

7. Beladung der permeablen Kollektoren

Die Versuche zur Ablösung der Beladung von den Kollektormatten (vgl. Kapitel 6) zeigten, daß die Größe der Anfangsbeladung bei einer Wasserspülung eine große Bedeutung für den ablösbaren Beladungsanteil besitzt. In einer Schüttung aus permeablen Kollektoren verteilt sich die Beladung innerhalb des PSK nicht notwendigerweise homogen und beeinflußt daher maßgeblich, welche Beladungsanteile auf den permeablen Kollektoren zurückbleiben.

Es ist bisher nicht möglich die Beladungsverteilung innerhalb eines permeablen Kollektors experimentell zu ermitteln oder mit dem von MULDER (1990) beschriebenen Verfahren zu berechnen. Daher wird hier ein dahingehend verbessertes Filtrationsmodell abgeleitet und darauf aufbauend die Konzentrations- und Beladungsverteilung innerhalb des PSK berechnet. Basierend auf der Beladungsverteilung sollen die Mechanismen für die Ablösung der Beladung von den inneren Oberflächen der PSK durch die Strömungsvorgänge erläutert werden.

Das Filtrationsmodell wird anhand experimenteller Ergebnisse überprüft, wobei es gleichzeitig die große Bedeutung der verfahrenstechnischen Parameter auf die Abscheidung und in der Folge auch auf die Ablösung demonstriert.

7.1 Beschreibung der Versuchsanlage

Zur Untersuchung der Regenerierbarkeit von Schüttungen aus permeablen Kollektoren ist eine Versuchsanlage (Bild 7.1) erstellt worden, in der das Filterbett in einem Filtrationsschritt mit Kreislaufführung des Filtrates beladen wird (Bild 7.2). Dabei wurde der Filtrationsschritt dazu ausgenutzt, auch die Abscheideleistung der eingesetzten Filtermaterialien zu testen.

Für die Filtration mit Kreislaufführung des Filtrates wird vor dem Filtrationsbeginn eine definierte Menge eines Trübstoffes in dem ca. 150 Liter fassenden Behälter mit einem Rührwerk eingemischt und danach die Filtration mit einer Filtergeschwindigkeit von 13,4 m/h gestartet. Eine Kreiselpumpe fördert die Trübstoffsuspension durch transparente PVC-Leitungen in den ebenfalls transparenten Filter aus Plexiglas. Der Durchmesser des Filters ist wegen der Reinigungsuntersuchungen der bis zu 10 mm im Durchmesser großen PSK zu 284 mm gewählt worden, damit Randeffekte hinreichend klein gehalten werden können. Die Bettlänge sollte in den Versuchen nur 10 cm betragen, so daß der Beladungsgradient im Filterbett hinreichend klein bleibt und keinen Einfluß auf die Ablösung der Trübstoffe hat.

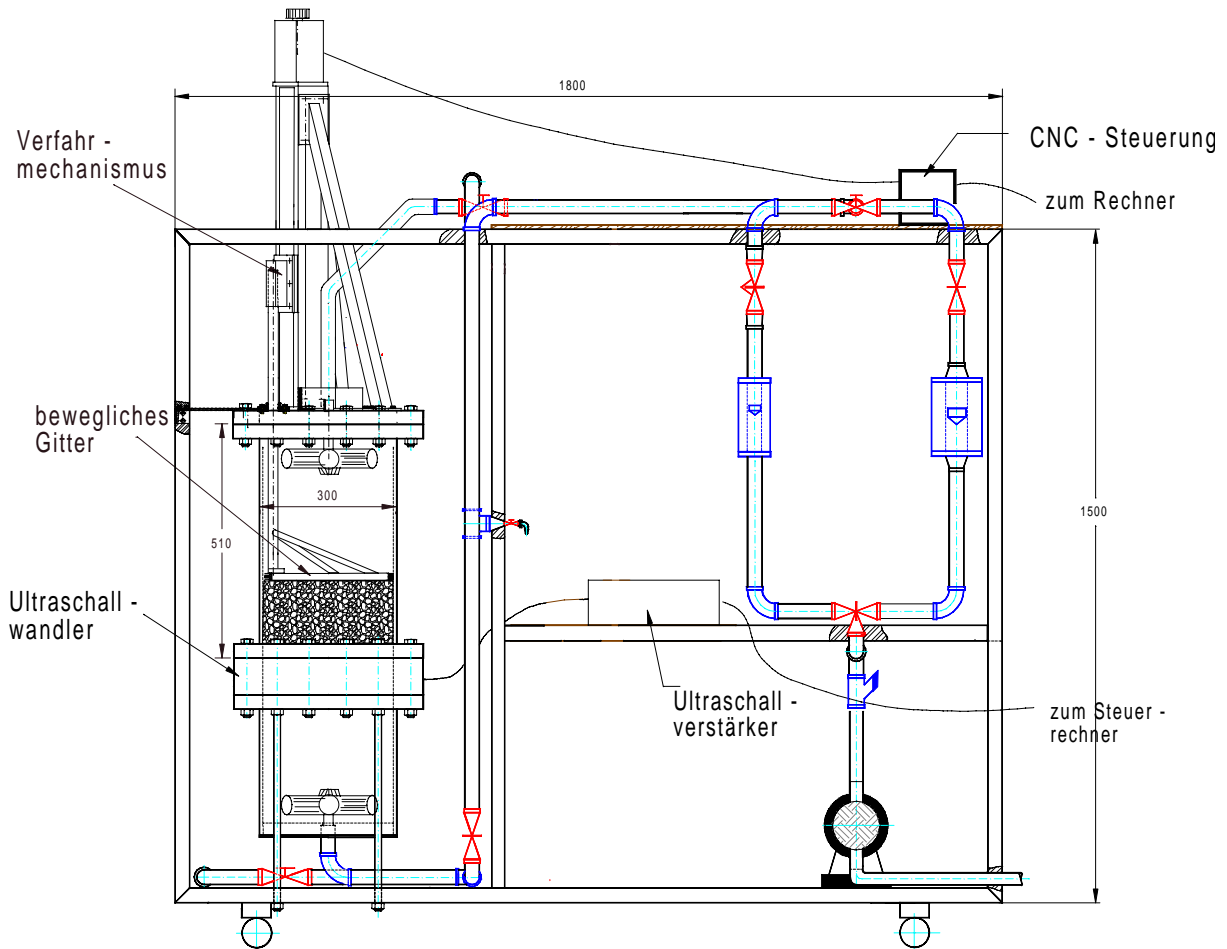


Bild 7.1: Versuchsanlage zur Untersuchung von PSK hinsichtlich Abscheidung und Regeneration

Das Filtrat wird nach der Abscheidung von Trübstoffen auf den PSK in den Trübstoffbehälter zurückgeführt und mit der dort befindlichen Suspension vermischt, so daß es durch die Abscheidung der Trübstoffe auf dem Filtermaterial zu einer kontinuierlichen Verminderung der Trübstoffkonzentration im Trübstoffbehälter kommt. Die Filtration zur Beladung der PSK wird solange im Kreislauf betrieben, bis eine weitgehende Abscheidung (mehr als 95 %) der Trübstoffe auf den PSK stattgefunden hat. Die Trübung im Filterablauf wird während des Prozesses kontinuierlich von einem Trübungsmeßgerät, das mit einer Meßdatenerfassung gekoppelt ist, aufgezeichnet. Gleichzeitig wird auch die Wassertemperatur sowie die elektrische Leitfähigkeit aufgenommen. Diese Betriebsweise hat die Vorteile, daß die Abscheidung nicht durch eine Veränderung der Rohwasserqualität beeinflusst werden kann und deutlich geringere Mengen an hochwertigem Trinkwasser verbraucht werden.

