



Bergische Universität Wuppertal – Fk 7
Fachgebiet Sicherheitstechnik/Umweltschutz
Eberhard Schmidt (Hrsg.)
Wuppertaler Reihe zur Umweltsicherheit



Christian Messner

Entwicklung einer methodischen Anwendung von Indikatoren für die Quantifizierung einer nachhaltigen Produktion am Beispiel der Textilveredlung

**SHAKER
VERLAG**



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

**Entwicklung
einer methodischen Anwendung von Indikatoren
für die Quantifizierung einer nachhaltigen Produktion
am Beispiel der Textilveredlung**

**Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades**

in der
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
der
Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von
Christian Messner
aus Hamm

Wuppertal 2017

Wuppertaler Reihe zur Umweltsicherheit

Christian Messner

**Entwicklung einer methodischen Anwendung von
Indikatoren für die Quantifizierung einer nachhaltigen
Produktion am Beispiel der Textilveredlung**

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5769-0

ISSN 1861-1001

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

"Damit das Mögliche entsteht, muss immer wieder
das Unmögliche versucht werden."

[1]

Danksagung

Danken möchte ich vor allem meinem geschätzten Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. nat. Joachim M. Marzinkowski. Er hat mich seit meinem Studium gefördert und für die Themen integrierter Umweltschutz und Nachhaltigkeit begeistert. Er gewährte mir in meiner Forschung große Freiräume und ließ mich an seinem unerschöpflichen Wissen in allen Bereichen des integrierten Umweltschutzes und der Textilveredlung teilhaben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Schmidt fertigte nicht nur für das Zweitgutachten an, sondern übernahm auch wichtige Aufgaben bei meiner wissenschaftlichen Betreuung. Nach der Emeritierung von Herrn Prof. Marzinkowski fand ich in seinem Fachgebiet eine neue Heimat.

Herrn apl. Prof. Dr. rer. pol. Ralf Pieper und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Roland Goertz danke ich für die Komplettierung der Prüfungskommission.

Ein großer Teil der praktischen Untersuchungen wurde bei der Firma Dolinschek GmbH, Burladingen, durchgeführt. Für die große Unterstützung danke ich dem Geschäftsführer Herrn Theo Dolinschek und dem Produktionsleiter Herrn Erwin Dolinschek, sowie den Textillaboranten Mustafa Somun und Nastaja Merz, dem Leiter der Technik Thomas Mardek und den Maschinenführern Herman Özdemir, Sertan Sen und Francesco Acciaro. Sie und zahlreiche weitere Mitarbeiter haben die Untersuchungen stets tatkräftig unterstützt. Verwaltungsseitig hat Frau Kathrin Fuchs unschätzbare Arbeit geleistet. Ein Betrieb kann sich glücklich schätzen, solch fleissige, hilfsbereite und wissbegierige Mitarbeiter zu haben.

Herrn Priv. Doz. Dr. Jörg Kleffmann danke ich für die Betreuung der praktischen Laborversuche und für das Aufzeigen der Möglichkeiten und Grenzen der Photokatalyse.

Bei den praktischen Laborversuchen und wichtigen Recherchearbeiten haben mich auch Sara Costanza, Gero Marx, Thilo Schmitz, Jonas Sieger, Marlon Suckel und insbesondere Christopher Hammel unterstützt, sei es als studentische Mitarbeiter oder durch ihre Abschlussarbeiten.

Danken möchte ich auch meinen aktuellen und ehemaligen Kollegen, allen voran Frau Martina Henseleit, die mich nicht nur seit meiner Anfangszeit im Fachgebiet Sicherheitstechnik/Umweltchemie begleitet sondern auch bei zahllosen Verwaltungsaufgaben unterstützt und mir stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden hat.

Für die kritische Durchsicht meiner Manuskripte danke ich unter anderem Herrn Kai Vaupel und insbesondere Herrn Dipl. Ing. Horst Schmidtberg.

Zu guter letzt möchte ich mich bei meiner Familie, insbesonder meiner Mutter, Frau Jutta Droste, die immer an mich geglaubt und mich während meines gesamten Studiums unterstützt haben. Besonderer Dank gilt meiner Frau Sina, die die Erstellung dieser Arbeit mit großer Geduld begleitet und mich stets ermutigt hat.

Vielen Dank!

Abstract

The aim of the thesis was to develop a methodological application that enables a quantitative statement on selected processes and indicators by means of key figures on turnover, efficiency, quality, occupational safety and environmental effects. Small and medium-sized enterprises should therefore be able to make decisions regarding the introduction of new processes and products respectively process and product changes in the sense of sustainable production. The basis is provided by appropriate information on the raw materials and chemical aids used in the plant, which are mainly available via the safety data sheets provided by the suppliers. To translate the process indicators into indicators, their orientation on the qualification of the company's staff is necessary in order to be able to carry out an ever-recurring use and control in connection with the process and product development.

On the basis of two example processes, a washing process of raw materials on a continuously operated screen drum washing machine and the development of a textile filter for the separation of particulate matter and the simultaneous elimination of gaseous nitrogen oxides, key figures for a quantitative description and indicators are introduced and investigated in particular on environmental aspects. Technical deficits during the washing process inevitably lead to a shifting of fiber associated material not removed by the laundry into the subsequent drying and fixing process, where they can lead to increased expenditure on the treatment of the exhaust air and also to quality problems. The textile filter advantageously has two different sides which, on the one hand, enable the particulate matter deposition and, on the other hand, the nitrogen oxide elimination via a UV-light-aided and titanium dioxide catalyzed reaction. This double-sided filter can be realized with a novel coating process.

