,67583872	0,33791922	55,37911847	84
H7	24	[1:85]	0,54531517	0,04736331	0,00516776	0,27995003	0,55989977	0,27994975	45,80647438	84
H8	26	[1:85]	0,45716737	0,04074869	0,00444605	0,23504761	0,47009493	0,23504733	38,40205904	84
H9	28	[1:85]	0,38491425	0,04105878	0,00450679	0,19948969	0,39897909	0,1994894	31,94788272	83
H10	30	[1:85]	0,33136125	0,03087754	0,00336902	0,1708403	0,34168033	0,17084003	27,83434537	84
H11	32	[1:85]	0,28557813	0,027134	0,00296056	0,14742893	0,29485759	0,14742866	23,98856325	84
H12	34	[1:85]	0,24776438	0,02396868	0,0026152	0,12806974	0,25613922	0,12806948	20,81220803	84
H13	36	[1:85]	0,21621301	0,02126971	0,00232072	0,11189799	0,22379571	0,11189772	18,16189283	84
H14	38	[1:85]	0,18965277	0,01895142	0,00206777	0,0982691	0,19653794	0,09826883	15,9308326	84
H15	40	[1:85]	0,1671194	0,0169472	0,00184909	0,08669378	0,17338731	0,08669353	14,03802956	84
H16	42	[1:85]	0,14817576	0,01523514	0,00166229	0,07695506	0,15390984	0,07695478	12,44676381	84
H17	44	[1:85]	0,13381571	0,01394087	0,00152107	0,06957247	0,13914467	0,06957221	11,24051955	84
H18	46	[1:85]	0,1212681	0,01279158	0,00139568	0,06311674	0,12623324	0,0631165	10,18652018	84
H19	48	[1:85]	0,11026233	0,01176879	0,00128408	0,05744903	0,11489782	0,05744879	9,26203545	84
H20	50	[1:85]	0,10057578	0,01085629	0,00118452	0,05245623	0,10491221	0,05245598	8,44836566	84
H21	52	[1:85]	0,09202618	0,01004059	0,00109552	0,04804568	0,09609108	0,0480454	7,73019934	84
H22	54	[1:85]	0,08446373	0,00931052	0,00101586	0,04414118	0,0882821	0,04414092	7,09495332	84
H23	56	[1:85]	0,0777653	0,00865678	0,000944532	0,04068015	0,08136002	0,04067986	6,53228511	84
H24	58	[1:85]	0,07183024	0,00807181	0,000880707	0,0376114	0,07522252	0,03761112	6,03373978	84
H25	60	[1:85]	0,06657764	0,0075496	0,000823729	0,03489386	0,06978745	0,03489359	5,5925216	84
H26	62	[1:85]	0,06194517	0,00708573	0,000773117	0,032496	0,06499172	0,03249572	5,20339395	84
H27	64	[1:85]	0,05788995	0,00667763	0,00072859	0,03039632	0,06079235	0,03039603	4,86275547	84
H28	66	[1:85]	0,05439321	0,00632522	0,000690138	0,02858591	0,05717152	0,02858562	4,56902997	84
H29	68	[1:85]	0,05147321	0,00603256	0,000658206	0,02707522	0,05415016	0,02707494	4,32374933	84
H30	70	[1:85]	0,04922111	0,00581228	0,000634171	0,02591317	0,05182601	0,02591284	4,13457319	84
H31	72	[1:85]	0,04792132	0,00570021	0,000621944	0,02525054	0,05050076	0,02525023	4,0253912	84
H32	74	[1:85]	0,04866614	0,00582981	0,000636084	0,02566472	0,05132908	0,02566436	4,08795569	84
H33	76	[1:85]	0,0603088	0,00727408	0,000793667	0,03183121	0,06366197	0,03183075	5,06593879	84

Tabelle A7 - 7: Statistik der Anwendung der *spread-sheet* Variante der GFM; {A-1-0}