Das Filterbett aus PSK wird sowohl oberhalb als auch unterhalb von einem Spaltgitter aus Edelstahl in seiner Position fixiert. Während das untere Gitter mit einer Spaltbreite von 2 mm quasi als Düsenboden eine feste Position hat, kann das obere Gitter durch einen Schrittmotor verfahren werden. Neben der Fixierung des Bettes kann dieser Verfahrmechanismus auch zur Reinigung verwendet werden.

Während des Reinigungsprozesses wird das Trübungsmeßgerät und die Meßdatenerfassung dazu verwendet, die Trübung im Spülabwasser aufzuzeichnen. Die vom Trübungsmeßgerät kontinuierlich ermittelten Meßdaten werden von einer mit einem Rechner gekoppelten Meßdatenerfassung aufgenommen und später mit ausgewertet.

7.1.1 Kontinuierliches Meßverfahren zur Konzentrationsbestimmung

Zur Quantifizierung der Partikelkonzentration im Spülwasser und im Filtrat wird das ULTRATURB Trübungsmeßgerät der Firma Dr. Lange eingesetzt. Bei dem ULTRATURB handelt es sich um ein quasi kontinuierlich messendes Trübungsmeßgerät, das in seiner kontinuierlich vom Probenstrom durchflossenen Meßkammer das Streulicht der suspendierten Feststoffe unter einem Winkel von 90° zur Lichtquelle ermittelt. Für ein Zeitintervall, das softwaremäßig bis zu 1 sec auszuwählen³ ist, liefert das Gerät den zeitlichen Mittelwert der Trübung. Das Streulichtsignal steigt in der Regel mit zunehmender Konzentration der suspendierten Feststoffe in der Meßkammer. Dabei ist die Abhängigkeit zwischen Trübungssignal und Feststoffkonzentration in der Regel nicht linear bzw. lediglich in engen Konzentrationsbereichen durch eine lineare Beziehung anzupassen. Im weiteren ist die Größe des Streulichtsignals auch abhängig von der Partikelgröße sowie den Reflexions- und Absorptionseigenschaften der Partikeloberfläche.

Zur Quantifizierung der Feststoffkonzentration im Spülwasser bzw. im Filtrat wurden mit dem ULTRATURB Kalibrierkurven zwischen Feststoffkonzentration und Trübung aufgenommen. Die Kalibrierkurve für den Modelltrübstoff Kalziumkarbonat über den gesamten Meßbereich des ULTRATURB von 0 bis 1000 FNU ist im Anhang A7.1 dargestellt.

Während der Versuche zur Regeneration der beladenen PSK wurden die Meßwerte des Trübungsmeßgerätes von einer Meßdatenerfassung mit Rechner aufgenommen. Zur Auswertung der Trübungsdaten erlaubt die Kalibrierfunktion eine Umrechnung des Trübungswertes in eine Massenkonzentration, die dann im weiteren durch eine zeitliche Integration über die gesamte Spüldauer T_{sp} die mit dem Reinigungsverfahren abgelöste Masse des Trübstoffes ergibt.

$$m_{ab} = v_f \cdot A_F \int_0^{T_{sp}} c \cdot dt \quad (7.1)$$

Eine Überprüfung des optischen Meßverfahrens zeigt, daß die Feststoffmasse im Spülwasser durch die Trübungsmessung mit einer mittleren Genauigkeit von ca. ±1-2% ermittelt werden

³ Der Firma Dr. Lange wird für ihre Unterstützung bei der Realisierung von 1 sec Zeitintervallen gedankt.

kann. Zu diesem guten Ergebnis trägt sicherlich auch der Umstand bei, daß der eingesetzte Modelltrübstoff eine sehr enge Korngrößenverteilung besitzt. Die Ergebnisse der Regenerationsversuche auf Basis der Trübungsmessungen wurden im weiteren auch durch gravimetrische Analysen der abfiltrierbaren Stoffe des Spülwassers ergänzt und bestätigt. Hier zeigten sich zwischen dem optischen und dem gravimetrischen Verfahren größere Differenzen, die in der Regel jedoch deutlich unter 10% lagen.

7.1.2 Das komprimierte Filterbett

In den durchgeführten Versuchen zur Filtration und Regeneration von permeablen synthetischen Kollektoren wurden PSK aus verschiedenen PUR-Typen mit zwei verschiedenen Größen eingesetzt. Um die experimentellen Ergebnisse vergleichen zu können, wurde für die Filterbefüllung immer das gleiche (unkomprimierte) Kollektorvolumen verwendet. Über die ermittelte Rohdichte (DIN 53420) des PUR-Schaumstoffes konnte das entsprechende Kollektorvolumen durch Wägung exakt abgemessen werden.

Während der Filtration und in der Regel auch während der Versuche zur Wasserspülung wird die Schüttung aus permeablen Kollektoren durch ein oberes, verfahrbares Gitter in seiner Position fixiert. Da erwartet wurde, daß durch eine Komprimierung des Bettes die Abscheideleistung des Filterbettes und auch die mechanische Stabilität der elastischen Packung gesteigert werden kann, wurde das Filterbett um 20% auf eine Bettlänge von 10 cm komprimiert.

Nach einer Untersuchung von HOBBY (1995) wurden die von ihm eingesetzten permeablen Kollektoren anteilig genauso komprimiert wie das gesamte Bett, so daß die Bettporosität des unkomprimierten und komprimierten Bettes konstant bleibt. Während HOBBY (1995) einen sehr leicht deformierbaren PUR-Schaumstoff einsetzte, weisen die hier eingesetzten PSK eine weitaus höhere Stauchhärte und Formstabilität auf. Im weiteren besitzen die hier eingesetzten PSK auch nicht die Neigung, sich miteinander zu verhaken, so daß die PSK während der Komprimierung viel leichter aneinander vorbeigleiten können. Aufgrund dieser Argumentation kann man davon ausgehen, daß die Volumenabnahme bei der Komprimierung anteilig stärker zu Lasten des Porenvolumens des Bettes als der PSK geht und die sich einstellende Bettporosität daher zwischen der Bettporosität des unkomprimierten Bettes von 48,5% und dem Fall des als inkompressibel betrachteten PSK von 35,5% liegt. Für die hier eingesetzten PSK (mit Ausnahme der sehr weichen T2540) wird im folgenden im komprimierten Zustand eine Bettporosität von 40% angenommen, woraus sich aus dem Bettvolumen V_B , dem unkomprimierten Kollektorvolumen V_K und dem Komprimierfaktor α mit

$$\varepsilon = 1 - \frac{\alpha \cdot V_K}{V_B} = 0,4 \quad (7.2)$$

eine Komprimierung der PSK um 7% ergibt.