Zusammenfassung

Das Ziel der Arbeit bestand darin, eine methodische Anwendung zu entwickeln, die über Kenngrößen zu Umsatz, Wirkungsgrad, Qualität, Arbeitsschutz und Umweltwirkungen eine quantitative Aussage zu ausgewählten Prozessen und Indikatoren ermöglicht. Kleine und mittlere Unternehmen sollen dadurch in der Lage sein, Entscheidungen zur Einführung neuer Verfahren und Produkte resp. zu Verfahrens- und Produktänderungen im Sinne einer nachhaltigen Produktion zu finden. Als Basis dienen geeignete Informationen zu den im Betrieb eingesetzten Rohwaren und chemischen Hilfsmitteln, die vorwiegend über die von den Lieferanten zur Verfügung gestellten Sicherheitsdatenblätter vorliegen. Für eine Überführung der Prozesskenngrößen in Indikatoren ist ihre Ausrichtung auf die Qualifikation des betrieblichen Personals notwendig, damit eine immer wiederkehrende Verwendung und Kontrolle im Zusammenhang mit der Verfahrens- und Produktentwicklung praktiziert werden kann.

Anhand von zwei Beispielprozessen, einem Waschprozess von Rohwaren auf einer kontinuierlich betriebenen Siebtrommelwaschmaschine und der Entwicklung eines Textilfilters für die Abscheidung von Feinstäuben und gleichzeitige Eliminierung gasförmiger Stickoxide werden Kenngrößen für eine quantitative Beschreibung und Indikatoren insbesondere zu Umweltaspekten eingeführt und untersucht. Technische Defizite beim Waschprozess führen zwangsläufig zu einer Verlagerung von nicht durch die Wäsche entfernten Faserbegleitstoffen in den nachfolgenden Trocknungs- und Fixierprozess, wo sie zu einem erhöhten Aufwand bei der Behandlung der Abluft und auch zu Qualitätsproblemen führen können. Der Textilfilter weist günstigerweise zwei unterschiedliche Seiten auf, die einerseits die Feinstaubabscheidung und andererseits die Stickoxid-Eliminierung über eine UV-Licht-gestützte und mit Titandioxid katalysierte Reaktion ermöglichen. Mit einem neuartigen Beschichtungsverfahren kann dieser zweiseitige Filter realisiert werden.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	V
Zusammenfassung	VI
Abstract.....	VI
Inhaltsverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XVI
Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis	XX
Formelzeichenverzeichnis	XXIII
1. EINLEITUNG.....	1
1.1. Hinführung.....	1
1.2. Problemstellung und Zielsetzung.....	7
1.3. Aufgabenstellung	9
2. STAND DER TECHNIK UND DES WISSENS	11
2.1. Nachhaltige Produktion und Produkte	11
2.1.1. Nachhaltigkeit im Sinne der Brundtland-Kommission	11
2.1.2. Das Problem der Verschwendung	15
2.1.3. Entwicklung nachhaltiger Produkte in kleinen und mittleren Unternehmen	16
2.1.4. Nachhaltige Produktion aus Sicht von Anwendern chemischer Stoffe	18
2.1.5. Indikatoren zur Beschreibung der Nachhaltigkeit der Produktion und der Produkte	33
2.1.6. Produktions- und prozessintegrierte Maßnahmen des Umweltschutzes (Arbeitsschutz, Qualitätssicherung und Kostenmanagement)	38
2.1.7. Die Wiederentdeckung der Menschenwürde als Kriterium für die Auseinandersetzung von Vorgesetzten und Mitarbeitern	39
2.1.8. Nachhaltigkeit von Produkten aus Sicht des Konsumenten (Erwartungshaltung)	40
2.2. Herstellung und Veredlung von Maschenware	41
2.2.1. Herstellung von Polyesterfasern und Polyestergarn	41
2.2.2. Herstellung von Maschenware	45
2.2.3. Unterschiede zwischen Maschenware, Gewebe und Vliesstoff	46
2.2.4. Waschmaschinen und Waschverfahren	47
2.2.5. Appreturverfahren und Appreturtechnik	50

2.3. Maßnahmen zur Luftreinhaltung	53
2.3.1. Grundlagen der Partikeltechnologie	53
2.3.2. Die Photokatalyse	56
2.4. Das beteiligte Textilunternehmen	58
3. EXPERIMENTELLES	61
3.1. Untersuchung und Optimierung eines Waschprozesses	61
3.1.1. Bestimmung des CSB-Wertes	64
3.1.2. Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit und der Temperatur	64
3.1.3. Bestimmung der Präparationsmittelaufgaben	65
3.1.4. Messung des pH-Wertes und der Temperatur	65
3.2. Entwicklung eines einseitigen Appreturauftrags	66
3.2.1. Beschreibung der Ausgangslage	66
3.2.2. Laborversuche	66
3.2.3. Bestimmung des Rohgewichts	71
3.2.4. Bestimmung der Flottenaufnahme	71
3.2.5. Bestimmung der hydrophoben Eigenschaften	71
3.3. Entwicklung eines Filtermediums für die Reduzierung von Partikeln und Luftschadstoffen	71
3.3.1. Ziel der Entwicklung	71
3.3.2. Definition der Textilien	72
3.3.3. Charakterisierung der Beschichtungen	73
3.3.4. Ausrüstung der Textilien mit den Beschichtungen	74
3.3.5. Bestimmung der Luftdurchlässigkeit und des Staudrucks	76
3.3.6. Bestimmung der Partikelabscheidung	76
3.3.7. Bestimmung der Reduzierung von Stickoxiden	77
3.4. Ausführung von Berechnungen und Kalkulationen von ProzessKenngrößen	84
3.4.1. Textilmassenstrom	84
3.4.2. Wasservolumenstrom	84
3.4.3. Wärmestrom	85
3.4.4. Elektrische Energie	87
3.4.5. Stofffracht im Abwasser	87