Col	A	Rows	Mean	sd	se	Min	Max	Range	Sum	N
H1	22	[1:39]	132,2110161	10,8643036	1,76242277	67,00437045	134,0086421	67,00427163	5024,01861	38
H2	24	[1:39]	17,1338114	1,41053303	0,22881867	8,70227883	17,40443622	8,70215739	651,0848332	38
H3	26	[1:39]	5,15001044	0,43544408	0,07063836	2,62928916	5,25844344	2,62915428	195,7003967	38
H4	28	[1:39]	2,2936172	0,20770626	0,0336944	1,17944965	2,35875554	1,17930589	87,15745368	38
H5	30	[1:39]	1,295146	0,12804534	0,0207717	0,67119674	1,34224364	0,6710469	49,21554782	38
H6	32	[1:39]	0,90221257	0,09674933	0,01569481	0,47101588	0,94186853	0,47085265	34,28407775	38
H7	34	[1:39]	0,69680463	0,07982916	0,01295	0,36617195	0,73216683	0,36599488	26,47857594	38
H8	36	[1:39]	0,58142598	0,07015604	0,01138081	0,30729396	0,61439443	0,30710047	22,09418743	38
H9	38	[1:39]	0,52587612	0,06609929	0,01072272	0,27932996	0,5584412	0,27911124	19,98329258	38
H10	40	[1:39]	1,3101883	0,170182	0,02760717	0,69902793	1,3973963	0,69836837	49,7871554	38

Tabelle A7 - 8: Statistik der Anwendung der *spread-sheet* Variante der GFM; {A-1-7}

Col	A	Rows	Mean	sd	se	Min	Max	Range	Sum	N
H1	12	[1:85]	0,72610885	0,04433006	0,00483681	0,36759871	0,73519771	0,367599	60,9931435	84
H2	14	[1:85]	0,41221865	0,02825857	0,00308326	0,20949833	0,4189966	0,20949827	34,62636624	84
H3	16	[1:85]	0,29012694	0,02149697	0,00234551	0,14785491	0,29570976	0,14785485	24,37066329	84
H4	18	[1:85]	0,22111878	0,01729294	0,00188681	0,11293231	0,22586456	0,11293225	18,57397733	84
H5	20	[1:85]	0,17534984	0,01429381	0,00155958	0,08972499	0,17944991	0,08972492	14,72938665	84
H6	22	[1:85]	0,14252316	0,01202113	0,00131161	0,07305197	0,14610389	0,07305191	11,97194585	84
H7	24	[1:85]	0,12068686	0,01048225	0,00114371	0,06195736	0,12391466	0,0619573	10,13769622	84
H8	26	[1:85]	0,10513558	0,00937105	0,00102247	0,05405431	0,10810855	0,05405425	8,83138869	84
H9	28	[1:85]	0,09280641	0,00846685	0,000923809	0,04778322	0,09556637	0,04778315	7,79573876	84
H10	30	[1:85]	0,08303793	0,0077378	0,000844263	0,04281196	0,08562385	0,04281189	6,975186	84
H11	32	[1:85]	0,07547993	0,00717167	0,000782493	0,03896631	0,07793254	0,03896624	6,34031414	84
H12	34	[1:85]	0,07017297	0,00678852	0,000740688	0,0362725	0,07254493	0,03627243	5,89452933	84
H13	36	[1:85]	0,06831738	0,00672064	0,000733282	0,0353567	0,07071331	0,03535661	5,73866019	84
H14	38	[1:85]	0,24902864	0,02488467	0,00271514	0,12903487	0,25806939	0,12903452	20,91840587	84

Tabelle A7 - 9: Statistik der Anwendung der *spread-sheet* Variante der GFM; {A-1-7}b