In den nachfolgenden Berechnungen wird das Filterbett idealisierend als Schüttung kugelförmiger Einzelkörper eines identischen Durchmessers aufgefaßt. Aus den zylindrischen PSK, deren Durchmesser ihrer Länge entspricht, berechnet sich der volumengleiche, komprimierte Kugelkollektor aus

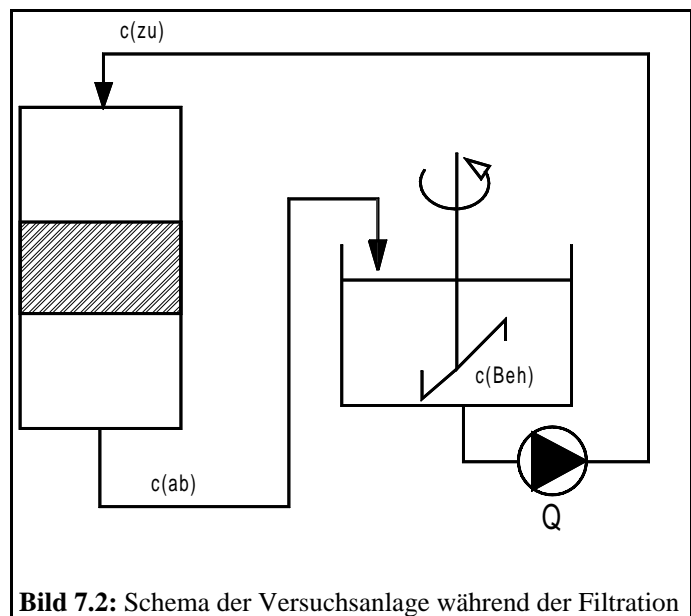
$$d_k = \sqrt{1,5 \cdot \alpha \cdot d_z} \quad (7.3)$$

Für die verwendeten, zylindrischen PSK mit einem Durchmesser von 10 mm bzw. 6 mm ergeben sich damit im komprimierten Zustand ein äquivalenter Kugeldurchmesser von 11,17 mm bzw. 6,70 mm.

7.2 Experimentelle Untersuchungen zur Abscheidung

Zur Berechnung des Filterparameters eines Filters mit Kreislaufführung des Filtrates, wie sie bei der beschriebenen Versuchsanlage vorlag, müssen einige idealisierende Annahmen insbesondere deshalb getroffen werden, da nur eine Meßstelle zur Bestimmung der Konzentration (und zwar im Ablauf) zur Verfügung stand.

Ausgehend von einer Massenbilanz für den Rührbehälter in Bild 7.2 erhält man:



$$-c_{ab} \cdot Q + \frac{\partial}{\partial t} (c_{Beh} \cdot V_{Beh}) + c_{zu} \cdot Q = 0 \quad (7.4)$$

Setzt man im weiteren eine ideale Durchmischung des Rührbehälters voraus, bei der die Konzentrationsänderung im Behälter durch den Zulauf des Filtrates vernachlässigbar ist (Q_t ist klein gegenüber V_{Beh}), kann die mittlere Konzentration im Behälter gleich der Ablaufkonzentration des Behälters gesetzt werden ($c_{zu} = c_{Beh}$).

Eingesetzt in die Massenbilanz für den Rührbehälter nach Gl. 7.4 erhält man folgende Differentialgleichung,

$$\frac{\partial c_{zu}}{c_{ab} - c_{zu}} = \frac{Q \cdot \partial t}{V_{Beh}} \quad (7.5)$$

die durch Einbeziehung des IWASAKI-Ansatzes

$$c_{ab} = c_{zu} \cdot \exp(-\lambda_0 \cdot L) \quad (7.6)$$

nur noch von der Zulaufkonzentration c_{zu} und der Zeit t abhängig ist. Dabei wird vorausgesetzt, daß λ_0 unabhängig von der Zeit und der Bettlänge ist. Diese Annahme rechtfertigt sich aufgrund einer Abschätzung für das Material I60 (vgl. Anhang A8), daß die im folgenden verwendete Beladung von $4,12\text{mg/cm}^3$ im Mittel nicht aus mehreren Partikelschichten besteht.

$$\frac{\partial c_{zu}}{c_{zu}} = -[1 - \exp(-\lambda_0 \cdot L)] \frac{Q}{V_{Beh}} \cdot \partial t \quad (7.7)$$

Durch Integration mit der Anfangsbedingung $c_{zu}(t=0)=c_{zu,0}$ erhält man folgende Lösung.

$$c_{zu} = c_{zu,0} \cdot \exp\left\{-[1 - \exp(-\lambda_0 \cdot L)] \frac{Q}{V_{Beh}} \cdot t\right\} \quad (7.8)$$

Die Gleichungen (7.6) und (7.8) bieten die Möglichkeit, den Filterparameter λ_0 aus dem zeitlichen Verlauf der Filterablaufkonzentration zu bestimmen.

7.3 Mathematische Modellierung der Abscheidung im PSK-Tiefenfilter

7.3.1 Konzentrations- und Beladungsverteilung im PSK

Zur Quantifizierung der Abscheidung innerhalb eines PSK wird eine Massenbilanz für die abzuschheidenden Partikel zwischen zwei Stromlinien mit geringem Abstand durchgeführt. Unter Ausnutzung der Rotationssymmetrie liefert die Massenbilanz entlang der Bahnkurve s des Stromfadens mit der Querschnittsfläche A , der aus den beiden betrachteten Stromlinien gebildet wird:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\sigma \cdot A) = -\frac{\partial}{\partial s}(u \cdot c \cdot A) \quad (7.9)$$

Da zwischen zwei Stromlinien, die eine Stromröhre bzw. einen Stromfaden bilden, der Fluidstrom konstant bleiben muß, folgt mit dem IWASAKI-Ansatz

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda_{0,M} \cdot u \cdot c \quad (7.10)$$

durch Integration folgende analytische Lösung für die Konzentrationsänderung entlang des Stromfadens:

$$\frac{c(s)}{c_0} = \exp\left(-\int_0^s \lambda_{0,M}(u) \cdot ds\right) \quad (7.11)$$

Im Grenzfall eines infinitesimalen Abstandes zwischen den betrachteten Stromlinien geht die mittlere Geschwindigkeit zwischen den Stromlinien in eine Strömungsgeschwindigkeit über, die durch eine noch zwischen den betrachteten Stromlinien liegende weitere Stromlinie definiert ist. Das bedeutet, daß Gl. 7.11 für jede Stromlinie im PSK gilt.

Der Integralterm in Gl. 7.11 muß in der Regel numerisch bestimmt werden, wobei der Filterparameter $\lambda_{0,M}$ als Funktion der Durchströmungsgeschwindigkeit u für die verschiedenen Partikel-Kollektor-Systeme entweder durch Experimente oder durch theoretische Partikelbahn-Rechnungen bestimmt werden könnte. Im permeablen Kollektor verändert sich die lokale Geschwindigkeit u entlang der Stromröhre nicht mit der Zeit, so daß für jede Stromlinie die lokale Strömungsgeschwindigkeit u und insofern auch der lokale Filterparameter nur von der Bahnkoordinate s abhängt.