Inhaltsverzeichnis

3.4.6. Darstellung der Prozesskalkulation und -ermittlung	88
4. ERGEBNISSE	91
4.1. Optimierung von Veredlungsprozessen im Sinne des PIUS	91
4.1.1. Untersuchung und Verbesserung von Waschprozessen	91
4.1.2. Untersuchung und Verbesserung des Appreturauftrags	98
4.1.3. Diskussion der Ergebnisse im Zusammenhang mit Effizienzsteigerung und Emissionsminderung	105
4.2. Entwicklung und Einsatz von Filtermedien für den Immissionsschutz	109
4.2.1. Auswahl der Textilien	109
4.2.2. Ausrüstung der Textilien mit den Beschichtungen	110
4.2.3. Luftdurchlässigkeit und Staudruck	111
4.2.4. Partikelabscheidung	113
4.2.5. Stickoxidreduktion	115
4.2.6. Diskussion der Ergebnisse	117
5. DISKUSSION DER PRAKTISCHEN ERGEBNISSE ZUR ABLEITUNG EINER NACHHALTIGEN ENTWICKLUNG	121
5.1. Ziel einer Modellierung einer nachhaltigen Produktion zur weitergehenden Entwicklung	121
5.2. Notwendigkeiten und Einschränkungen durch die Festlegung von Systemgrenzen	123
5.3. Entwicklung und Auswahl spezifischer Kenngrößen zur Darstellung einer nachhaltigen Produktion und deren Produkte	127
5.4. Überführung der Kenngrößen in Indikatoren zum produktionsintegrierten Umweltschutz und zur Materialeffizienz	130
5.5. Modellierung einer nachhaltigen Produktion für KMU anhand geeigneter Indikatoren im Kontext einer weitergehenden Entwicklung	134
6. ZUSAMMENFASSENDE DISKUSSION	149
7. AUSBLICK	156
Literaturverzeichnis	XXVII
Lebenslauf	XXXV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schema zur Vorgehensweise bei der Prüfung der Gewässerrelevanz der in der Textilveredelung eingesetzten chemischen Stoffe hinsichtlich ihrer biologischen Abbaubarkeit unter Berücksichtigung der Möglichkeit einer Verdünnung und einer Reaktion mit weiteren im Abwasser enthaltenen Stoffen auf dem Weg von der Einleitestelle bis zum Klärwerk innerhalb des Kanalisationsnetzes.....	6
Abbildung 2:	Schnittmengen Modell der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit [15].....	12
Abbildung 3:	Die 17 Ziele zur nachhaltigen Entwicklung; in Anlehnung an: [16].....	14
Abbildung 4:	Herstellung von Polyethylterephthalat (PET) durch Umesterung ausgehend von Dimethylterephthalat (DMT) unter Abspaltung von Methanol [55].....	41
Abbildung 5:	Direkteresterung von Terephthalsäure und Ethylenglycol zu Polyethylterephthalat unter Abspaltung von Wasser [58].....	42
Abbildung 6:	Vereinfachte, schematische Darstellung der wesentlichen Prozesse von der Rohstoffgewinnung bis zum Versand veredelter Maschenwaren mit den wichtigsten Inputs und Outputs	44
Abbildung 7:	Lebensweg von Textilien von der Produktion über die Nutzung und Wiedermutzung bis zur energetischen und stofflichen Verwertung mit prozentualen Mengenangaben [59].....	45
Abbildung 8:	Vergleich von Kulierware (links) und Kettenware (rechts) als Ware (oben) und schematisch (unten) [64].....	46
Abbildung 9:	Gegenüberstellung von Gewebe, Vlies, Flechtware und Maschenware; [63].	47
Abbildung 10:	Unterteilung der Appretur in mechanische und chemische Appretur und Zuordnung einiger Appreturverfahren; nach [69]	50
Abbildung 11:	Schematische Darstellung der Foulardtechnik: Das trockene Textil (1) läuft durch ein mit der Appreturflotte gefülltes Chassis (2), das zur Reduzierung des Volumens einen Verdrängungskörper (6) enthält, und läuft durch zwei Foulardwalzen (5), welche die überschüssige Appreturflotte abquetschen. Die überschüssige Appreturflotte läuft über ein Auffangblech (4) zurück in das Chassis. Eine optionale Chassisheizung (3) kann die Appreturflotte auf einer bestimmten Temperatur halten [62].....	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 12:	Schematische Darstellung des Prinzips einer Lufrakel (links), bei der die Rakel zwischen zwei Walzen „in der Luft“ installiert ist, einer Gummituchrakel (Mitte), bei der die Rakel auf einem zwischen zwei Walzen laufenden Gummituch installiert ist, und einer Walzenrakel (rechts), bei der die Rakel auf einer Walze in der „12-Uhr-Position“ installiert ist; nach: [70], 52
Abbildung 13:	Streuung eines einfallenden Lichtstrahls an einer einzelnen Partikel [74],..... 54
Abbildung 14:	Schematische Darstellung der kontinuierlichen Breitwaschmaschine zu Beginn der Untersuchung und Optimierung des Waschprozesses, [85] 62
Abbildung 15:	Schematische Darstellung der kontinuierlichen Breitwaschmaschine des beteiligten Textilveredlungsunternehmens nach dem Ende der Untersuchung und Optimierung des Waschprozesses; [85]..... 64
Abbildung 16:	Schematische Übersichtsskizze der Walzenpositionen in der Versuchsanordnung 1 [86]..... 67
Abbildung 17:	Schematische Darstellung der Versuchsanordnung 5 mit der Walzenpositionen nach dem Transportband mit der Möglichkeit der Umschlingung der Rasterwalze durch die Ware. Der nachfolgende Foulard diente ausschließlich dem Warentransport [86], 68
Abbildung 18:	Schematische Darstellung der Walzenpositionen oberhalb des Transportbandes mit der Möglichkeit der Umschlingung der Rasterwalze durch die Ware. Der nachfolgende Foulard diente ausschließlich dem Warentransport Großtechnische Umsetzung [86] 69
Abbildung 19:	Schematische Darstellung der Anordnung der Gummiwalze (GW), der Rasterwalze (RW), der Leitwalze zur Einstellung der Umschlingung der Rasterwalze durch die Ware und der Rakel auf der Rasterwalze zur Abstreifung überschüssiger Flotte in der großtechnischen Pilotanlage. Der vorgeschaltete Foulard diente ausschließlich dem Warentransport, das Chassis wurde nicht verwendet [87], 70
Abbildung 20:	Bild des Versuchsreaktors (Flussreaktor) mit Lampenkasten und Rahmen bei eingeschalteter UV-Lichtquelle; rechts im Bild ist die Schlauchpumpe zu sehen, mit welcher das hochreine Wasser des Befeuchters dosiert wird. 78
Abbildung 21:	Schematische Darstellung der wichtigsten Komponenten des LOPAP-Messgerätes [94] 81
Abbildung 22:	Beispiel der Tabellenkalkulation eines Waschprozesses auf der untersuchten Breitwaschmaschine 90