Col	A	Rows	Mean	sd	se	Min	Max	Range	Sum	N
H1	12	[1:85]	3,35879134	0,20505935	0,02237381	1,70041637	3,40083407	1,70041769	282,1384729	84
H2	14	[1:85]	1,90681661	0,1307168	0,01426237	0,96908497	1,93816968	0,96908471	160,1725954	84
H3	16	[1:85]	1,34205204	0,09943939	0,01084973	0,6839385	1,36787673	0,68393822	112,7323717	84
H4	18	[1:85]	1,02283815	0,07999264	0,00872791	0,5223956	1,04479093	0,52239533	85,91840489	84
H5	20	[1:85]	0,81112292	0,06611946	0,00721422	0,41504453	0,83008876	0,41504423	68,13432493	84
H6	22	[1:85]	0,65927522	0,05560661	0,00606718	0,3379195	0,67583872	0,33791922	55,37911847	84
H7	24	[1:85]	0,54531517	0,04736331	0,00516776	0,27995003	0,55989977	0,27994975	45,80647438	84
H8	26	[1:85]	0,45716737	0,04074869	0,00444605	0,23504761	0,47009493	0,23504733	38,40205904	84
H9	28	[1:85]	0,38491425	0,04105878	0,00450679	0,19948969	0,39897909	0,1994894	31,94788272	83
H10	30	[1:85]	0,33136125	0,03087754	0,00336902	0,1708403	0,34168033	0,17084003	27,83434537	84
H11	32	[1:85]	0,28557813	0,027134	0,00296056	0,14742893	0,29485759	0,14742866	23,98856325	84
H12	34	[1:85]	0,24776438	0,02396868	0,0026152	0,12806974	0,25613922	0,12806948	20,81220803	84
H13	36	[1:85]	0,21621301	0,02126971	0,00232072	0,11189799	0,22379571	0,11189772	18,16189283	84
H14	38	[1:85]	0,18965277	0,01895142	0,00206777	0,0982691	0,19653794	0,09826883	15,9308326	84
H15	40	[1:85]	0,1671194	0,0169472	0,00184909	0,08669378	0,17338731	0,08669353	14,03802956	84
H16	42	[1:85]	0,14817576	0,01523514	0,00166229	0,07695506	0,15390984	0,07695478	12,44676381	84
H17	44	[1:85]	0,13381571	0,01394087	0,00152107	0,06957247	0,13914467	0,06957221	11,24051955	84
H18	46	[1:85]	0,1212681	0,01279158	0,00139568	0,06311674	0,12623324	0,0631165	10,18652018	84
H19	48	[1:85]	0,11026233	0,01176879	0,00128408	0,05744903	0,11489782	0,05744879	9,26203545	84
H20	50	[1:85]	0,10057578	0,01085629	0,00118452	0,05245623	0,10491221	0,05245598	8,44836566	84
H21	52	[1:85]	0,09202618	0,01004059	0,00109552	0,04804568	0,09609108	0,0480454	7,73019934	84
H22	54	[1:85]	0,08446373	0,00931052	0,00101586	0,04414118	0,0882821	0,04414092	7,09495332	84
H23	56	[1:85]	0,0777653	0,00865678	0,000944532	0,04068015	0,08136002	0,04067986	6,53228511	84
H24	58	[1:85]	0,07183024	0,00807181	0,000880707	0,0376114	0,07522252	0,03761112	6,03373978	84
H25	60	[1:85]	0,06657764	0,0075496	0,000823729	0,03489386	0,06978745	0,03489359	5,5925216	84
H26	62	[1:85]	0,06194517	0,00708573	0,000773117	0,032496	0,06499172	0,03249572	5,20339395	84
H27	64	[1:85]	0,05788995	0,00667763	0,00072859	0,03039632	0,06079235	0,03039603	4,86275547	84
H28	66	[1:85]	0,05439321	0,00632522	0,000690138	0,02858591	0,05717152	0,02858562	4,56902997	84
H29	68	[1:85]	0,05147321	0,00603256	0,000658206	0,02707522	0,05415016	0,02707494	4,32374933	84
H30	70	[1:85]	0,04922111	0,00581228	0,000634171	0,02591317	0,05182601	0,02591284	4,13457319	84
H31	72	[1:85]	0,04792132	0,00570021	0,000621944	0,02525054	0,05050076	0,02525023	4,0253912	84
H32	74	[1:85]	0,04866614	0,00582981	0,000636084	0,02566472	0,05132908	0,02566436	4,08795569	84
H33	76	[1:85]	0,0603088	0,00727408	0,000793667	0,03183121	0,06366197	0,03183075	5,06593879	84