Die Beladung entlang der Stromlinie ergibt sich bei einer als nicht konstant angesehenen Zulaufkonzentration c_0 in den permeablen Kollektor aus Gl. 7.12 durch Integration über die Zeit.

$$\sigma(s) = \lambda_{0,M}(s) \cdot u(s) \cdot \int_{t_1}^{t_2} c(s, t) dt \quad (7.12)$$

7.3.2 Abscheideleistung von PSK

Zur Quantifizierung der Abscheideleistung in der Anfangsphase der Filtration wird üblicherweise ein sogenannter elementarer Abscheidegrad γ_0 für eine elementare Filterschicht der Länge d_k definiert (z. B. GIMBEL, 1984). Unter der Voraussetzung $\gamma_0 \ll 1$ läßt sich der elementare Abscheidegrad durch den Filterparameter λ_0 ausdrücken.

$$\gamma_0 = \lambda_0 \cdot d_K \quad (7.13)$$

Im folgenden wird der Kollektorabscheidegrad γ_0^* , aus dem der elementare Abscheidegrad γ_0 sowie der Filterparameter λ_0 im weiteren noch zu berechnen sind, wie in den Arbeiten von RAJAGOPALAN und TIEN (1976) durch

$$\gamma_0^* = \frac{J}{\pi \cdot b^2 \cdot c_0 \cdot v_f} \quad (7.14)$$

definiert. Der Kollektorabscheidegrad γ_0^* stellt das Verhältnis des auf dem Kollektor abgeschiedenen Partikelmassenstromes J zu dem in die Happel-Zelle eintretenden Partikelmassenstromes mit der Konzentration c_0 dar. Nach GIMBEL (1984) berechnet sich der elementare Abscheidegrad γ_0 einer elementaren Filterschicht dann aus:

$$\gamma_0 = \frac{3}{2} \cdot (1 - \varepsilon)^{\frac{1}{3}} \cdot \gamma_0^* \quad (7.15)$$

7.3.3 Ermittlung des Kollektorabscheidegrades

Der im permeablen Kollektor abgeschiedene Partikelmassenstrom J stellt formal die Differenz des in die Happel-Zelle eintretenden Partikelmassenstromes und des aus der Happel-Zelle austretenden Partikelmassenstromes dar. Da eine Partikelabscheidung lediglich innerhalb der permeablen Kugel stattfinden kann, ist der abgeschiedene Partikelmassenstrom J auch mit der Differenz des in den permeablen Kollektor eintretenden Partikelmassenstromes und des austretenden Partikelmassenstromes identisch.

$$J = Q_{\text{perm}} \cdot c_0 - Q_{\text{perm}} \cdot c_{k,m} \quad (7.16)$$

Hier ist die Konzentration $c_{k,m}$ eine über die Austrittsfläche des permeablen Kollektors gemittelte Partikelkonzentration. Sie berechnet sich durch Integration der differentiellen Partikelmassenströme $u_r(a_k, \theta) \cdot c(a_k, \theta)$ über die gesamte Austrittsfläche. Aufgrund der Rotationssymmetrie kann das Oberflächenintegral auf eine einfache Integration über die Winkelkoordinate θ zwischen dem Grenzwinkel θ_{gr} , der den beginnenden Austritt der Stromlinien aus der Kollektoroberfläche kennzeichnet, und π zurückgeführt werden.

$$c_{k,m} = \frac{2\pi \cdot a_k^2 \cdot c_0}{Q_{\text{perm}}} \int_{\theta_{gr}}^{\pi} u_r(a_k, \theta) \cdot \sin \theta \cdot \frac{c(a_k, \theta)}{c_0} \cdot d\theta \quad (7.17)$$

Der durch den PSK permeierende Volumenstrom berechnet sich in gleicher Weise durch Integration der Radialgeschwindigkeit des Fluides $u_r(a_k, \theta)$ über die gesamte Austrittsfläche des permeablen Kollektors.

$$Q_{\text{perm}} = 2\pi \cdot a_k^2 \int_{\theta_{gr}}^{\pi} u_r(a_k, \theta) \cdot \sin \theta \cdot d\theta \quad (7.18)$$

Unter Verwendung der Gleichungen (7.16) bis (7.18) läßt sich der Kollektorabscheidegrad nach Gl. 7.14 durch das Produkt des permeierenden Volumenstromanteils und der mittleren Konzentrationsabnahme im permeablen Kollektor darstellen.

$$\gamma_0^* = \frac{Q_{\text{perm}}}{Q_H} \cdot \frac{c_0 - c_{k,m}}{c_0} \quad (7.19)$$

Die mittlere Konzentrationsabnahme kann als innerer Abscheidegrad des PSK unter den jeweiligen Bedingungen der Umströmung in einem Bett aufgefaßt werden. Für eine effektive Partikelentnahme in einem PSK-Tiefenfilter ist daher sowohl ein großer permeierender Volumenstrom als auch eine große mittlere Konzentrationsabnahme bei der Durchströmung der PSK anzustreben. Da der permeierende Volumenstromanteil im wesentlichen mit steigender innerer Oberfläche abnimmt und der innere Abscheidegrad des PSK gleichzeitig ansteigt, bilden sich für den Kollektorabscheidegrad in Abhängigkeit der inneren Oberfläche und der Strömungsbedingungen Maximalwerte aus. Diese Abhängigkeit findet bspw. auch MULDER (1990) aufgrund umfangreicher numerischer Berechnungen.

7.3.4 Vergleich der Abscheidung in Experiment und Modell

Legt man die Gültigkeit des Modells der permeablen Kugel zugrunde, so kann mit dem in Kapitel 5. beschriebenen Verfahren das stationäre Strömungsfeld innerhalb und um den permeablen Kollektor berechnet werden. Zur Simulation der Abscheidung innerhalb des permeablen Kollektors während der Filtration berechnen sich die Konzentrationen am Austrittsrand der permeablen Kugel mit Hilfe von Gl. 7.11 und des experimentell ermittelten Zusammenhangs zwischen dem Filterparameter innerhalb des permeablen Kollektors $\lambda_{0,M}$ und der lokalen Strömungsgeschwindigkeit. Aus dem Integral der daraus zu bestimmenden differentiellen Partikelmassenströme $u_r(a_k, \theta) \cdot c(a_k, \theta)$ über die gesamte Austrittsfläche der permeablen Kugel (Gl. 7.17) und aus dem permeierenden Volumenstrom nach Gl. 7.18 berechnet sich im weiteren der Kollektorabscheidegrad nach Gl. 7.19. Der Filterparameter einer elementaren Filterschicht aus permeablen Kollektoren in der Anfangsphase der Filtration folgt dann im weiteren aus Gl. 7.15 und Gl. 7.13.

In Bild 7.3 sind Ergebnisse einer Simulationsrechnung für den Kollektortyp I60 bei einer Filtergeschwindigkeit von 13,4 m/h in Abhängigkeit des Kollektordurchmessers und die zugehörigen experimentellen Ergebnisse mit einem Durchmesser der volumengleichen Kugel von 6,70 mm und 11,17 mm dargestellt worden. Die Simulationsrechnungen zeigen, daß der Filterparameter λ_0 mit steigendem Kollektordurchmesser stark abnimmt und die experimentellen Ergebnisse in guter Näherung wiedergibt.