- Abbildung 23:** Gegenüberstellung der Präparationsmittelrückstände aller 20 untersuchten Artikel zu Beginn der Untersuchung und Optimierung des Waschprozesses sortiert nach steigendem Elastan-Anteil (CO = Baumwolle, CV = Viskose, EL = Elastan, Micro-Modal = Modal- Mikrofasern, Micro-PES = Polyester-Mikrofaser, PA = Polyamid, PES = Polyester, TAC = Celluloseacetat)..... 93
- Abbildung 24:** Gegenüberstellung der mit organischen Lösemitteln extrahierbaren Auflagen von zwei häufig wiederkehrenden Artikeln aus 6 Gew.-% Elastan und 94 Gew.-% Baumwolle sowie aus 11 Gew.-% Elastan und 89 Gew.-% Polyester jeweils vor dem Waschprozess (Rohware), nach der Benetzung des Textils mit dem Waschmittel inklusiver aller Waschhilfsmittel (imprägnierte Ware) und am Ende des Waschprozesses (gewaschene Ware) angegeben in Gewichtsprozent bezogen auf das Trockengewicht des ungewaschenen Textils; zentral vor den drei Balken der einzelnen Prozessschritte ist die Reduzierung der Auflagen in Prozent bezogen auf die Masse der Auflagen vor dem Waschprozess dargestellt 92
- Abbildung 25:** Vergleich der mit organischen Lösemitteln extrahierbaren Auflagen von zwei häufig wiederkehrenden Artikeln aus 6 Gew.-% Elastan und 94 Gew.-% Baumwolle sowie aus 11 Gew.-% Elastan und 89 Gew.-% Polyester zu Beginn der Untersuchungen und Optimierung des Waschprozesses sowie zum Abschluss der Optimierung des Waschprozesses nach dem letzten Umbau jeweils vor dem Waschprozess (Rohware), nach der Benetzung des Textils mit dem Waschmittel inklusiver aller Waschhilfsmittel (imprägnierte Ware) und am Ende des Waschprozesses (gewaschene Ware) angegeben in Gewichtsprozent bezogen auf das Trockengewicht des ungewaschenen Textils; zentral vor den drei Balken der einzelnen Prozessschritte ist die Reduzierung der Auflagen in Prozent bezogen auf die Masse der Auflagen vor dem Waschprozess dargestellt 95
- Abbildung 26:** Grafische Darstellung der Fraktionsabscheidegrade $T(x)$ für das Textil 4 unausgerüstet sowie ausgerüstet mit der Textilbeschichtung TA 2246 unverdünnt (pur) und im Verhältnis 1:1 mit Wasser verdünnt sowie mit der Fassadenfarbe Photosan in den Verdünnungen 1:1, 1:2 und 1:4 aufgetragen über der logarithmisch dargestellten Partikelgröße 115
- Abbildung 27:** Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf die Depositionsgeschwindigkeit von Stickstoffmonoxid bei dem Textil 4 mit einer Flächenmasse von 150 g/m^2 ausgerüstet mit der im Verhältnis 1:2 mit Wasser verdünnten Fassadenfarbe Photosan 117
- Abbildung 28:** Verlauf der Konzentration an Stickstoffmonoxid in einem Raum mit einem Volumen von 36 m^3 bei Einsatz eines Inside-Filters von 150 cm Höhe, 30 cm Durchmesser und einem Luftdurchsatz von $75 \text{ m}^3/\text{h}$ und einer Depositionsgeschwindigkeit von 3 cm/s 120

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 29:** Systemgrenzen einer Ökobilanz entlang des Lebenswegs eines Textils von der Gewinnung der Rohstoffe und deren Herstellung über die Produktion der Vorprodukte und des Endproduktes bis zur Nutzung und der abschließenden Entsorgung inklusive eventueller Weiternutzungspfade und des Recyclings in einer vereinfachten Darstellung ohne Berücksichtigung der Transportwege 125
- Abbildung 30:** Systemgrenzen zur Durchführung einer Wirkungsanalyse eines Textils entlang des Produktionsverfahrens von der Bereitstellung der Vorprodukte bis Konfektionierung mit den in der Produktion eingesetzten Ressourcen (Chemikalien, Energie und Wasser) als Input und Abluft, Abwasser und den darin enthaltenen Emissionen als Output in einer vereinfachten Darstellung ohne Berücksichtigung der Transportwege 126
- Abbildung 31:** Übersicht über die Prozesskalkulation mit einer schematischen Darstellung der Waschmaschine und den ProzessKenngrößen im Ausschnitt 1 (links oben), den Prozessdaten, den Prozessanalysewerten und den Abwasserwerten im Abschnitt 2 (links unten) sowie der Übersicht über die CSB-, Phosphor- und Stickstofffrachten der durch die Textilien mit in den Prozess eingebrachten Begleitstoffe und der Rezepturen sowie der Kalkulation der Konzentrationen dieser Frachten im Oberflächengewässer nach Passieren der Kläranlage im Abschnitt 3 (rechts)..... 136
- Abbildung 32:** Ausschnitt 1 aus der Prozesskalkulation mit einer schematischen Darstellung der Waschmaschine und den ProzessKenngrößen zur Umweltbelastung (rechte Seite) 138
- Abbildung 33:** Ausschnitt 2a aus der Prozesskalkulation mit der Modellierung der Prozessdaten und der Prozessanalysewerte 140
- Abbildung 34:** Ausschnitt 2b aus der Prozesskalkulation mit der Modellierung der Prozessanalysewerte und den Abwasserwerten für einen Waschprozess an der optimierten Waschmaschine 141
- Abbildung 35:** Ausschnitt 3a aus der Prozesskalkulation mit der Berechnung der spezifischen CSB-, Phosphor- und Stickstofffrachten der Schlichte (oben), der Berechnung der spezifischen CSB- und Phosphor-Frachten der Präparationsmittel (Mitte) und der Rezepturen sowie der Rezeptur und der Kalkulation der Konzentrationen dieser Frachten im Oberflächengewässer nach Passieren der Kläranlage (unterer Abschnitt) 143