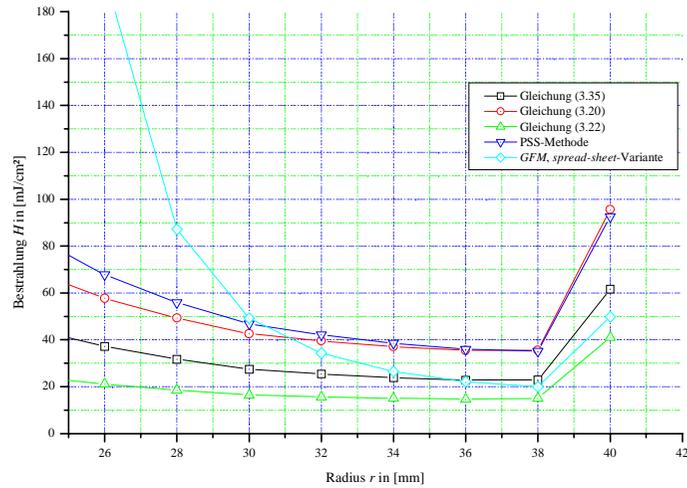


Bild A7-1: Vergleich der Modelle Anwendung auf Reaktor {A-1-0}

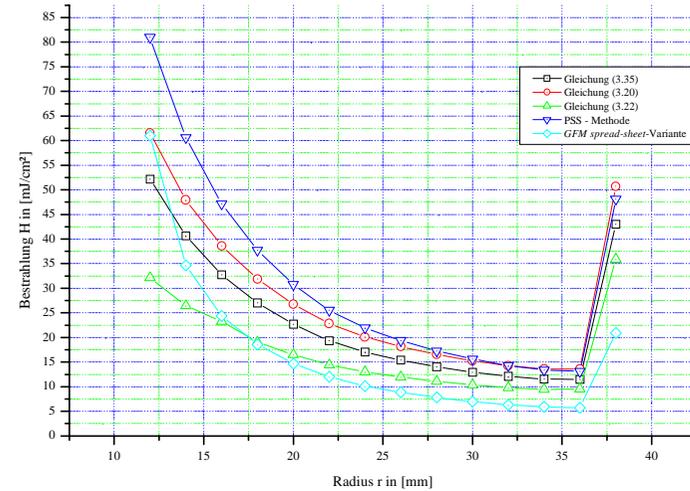


Bild A7-2: Vergleich der Modelle Anwendung auf Reaktor {A-1-7}

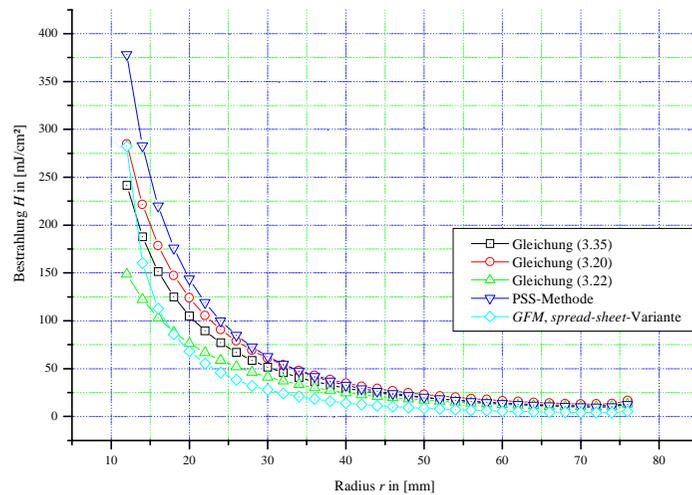


Bild A7-3: Vergleich der Modelle Anwendung auf Reaktor {A-1-7}b