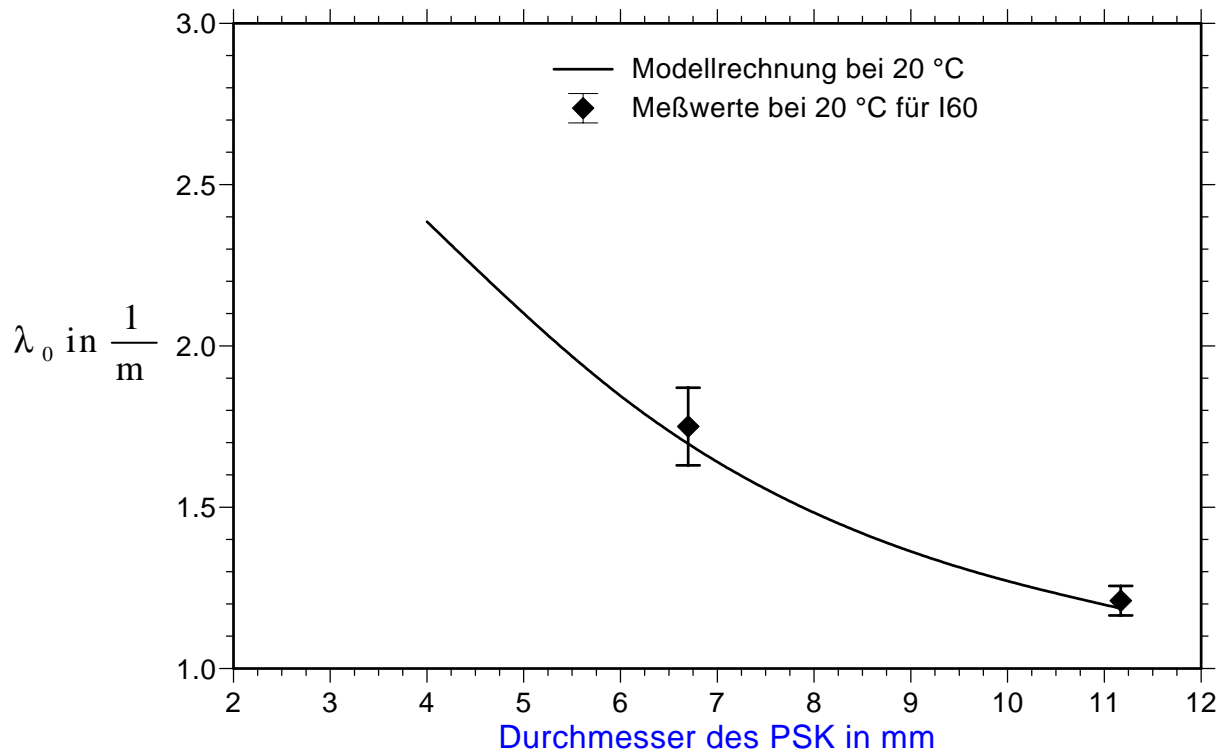


Bild 7.3: Filterparameter in Abhängigkeit des Kollektordurchmessers für den Typ I60.

Parameter: $\varepsilon = 0,4$, $k=3,12 \cdot 10^{-9} \text{m}^2$

Unter Verwendung der Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten nach Gl. 6.11 lassen sich im weiteren auch Vergleiche zum Filterparameter von Modellrechnungen und experimentellen Ergebnissen bei verschiedenen Temperaturen durchführen (Bild 7.4). Die berechneten Filterparameter steigen ebenso wie die Meßwerte mit zunehmender Temperatur. Der Effekt ist darauf zurückzuführen, daß sowohl der permeierende Volumenstrom durch den permeablen Kollektor als auch der Filterparameter innerhalb des permeablen Kollektors $\lambda_{0,M}$ mit zunehmender Temperatur ansteigen. Die Meßwerte des Filterparameters steigen im Vergleich zu den berechneten Werten allerdings mit einer größeren Steigung an. Es ist zu vermuten, daß die phänomenologische Beschreibung der Abscheidung in den Kollektormatten ausschließlich durch die Diffusion nur eine vergleichsweise grobe Näherung darstellt und daher die Temperatureinflüsse nur unzureichend beschrieben werden können.

Bild 7.5 zeigt im wesentlichen anhand von Modellrechnungen, welche Auswirkungen durch eine Veränderung der Bettporosität auf die Filtrationsergebnisse zu erwarten sind. Man erkennt insbesondere, daß Meßwertschwankungen des Filterparameters durch geringfügige Unterschiede in der Bettporosität erklärt werden können.

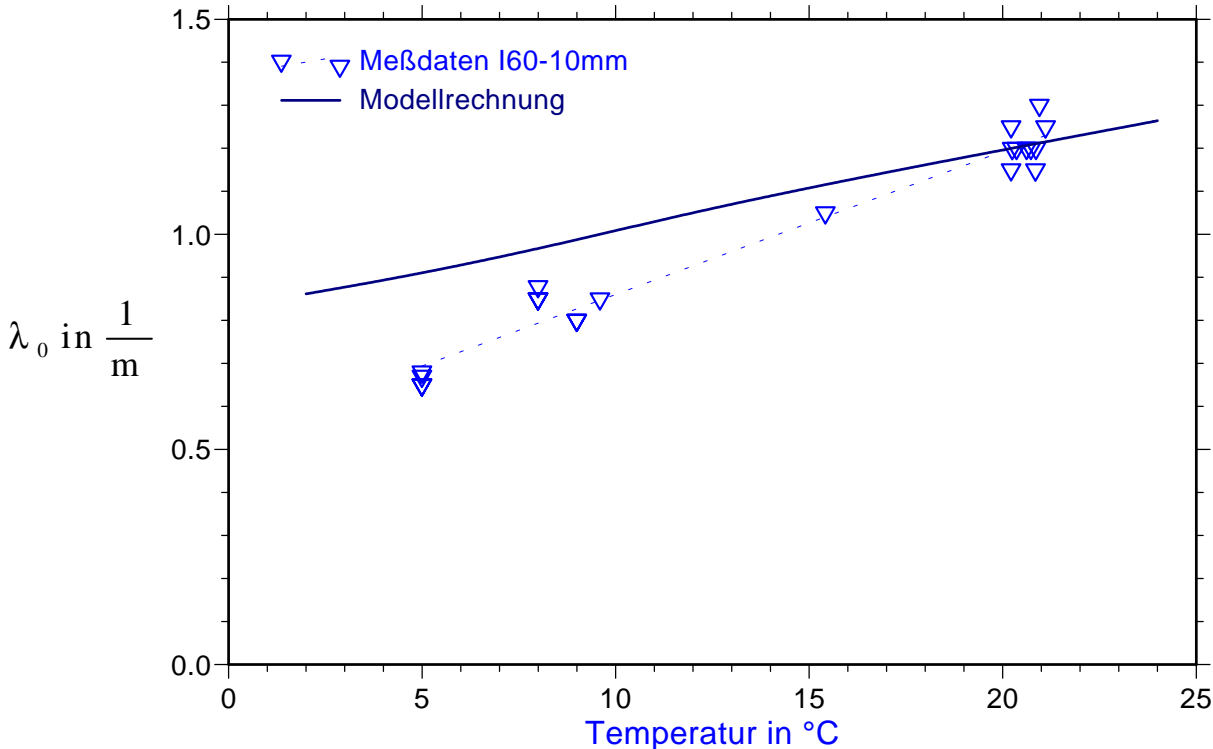


Bild 7.4: Filterparameter in Abhängigkeit der Temperatur für den Kollektor-Typ I60-10mm