Abbildung 36: Ausschnitt 3b aus der Tabellenkalkulation für die Waschrezeptur mit Kalkulation der Konzentrationen der Frachten im Oberflächengewässer nach Passieren der Kläranlage (oberer Abschnitt), der Zusammenfassung der CSB-, Phosphor- und Stickstofffrachten des gesamten Prozesses (Mitte) und den Annahmen über die Waschwirkung der einzelnen Abteile der Waschmaschine für die iterative Angleichung der kalkulierten CSB-Konzentrationen mit den tatsächlich gemessenen Werten (unterer Abschnitt)..... 144

Abbildung 37: Ablaufdiagramm zur Ermittlung der von den Prozessen ausgehenden Emissionen [100] 146

Abbildung 38: Ablaufdiagramm zur Ermittlung des Gefahrenpotenzials, der Erstellung von Betriebsanweisungen und zur Suche nach Ersatzstoffen [101] 147

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zuordnung der in einem Waschprozess zur Textilveredlung eingesetzten chemischen Stoffe aufgrund der H-Sätze der Sicherheitsdatenblätter zu den Gefährungsstufen gemäß des Spaltenmodells nach [30]	23
Tabelle 2:	Bedeutung der R-Sätze und Zuordnung des Wirkfaktoren W auf Grundlage der TRGS 440, nach [33]	26
Tabelle 3:	Übertragung der Wirkfaktoren auf die H-Statements durch Zuordnung eines oder mehrerer R-Sätze zu den H-Statements nach [32]	28
Tabelle 4:	Vorgehen zur Berechnung des Wirkpotentials einer Zubereitung als Summe der Produkte für die in einem Waschprozess zur Textilveredlung eingesetzten Waschmittel	29
Tabelle 5:	Vorgehen zur Berechnung des Wirkpotentials einer Zubereitung als Summe der Produkte für die in einem Waschprozess zur Textilveredlung eingesetzten Waschmittel mit zusätzlichem Einsatz von Natronlauge	30
Tabelle 6:	Übersicht der 16 hergestellten Maschenwarenmuster mit der Stricktechnik (Spalte „Bezeichnung“), der Garnzusammensetzung (PES = Polyester, BW = Baumwolle, EA = Elastan), dem Flächengewicht der Musterstücke in Gramm pro Quadratmeter, der Farbe sowie der maximalen Waschttemperatur in °C	73
Tabelle 7:	Gegenüberstellung des Titandioxidanteils, der Dichte, des Feststoffgehalts, des pH-Wertes und der Viskosität der Fassadenfarbe Photosan, der Textilbeschichtung TA 2246 und der Beschichtung S5-300B für technische Anwendungen sowie zu Vergleichszwecken Wasser; Aufgrund der geringen Probenmenge kann die Viskosität der Beschichtung S5-300B nicht bestimmt (n. b.) werden	74
Tabelle 8:	Gegenüberstellung des chemischen Sauerstoffbedarfs und der elektrischen Leitfähigkeit von zwei häufig wiederkehrenden Artikeln aus 6 Gew.-% Elastan und 94 Gew.-% Baumwolle (EL + CO) sowie aus 11 Gew.-% Elastan und 89 Gew.-% Polyester (EL + PES) zu Beginn der Untersuchungen und Optimierung des Waschprozesses in den Wasser- und Abwasserproben sowie die Reduzierung des chemischen Sauerstoffbedarfs resp. der elektrischen Leitfähigkeit ausgehend vom Imprägnierabteil/Vornetzbecken im Vergleich zum Abwasser aus dem Foulard (Reduzierung [%])	94

Tabelle 9: Gegenüberstellung des chemischen Sauerstoffbedarfs und der elektrischen Leitfähigkeit von zwei häufig wiederkehrenden Artikeln aus 6 Gew.-% Elastan und 94 Gew.-% Baumwolle (EL + CO) sowie aus 11 Gew.-% Elastan und 89 Gew.-% Polyester (EL + PES) zum Abschluss der Optimierung des Waschprozesses nach dem letzten Umbau in den Wasser- und Abwasserproben sowie die Reduzierung des chemischen Sauerstoffbedarfs resp. der elektrischen Leitfähigkeit ausgehend vom Imprägnierabteil/Vornetzbecken im Vergleich zum Abwasser aus dem Foulard (Reduzierung [%]) 96

Tabelle 10: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Werte für Artikel aus 6 % Elastan und 94 % Baumwolle zu Beginn der Untersuchungen und Optimierung des Waschprozesses sowie zum Abschluss der Optimierung des Waschprozesses nach dem letzten Umbau sowie der Veränderung für die Restauflagen nach dem Waschprozess, die Reduzierung der Auflagen ausgehend von der trockenen Ware vor dem Waschprozess im Vergleich zur trockenen Ware nach dem Waschprozess, der Reduzierung des chemischen Sauerstoffbedarfs und der elektrischen Leitfähigkeit ausgehend jeweils vom Imprägnierabteil/ Vornetzbecken im Vergleich zum Abwasser aus dem Foulard sowie den spezifischen Wasserverbrauch, den spezifischen Wärmebedarf sowie den spezifischen Emissionen an Kohlenstoffdioxid jeweils bezogen auf ein Kilogramm gewaschenem Textil 97

Tabelle 11: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Werte für Artikel aus 11 % Elastan und 89 % Polyester zu Beginn der Untersuchungen und Optimierung des Waschprozesses sowie zum Abschluss der Optimierung des Waschprozesses nach dem letzten Umbau sowie der Veränderung für die Restauflagen nach dem Waschprozess, die Reduzierung der Auflagen ausgehend von der trockenen Ware vor dem Waschprozess im Vergleich zur trockenen Ware nach dem Waschprozess, der Reduzierung des chemischen Sauerstoffbedarfs und der elektrischen Leitfähigkeit ausgehend jeweils vom Imprägnierabteil/ Vornetzbecken im Vergleich zum Abwasser aus dem Foulard sowie den spezifischen Wasserverbrauch, den spezifischen Wärmebedarf sowie den spezifischen Emissionen an Kohlenstoffdioxid jeweils bezogen auf ein Kilogramm gewaschenem Textil 97