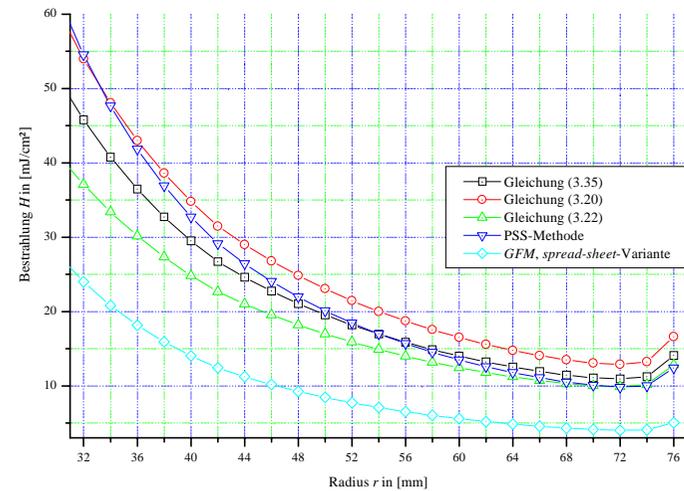
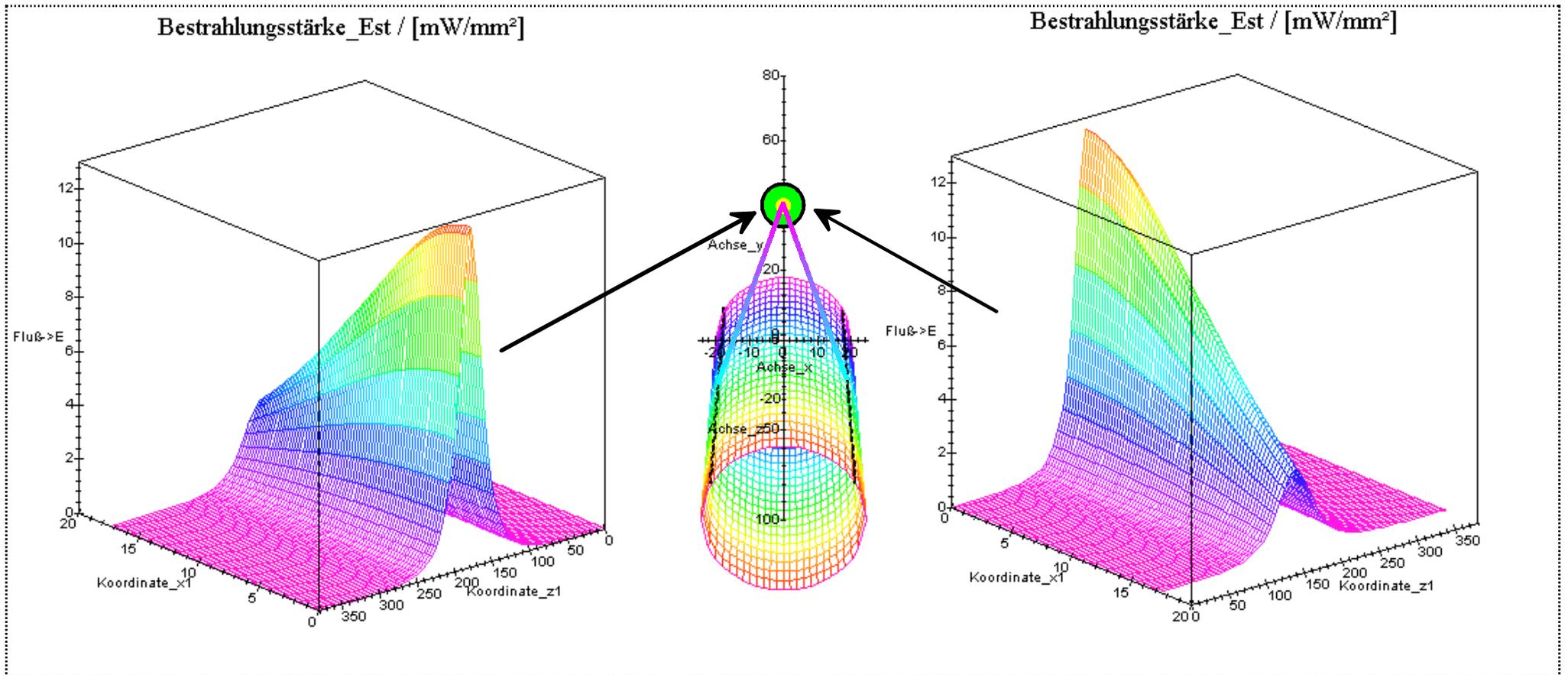


Bild A7-4: Vergleich der Modelle Anwendung auf Reaktor {A-1-7}b - Details



**Bild A7-5: Symbolische Darstellung der Wirkung der Bestrahlungsstärke E_{St} auf eine Elementarzelle im UV-Reaktor {A-1-0};
Position ($x_0=0, y_0=r_w=40, z_0=190$), Maße in [mm]**