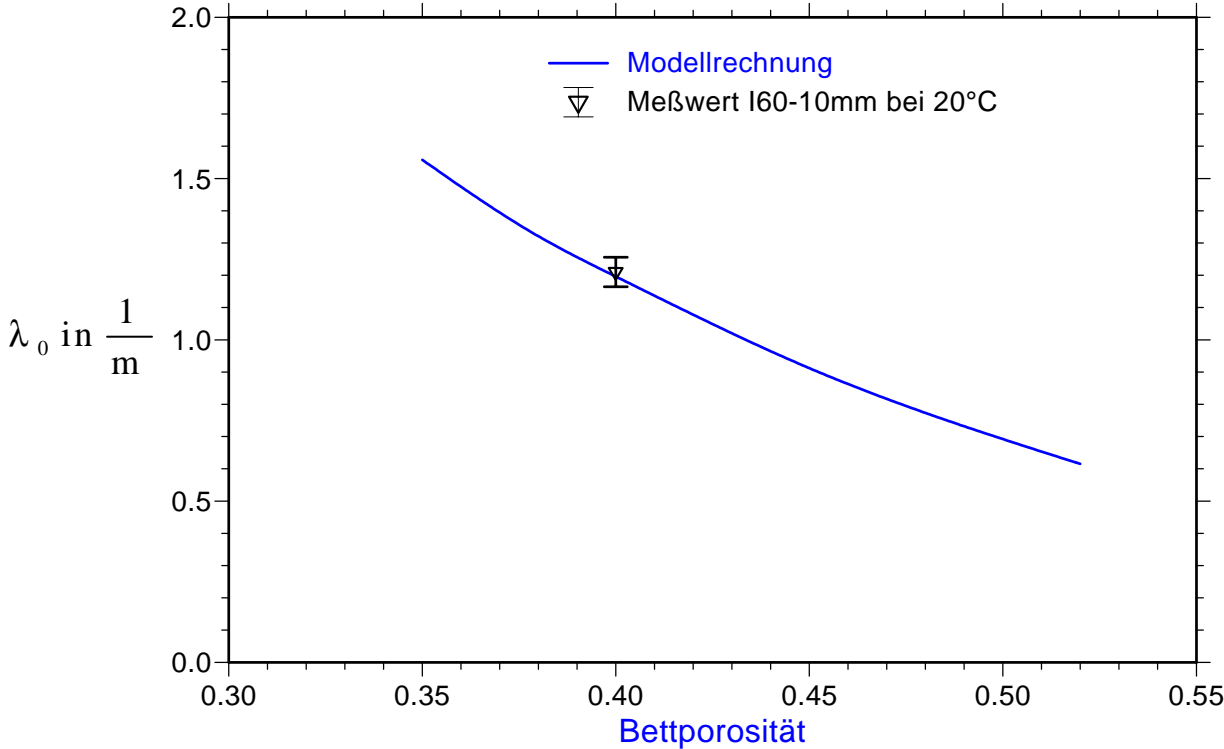


Bild 7.5: Filterparameter in Abhängigkeit der Bettporosität für den Typ I60-10mm bei $20^{\circ}C$

Der Einfluß der Filtergeschwindigkeit auf den Filterparameter λ_0 läßt sich aus Bild 7.6 in einer Gegenüberstellung einiger experimenteller Ergebnisse und berechneter Werte am Beispiel des Materials I60-10mm ablesen. Obwohl die Filtergeschwindigkeit zwischen 13 m/h und 50 m/h fast um den Faktor 4 ansteigt, vermindert sich der Filterparameter lediglich um ca. 33 % (experimentell) bzw. 42 % (Modell). Der permeable Kollektor könnte sein Einsatzgebiet aus diesem Grund bevorzugt bei sehr hohen Filtergeschwindigkeiten haben.

Die hier vorgestellten Vergleiche von Versuchsergebnissen zum Filterparameter λ_0 mit Modellrechnungen zeigten, daß das hier verwendete Filtrationsmodell, bestehend aus einem Strömungsmodell und einem experimentell ermittelten Filterparameter, die physikalischen Verhältnisse sinnvoll beschreibt. Im weiteren kann man dann auch erwarten, daß die Verteilung der Beladung innerhalb des permeablen Kollektors in guter Näherung simuliert werden kann. Die sinnvolle Wiedergabe der Beladungsverteilung im permeablen Kollektor stellt einen wichtigen Ausgangspunkt für die noch folgende Modellierung der Beladungsablösung bei einer Wasserspülung dar.

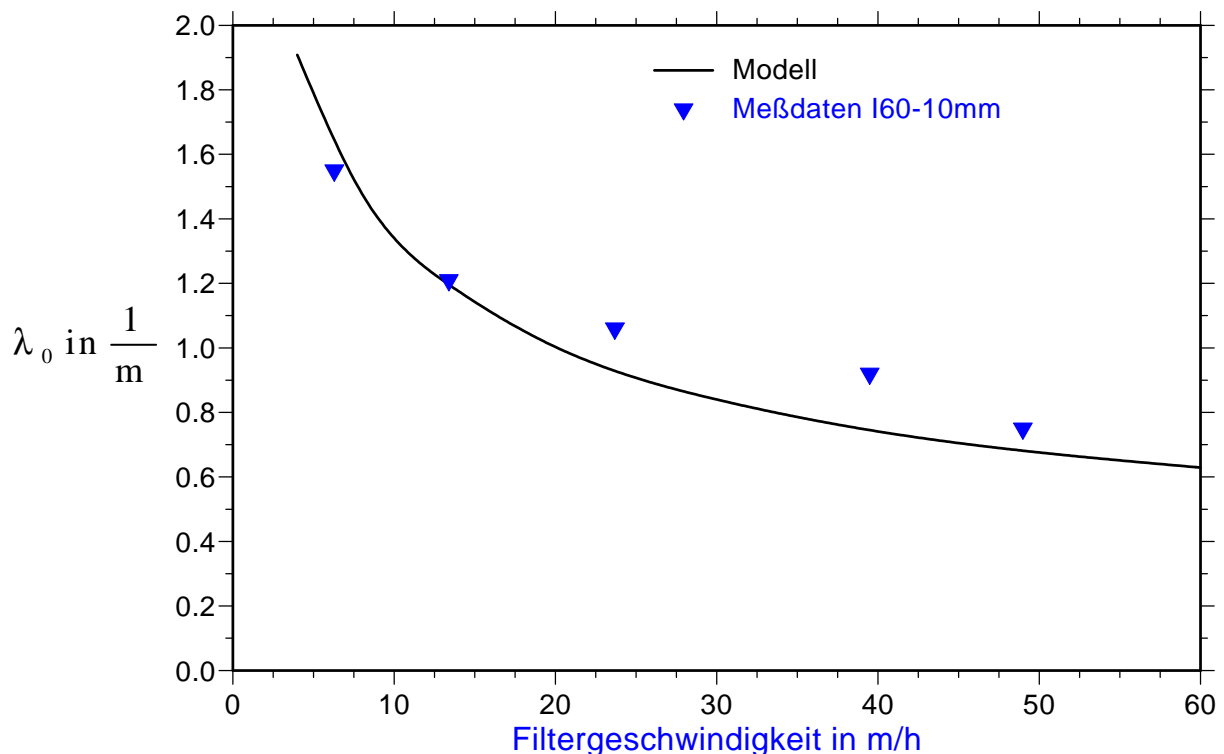


Bild 7.6: Einfluß der Filtergeschwindigkeit auf den Filterparameter für den Kollektor I60-10mm (Parameter: $\varepsilon=0,4$, $T=20^\circ\text{C}$)

7.3.5 Verteilung der Konzentration und Beladung im PSK

Die Simulationsrechnungen zur Abscheidung in PSK liefern ergänzend zu dem auch durch experimentelle Untersuchungen zu bestimmenden makroskopischen Filterabscheidegrad Informationen darüber, wie sich die Konzentration der abzuschheidenden Partikel im permeablen Kollektor bei der Durchströmung verteilt. Die Berechnung eröffnet im weiteren auch die Möglichkeit, die Beladungsverteilung innerhalb des permeablen Kollektors zu bestimmen, was experimentell kaum möglich ist.