Tabelle 12: Einfluss der Drehrichtung der Rasterwalze und der Gummiwalze sowie des Abstandes zwischen beiden Walzen auf den Flottenauftrag auf das Textil bei den Versuchsanordnungen 1 und 2 bei einem Abstand der Rasterwalze zur Ware von 0,05 mm resp. 0,08 mm 99

Tabelle 13: Einfluss der Drehrichtung der Rasterwalze und der Gummiwalze sowie der Warengeschwindigkeit auf den Flottenauftrag (FA) mit einem Flammschutzmittel auf eine Wirkware aus 100 % Polyester bei der Versuchsanordnung 5 100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 14: Einfluss der Geschwindigkeit der Rasterwalze und der Flächenmasse des Textils auf den Flottenauftrag (FA) auf Wirkwaren aus 100 % Polyester bei der Versuchsanordnung 7 bei der sich sowohl die Rasterwalze als auch die Gummiwalze mit der Warenrichtung drehen und das Textil mit einer Geschwindigkeit von 8,4 m/min in den abschließenden Foulard gezogen wird; alle Werte der Flottenaufnahme sind Mittelwerte aus mindestens 10 Einzelversuchen.....	101
Tabelle 15: Einfluss der Rakel auf den Flottenauftrag (angegeben in Gewichtsprozent bezogen auf das Trockengewicht des Textils) eines Gewebes aus 100 % Polyester mit einer Flächenmasse von 147 g/m ² ausgerüstet bei einer Warengeschwindigkeit von 12 m/min, stehender Gummiwalze und sich mit der Ware drehender Rasterwalze mit einer Ausrüstungsflotte aus 500 g/L Kantenleim	103
Tabelle 16: Einfluss der Drehgeschwindigkeit der Rasterwalze und der Art der Ausrüstungsflotte auf den Flottenauftrag (angegeben in Gewichtsprozent bezogen auf das Trockengewicht des Textils) für ein Gewebe aus 100 % Polyester mit einer Flächenmasse von 147 g/m ² bei einer Warengeschwindigkeit von 12 m/min, stehender Gummiwalze und sich mit der Ware drehender Rasterwalze	103
Tabelle 17: Vergleich der Flottenaufnahme (angegeben in Gewichtsprozent bezogen auf das Trockengewicht des Textils) des „trocken-in-nass“- und des „nass-in-nass“-Verfahren für eine Maschenware aus 100 % Baumwolle mit einer Flächenmasse von 183 g/m ² bei einer Warengeschwindigkeit von 12 m/min, stehender Gummiwalze und sich mit der Ware drehender Rasterwalze mit unterschiedlichen Ausrüstungsflotten.....	105
Tabelle 18: Beispielhafte Berechnung der jährlichen Kosten- und CO ₂ -Einsparungen durch die Optimierung des Waschprozesses für Textilien aus 11 % Elastan und 89 % Polyester durch Reduzierung des Wasser-, Waschmittel- und Energieverbrauchs ohne Berücksichtigung des erhöhten Energieverbrauchs durch zusätzliche Vakuumsaugen und Pumpen	107
Tabelle 19: Vergleich des in Tabelle 16 (Seite 100) dargestellten Appretur- und Trocknungsprozesse mittels des neu entwickelten Minimalauftragsverfahrens mit einem Appretur- und Trocknungsprozesse mittels eines herkömmlichen Foulardauftrags hinsichtlich des Chemikalienverbrauchs, der benötigten Trocknungsenergie und der CO ₂ -Emissionen sowie der Kosten für Erdgas und Frischwasser	108
Tabelle 20: Vergleich des in Tabelle 16 (Seite 100) dargestellten Appretur- und Trocknungsprozesses einerseits mittels eines herkömmlichen Foulardauftrags und andererseits mittels des neu entwickelten Minimalauftragsverfahrens hinsichtlich der bei jedem Appreturwechsel durch die Reinigung entstehenden Restappreturflotte, des Reinigungswasserverbrauchs, des anfallenden Abwassers und Abfalls sowie der dadurch verursachten Kosten.....	109

Tabelle 21: Gegenüberstellung der Flottenaufnahme (FA), der Aufnahme an Feststoffen (AF) sowie der aufgenommenen Masse des Katalysators Titandioxid sowohl absolut als auch pro Flächeneinheit für das Textil 4 und das feingarnige Textil 9 ausgerüstet mit der Textilbeschichtung TA 2246 unverdünnt und im Verhältnis 1:1 mit Wasser verdünnt sowie mit der Fassadenfarbe Photosan in den Verdünnungen 1:1, 1:2 und 1:4 aus einem Ausrüstungsversuch im Labor des beteiligten Textilveredlungsunternehmens..... 111

Tabelle 22: Gegenüberstellung der extrapolierten Luftdurchlässigkeit bei Differenzdrücken von 100 Pa und 200 Pa sowie des Staudrucks bei Volumenströmen von 2,4 m³/h, 2,8 m³/h und 3,4 m³/h für das Textil 4 und das feingarnige Textil 9 unausgerüstet sowie ausgerüstet mit der Fassadenfarbe Photosan und der Textilbeschichtung TA 2246 unverdünnt sowie in unterschiedlichen Verdünnungen 113

Tabelle 23: Gegenüberstellung des anzahlbezogenen Gesamtabscheidegrades *E0* und des massebezogenen Gesamtabscheidegrades *E3* für das Textil 4 und das feingarnigen Textil 9 unausgerüstet sowie ausgerüstet mit der Fassadenfarbe Photosan, der Textilbeschichtung TA 2246 und der Beschichtung S5-300B für technische Anwendungen unverdünnt (pur) sowie in den Verdünnungen 1:1, 1:2 und 1:4 114