Bild 7.7 zeigt die berechneten Konzentrationsverteilungen innerhalb des permeablen Kollektors I60-10mm über der Winkelkoordinate θ und der dimensionslosen Radialkoordinate r^* . Man erkennt, daß die Konzentration entlang der Staupunktgeraden mit $\theta=0$ und $\theta=\pi$ nahezu linear abfällt und dabei bis auf eine Konzentration von ca. 47% der Zulaufkonzentration beim Austritt aus dem permeablen Kollektor abnimmt. Der Einströmrand des permeablen Kollektors läßt sich sehr deutlich an der Konzentration von 100% erkennen. Bei dem daran anschließenden Ausströmrand fällt die Konzentration zunehmend bis auf die Konzentration am Austrittspunkt der Staupunktgeraden von 47% der Zulaufkonzentration ab.

Vergleicht man die Konzentrationsverteilung des Kollektors I60-10mm mit dem etwa halb so großen Kollektortyp I60-6mm (Bild 7.8), so läßt sich eine insgesamt geringere Konzentrationsabnahme innerhalb des permeablen Kollektors vom Typ I60-6mm feststellen. Die minimale Konzentration am Austrittsrand der Staupunktgeraden beträgt hier ca. 74%, so daß die Konzentrationsabnahme hier lediglich ca. die Hälfte des größeren Kollektortyps I60-10mm ausmacht.

Mit dem IWASAKI-Gesetz (Gl. 7.10) läßt sich aus der Konzentrationsverteilung und den lokalen Strömungsgeschwindigkeiten bestimmen, wie sich die abgeschiedene Beladung innerhalb des permeablen Kollektors verteilt. In Bild 7.9 wurde die Beladungsverteilung im Kollektortyp I60-10mm unter den Bedingungen dargestellt, wie sie sich typischerweise nach einem der Filtrationsversuche einstellen würde. Die grafische Darstellung macht deutlich, daß die Beladung entlang des äußeren Kollektorrandes in etwa bei $\theta=\pi/2$ ein relatives Maximum von ca. 13 mg/cm³ durchläuft, welches mehr als dreimal so hoch ist wie die volumengemittelte Beladung des Kollektors von 4,13 mg/cm³. Das Maximum der Beladung erklärt sich durch eine weitaus höhere Strömungsgeschwindigkeit und einem damit verbundenen höheren Partikelstrom in den Randzonen des PSK im Vergleich zu den inneren Zonen. Obwohl auch der Filterparameter mit steigender Strömungsgeschwindigkeit abnimmt, nimmt das Produkt aus Strömungsgeschwindigkeit und dem Filterparameter in den Randzonen zu und bewirkt dem IWASAKI-Gesetz folgend insgesamt einen Anstieg der Beladung.

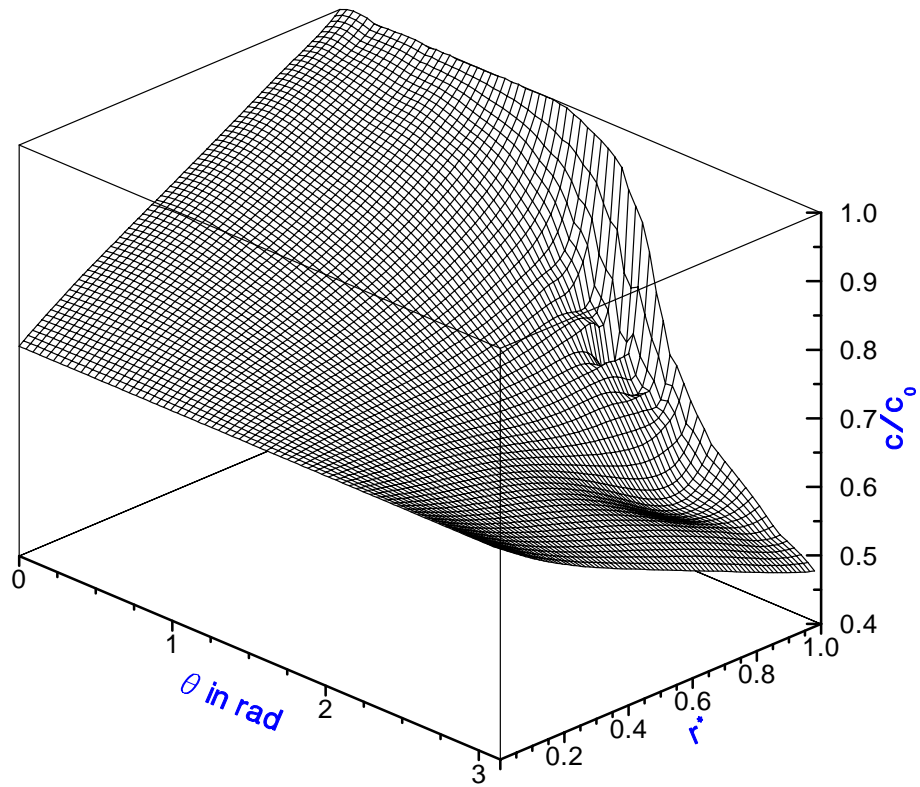


Bild 7.7: Berechnete Partikelkonzentration im PSK für den Typ I60 ($v_f=13,4\text{m/h}$; $T=20^\circ\text{C}$, $d_k=10\text{mm}$)

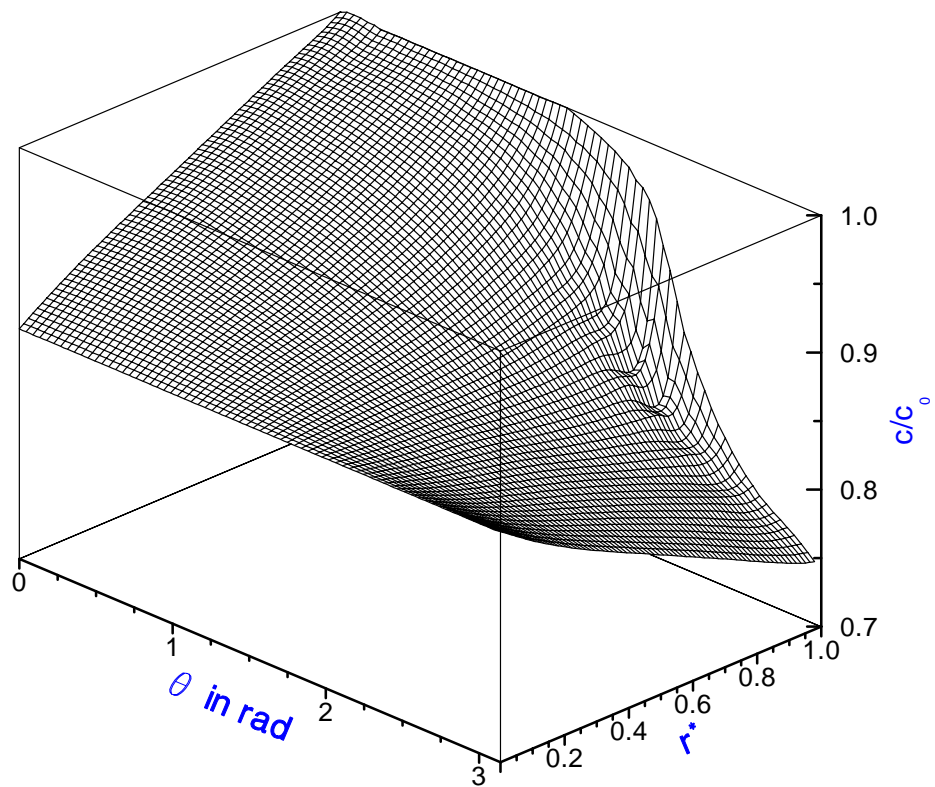


Bild 7.8: Berechnete Partikelkonzentration im PSK für den Typ I60 ($v_f=13,4\text{m/h}$; $T=20^\circ\text{C}$, $d_k=6\text{mm}$)

Aufgrund der näherungsweise linear abfallenden Konzentration entlang der Staupunktgeraden findet man auch eine linear abfallende Beladung von ca. 6mg/cm^3 auf ca. 2mg/cm^3 im Austrittspunkt der Staupunktgeraden am Kollektorrand.

Bei dem kleineren Kollektortyp I60-6mm (Bild 7.10) sind tendenziell die gleichen Effekte wie bei dem Typ I60-10mm in Bild 7.9 erkennbar, jedoch ist die Beladung innerhalb des Kollektors insgesamt homogener verteilt. Die homogenere Verteilung erklärt sich formal dadurch, daß der Gradient des Filterparameters $\lambda_{0,M}$ (vgl. Bild 6.8) mit zunehmender Geschwindigkeit betragsmäßig kleiner wird. Eine größere, mittlere Geschwindigkeit innerhalb des permeablen Kollektors führt daher bei den kleineren PSK zu einem homogener verteilten Filterparameter im Kollektor, woraus sich dann aufgrund des IWASAKI-Gesetzes die homogenere Beladung ergibt.

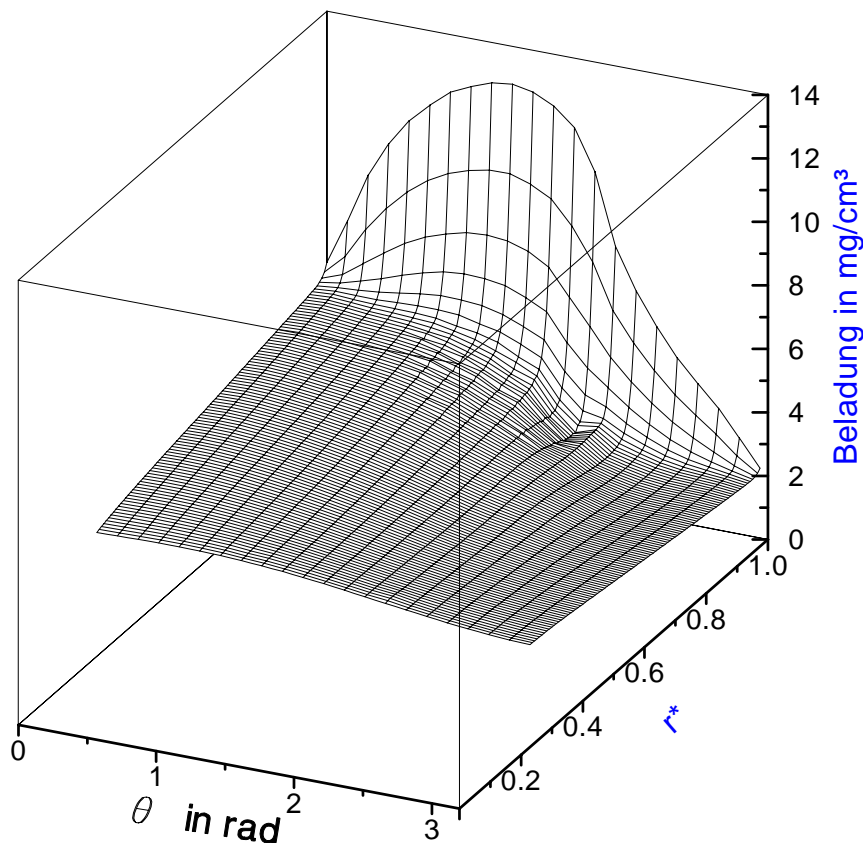


Bild 7.9: Berechnete Verteilung der Beladung innerhalb des PSK für den Typ I60-10mm bei 20°C (volumengemittelte Beladung $\approx 4,13\text{ mg/cm}^3$)

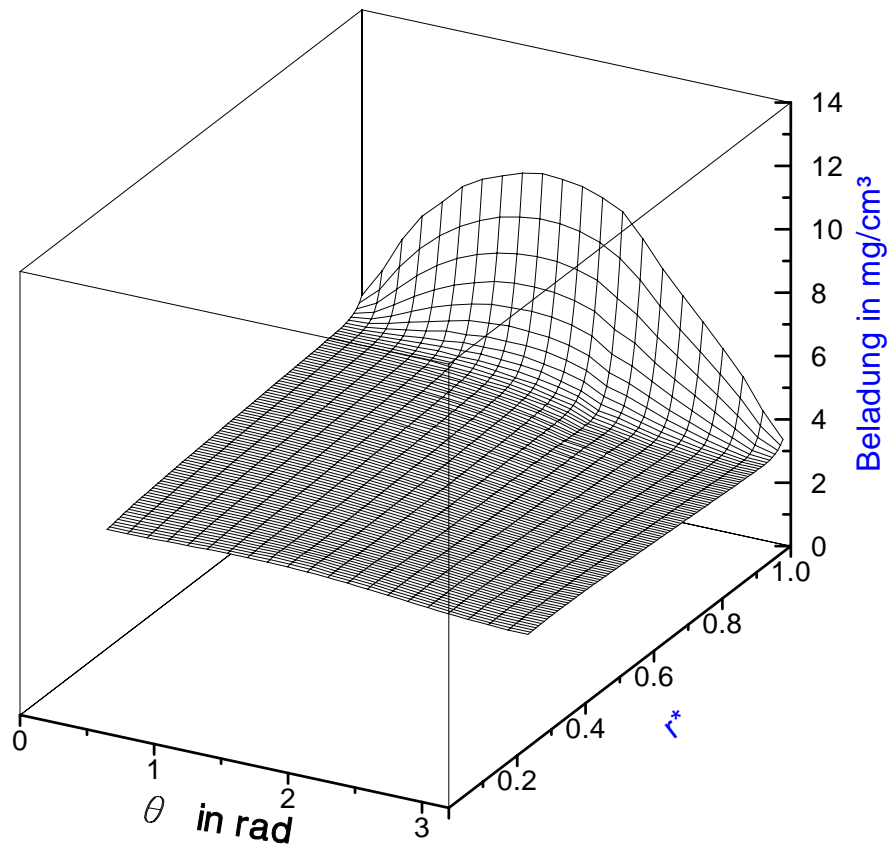


Bild 7.10: Berechnete Verteilung der Beladung innerhalb des PSK für den Typ I60-6mm bei 20°C (volumengemittelte Beladung = 4,13 mg/cm³)