Tabelle 24: Gegenüberstellung der photokatalytischen Depositionsgeschwindigkeit v_{photo} von Stickstoffmonoxid ($v_{photo}(NO)$) und Stickstoffdioxid ($v_{photo}(NO_2)$) für das Textil 4 mit einer Flächenmasse von 150 g/m² unausgerüstet sowie ausgerüstet mit der Fassadenfarbe Photosan, der Textilbeschichtung TA 2246 und der Beschichtung für technische Anwendungen S5-300 B unverdünnt sowie in unterschiedlichen Verdünnungen..... 116

Tabelle 25: Übersicht über die prozessspezifischen Kenngrößen für Waschprozesse sowie für Appretur- und Trocknungsprozesse..... 129

Tabelle 26: Übersicht der wichtigsten spezifischen Indikatoren 131

Tabelle 27: Übersicht der Indikatoren für die planetaren Grenzen nach [41] 132

Tabelle 28: Übersicht der am häufigsten angewendeten Wirkungskategorien der Ökobilanz nach [35]..... 132

Tabelle 29: Beispielhafte Übersicht über die in Indikatoren überführten Kenngrößen und die Zuordnung der ökologischen Indikatoren zu den planetaren Grenzen sowie zu den Wirkungskategorien der Ökobilanz für einen Waschprozess; Tabelle 26, Tabelle 27 und Tabelle 28 erläutern die verwendeten römischen Zahlen sowie die Groß- und Kleinbuchstaben 133

Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis

<i>AbwV</i>	Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasser verordnung)
<i>Angora</i>	Wolle vom Angorakaninchen, mit besonderer Glätte, Feinheit und dem niedrigsten Gewicht aller Naturfasern
<i>BSB₅</i>	Biologischer Sauerstoffbedarf , Menge an Sauerstoff, die zum biotischen Abbau im Wasser vorhandener organischer Stoffe innerhalb von fünf Tagen, benötigt wird
<i>C2C</i>	Cradle-to-cradle (deutsch: von der Wiege zur Wiege)
<i>CHF₃</i>	Trifluormethan, auch als Fluoroform bezeichnet
<i>Celluloseacetat</i>	Synthesefaser, zur Herstellung von Kunstseide, ist knitterarm, Pflege-leicht und weich wie Naturseide
<i>CLP</i>	Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (CLP-Verordnung)
<i>CSB-Wert</i>	Chemischer Sauerstoffbedarf , Menge an Sauerstoff an, die zur Oxidation organischer Stoffe benötigt würde, wenn Sauerstoff das Oxidationsmittel wäre; der CSB nach dem Passieren eines Klärwerks wird als <i>refraktärer CSB</i> bezeichnet
<i>CV</i>	Viskose, Faser aus 100 % Cellulose mit Holz als nachwachsendem Rohstoff
<i>DIN</i>	Deutsches Institut für Normung
<i>DOC</i>	Dissolved organic carbon (deutsch: gelösten organischen Kohlenstoff)
<i>EC₅₀</i>	Effective concentration (deutsch: effektive Konzentration); Konzentration eines Stoffes, die bei 50 % einer Versuchspopulation innerhalb einer bestimmten Zeit eine andere definierte Wirkung als den Tod auslöst (für Letalität siehe <i>LC₅₀</i>)
<i>EFA</i>	Effizienzagentur NRW
<i>EG</i>	Europäische Gemeinschaft
<i>EL</i>	Elastan , eine Synthesefaser aus Polyurethan, die sich unter Spannung auf das sechs- bis achtfache ihrer Ausgangslänge dehnen lässt. Markennamen vergleichbaren Fasern sind Dorlastan und Creora. In dieser Arbeit wird die Bezeichnung Elastan als Synonym für alle hochelastischen Synthesefasern verwendet.

<i>EN</i>	Europäische Norm
<i>FA</i>	Flottenaufnahme , Menge der von einem Textil aufgenommenen Feuchtigkeitsmenge bezogen auf das eigene Trockengewicht, Berechnung nach Gleichung 3-1
<i>FSC</i>	Forest Stewardship Council , Organisation zur Zertifizierung nachhaltiger Forstwirtschaft
<i>GEMIS</i>	Globales Emissions-Modell integrierter Systeme , ein vom Öko-Institut entwickeltes, ein frei verfügbares Computermodell mit integrierter Datenbank zur Lebensweg- und Ökobilanzierung für Energie-, Stoff- und Verkehrssysteme
<i>GHS</i>	Globally Harmonized System , deutsch: global harmonisiertes System zur Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von von Stoffen und Gemischen, in der Europäischen Union geregelt durch die CLP-Verordnung
<i>GOTS</i>	Global Organic Textile Standard , Siegel für nachhaltig produzierte Textilien
<i>H-Sätze</i>	Hazardous-Statements,
<i>ILO</i>	International Labour Organisation (deutsch: Internationale Arbeitsorganisation)
<i>ISO</i>	International Standardisation Organisation
<i>IZÜV</i>	Verordnung zur Regelung des Verfahrens bei Zulassung und Überwachung industrieller Abwasserbehandlungsanlagen und Gewässerbenutzungen (Industriekläranlagen-Zulassungs- und Überwachungsverordnung)
<i>LC₅₀</i>	Lethal concentration (deutsch: lehtale Konzentration); Konzentration eines Stoffes, die bei 50 % einer Versuchspopulation innerhalb einer bestimmten Zeit den Tod auslöst (für nichttödliche Effekte siehe <i>EC₅₀</i>)
<i>LCA</i>	Life Cycle Assessment , (Ökobilanz), Methode zur Lebenszyklusbasierten Analyse der ökologischen Auswirkungen eines Produktes oder einer Dienstleistung
<i>LWG NRW</i>	Wassergesetzes für das Land Nordrhein-Westfalen (Landeswassergesetz)
<i>MEG</i>	Monoethylenglykol
<i>Micro-Faser</i>	Fasern mit einem Titer von 1 dtex (1 g/10.000 m) bis 0,1 dtex (1 g/100.000 m)
<i>Modal</i>	Faser aus 100 % Cellulose mit Holz als nachwachsendem Rohstoff
<i>PA</i>	Polyamid(faser) , sehr reißfeste, gut färbbare Synthefasern mit Einsatzgebieten für Teppiche, Wetterschutzkleidung, Sportbekleidung und technische Textilien

Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis

<i>PEFC</i>	Programme for the E ndorsement of F orest C ertification Schemes, Standard für nachhaltige Waldbewirtschaftung
<i>PES</i>	P oly e ster(faser), sehr reißfeste, elastische, sehr lichtbeständige Synthefasern mit sehr geringer Wasserausnahme
<i>PIUS</i>	P roduktions i ntegrierter U mweltschutz
<i>PNEC</i>	P redicted N o E ffect C oncentration, Konzentration eines in der Regel umweltgefährlichen Stoffes, bis zu der sich keine Auswirkungen auf die Umwelt zeigen
<i>POP</i>	p ersistent o rganic p ollutants (deutsch: persistente organische Schadstoffe)
<i>R-Sätze</i>	Risikosätze
<i>REACH</i>	R egistration, E valuation, A uthorisation and R estriction of C hemicals , deutsch: Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe, geregelt in der sogenannten REACH-Verordnung
<i>SDG</i>	S ustainable D evelopment G oals, Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen
<i>SINa</i>	System von I ndikatoren zur N achhaltigkeitsentwicklung
<i>TiO₂</i>	Titandioxid
<i>Titer</i>	Garnfeinheit, gemessen nach DIN 60905-1:1985 <i>Tex-System - Grundlagen</i> im tex: 1 tex = 1 g/1000 m
<i>UV</i>	Ultraviolette Strahlung, im Wellenlängenbereich von 100 nm bis 400 nm
<i>VAwS</i>	V erordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
<i>VDI</i>	V erein D eutscher I ngenieure
<i>WA</i>	W asch a bteil
<i>WHG</i>	Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (W asser h aushalt s gesetz)

Formelzeichenverzeichnis

Lateinische Formelzeichen

A_p	m^2	Projektionsfläche
A_S	m^2	Oberfläche Stahl
A_T	m^2	Fläche eines Textils
c		Konzentration oder Wärmekapazität
c_0	ppb	Konzentration am Reaktoreingang
c_S	$J/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität von Stahl
c_T	$J/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität eines Textils
c_t	ppb	Konzentration am Reaktorausgang
c_W	$J/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität von Wasser
E_0	-	anzahlbezogener Gesamtabscheidegrad
E_3	-	massebezogener Gesamtabscheidegrad
e_{cb}^-	-	Valenzelektronen im Leitungsband (conduction band)
FA	Gew.-%	Flottenaufnahme
F_E	-	Energieumrechnungsfaktor
F_m	-	Massenumrechnungsfaktor
F_t	-	Zeitumrechnungsfaktor
F_W	-	Verdünnungsfaktor
F_{TiO_2}	-	Anteil des Titandioxids an einer Dispersion
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
h_{vb}^+	-	positives Loch im Valenzband (valence band)
I	$W/(s \cdot r^2)$	Intensität des gestreuten Lichts
I_0	$W/(s \cdot r^2)$	Intensität des einfallenden Lichts
J_{gesamt}	m^3/s	Gasfluss
k_{NO}	m/s	Geschwindigkeitskonstante für Stickstoffmonoxid
k_{NO_2}	m/s	Geschwindigkeitskonstante für Stickstoffdioxid
M	kg/mol	molare Masse
m_a	kg	Masse des ausgerüsteten Textils

Formelzeichenverzeichnis

$m_{T,A}$	kg/m ²	Flächenmasse des trockenen, nicht ausgerüsteten Textils
m_r	kg	Masse des nicht ausgerüsteten Textils (Rohware)
m_S	kg	Masse Stahl
m_t	kg	Masse des ausgerüsteten Textils vor der Trocknung
m_{TiO_2}	kg	Masse an Titandioxid auf einer Textilprobe
$m_{TiO_2,A}$	kg/m ²	Masse an Titandioxid auf einer Textilprobe pro Fläche
\dot{m}_{BS}	kg/min	Massenstrom an Begleitstoffen
\dot{m}_{chem}	kg/L	Stofffracht im Abwasser
\dot{m}_T	kg/min	Textilmassenstrom
\dot{m}_{WHM}	kg/min	Massenstrom an Waschhilfsmittel
n	-	Brechungsindex des Partikelmaterials
\dot{Q}_{Ges}	kJ/min	Gesamtwärmestrom
\dot{Q}_l	kJ/min	Teilwärmestrom
R	J/(mol*K)	Allgemeine Gaskonstante
S	m ²	Oberfläche
SA	kg/m ²	Aufnahme an Feststoffen
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
$T(x)$	-	Fraktionsabscheidegrad
V	m ³	Volumen
V_{FW}	m ³	Füllvolumen
\dot{V}_W	m ³ /min	Wasservolumenstrom
\bar{v}	m/s	mittlere Molekülgeschwindigkeit
v_{photo}	m/s	photokatalytische Depositionsgeschwindigkeit
w_s	m/s	Sinkgeschwindigkeit
W_{spez}	kWh _{el} /kg	Spezifischer Verbrauch elektrischer Strom (el. Arbeit)
$WV_{spez.}$	m ³ /kg	spezifischer Wasserverbrauch
WWG	%	Waschwirkungsgrad
x_{ae}	m	aerodynamischen Äquivalentdurchmesser
x_p	m	Projektionsflächen-Äquivalentdurchmesser

x_S	m	Oberflächen-Äquivalentdurchmesser
x_{St}	m	Stokes-Durchmesser
x_V	m	Volumen-Äquivalentdurchmesser

Griechische Formelzeichen

α	$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{h})$	Wärmeabstrahlungskoeffizient
γ	-	Uptake-Koeffizienten
Δ	-	Differenz
η	-	Wirkungsgrad
Θ	-	Streuwinkel
λ	m	Lichtwellenlänge
μ	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$	dynamische Viskosität des Fluids
π	-	Kreiszahl
ρ	kg/m^3	Dichte
Φ	°	Polarisationswinkel