Bahmann & Schmonsees GbR

Arbeitsgemeinschaft für
Umwelt-Meteorologie
und Luftreinhaltung

Dipl.-Met. Wolfram Bahmann
von der IHK Aachen öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Ausbreitung von Luftbeimengungen

Dipl.-Met. Nicole Schmonsees
von der IHK Flensburg öffentlich bestellte und vereidigte Sachverständige für Luftreinhaltung (Ausbreitung von Luftbeimengungen) und Mikroklima

in Kooperation mit

Dipl. Met. Georg Ludes
Ingenieurbüro für Numerische Simulation

Modellierung der Verschattungseffekte durch sichtbare Schwaden und Bauwerke im Zusammenhang mit der Errichtung eines neuen Braunkohlenkraftwerks am Standort Niederaußem

Hinweis: Das nachfolgende Gutachten wird wortgleich sowohl im Flächennutzungsplan-Änderungsverfahren als auch im parallel durchgeführten Bebauungsplanverfahren verwendet.

Proj. W0510/09/14

06.08.2013

ArguMet - Büro West • Dipl.-Met. Wolfram Bahmann
Tacitusweg 12 • 50321 Brühl • Tel. 02232 209 114 • Fax 02232 209 123 • eMail west@argumet.de
ArguMet - Büro Nord • Dipl.-Met. Nicole Schmonsees
Dorfstr. 5d • 24857 Borgwedel • Tel. 04621-360431 • Fax 04621-934705 • eMail nord@argumet.de

www.argumet.de

Titel	:	**Modellierung der Verschattungseffekte durch sichtbare Schwaden und Bauwerke im Zusammenhang mit der Errichtung eines neuen Braunkohlenkraftwerks am Standort Niederaußem**
Auftraggeber	:	RWE Power AG Stüttgenweg 2 50935 Köln
Auftragnehmer	:	argumet Arbeitsgemeinschaft für Umweltmeteorologie und Luftreinhaltung Bahmann & Schmonsees GbR - Büro West Tacitusweg 12 50321 Brühl und Kooperationspartner: **simuPLAN** Ingenieurbüro für numerische Simulation Heroldstr. 26 46284 Dorsten
Bearbeiter	:	Dipl.-Met. Wolfram Bahmann Dipl.-Met. Georg Ludes
Projekt-Nr.	:	W0510/09/14
Stand	:	06.08.2013
Seitenzahl	:	27

Inhalt

1 Einleitung 4
Kühlturmarten 4
Naturzug-Nasskühlturm 4
Hybridkühlturm 6
Schwadenarten 7
2 Aufgabenstellung 9
3 Untersuchte Fälle 9
4 Vorgehensweise 12
5 Aufbereitung und Darstellung der Ergebnisse 16
6 Ergebnisse 17
7 Zusammenfassung der Ergebnisse 20
8 Literatur, Daten 21

Anhang 1: Eingangsdaten Kühlturme und Schornsteine 22
Anhang 2: Untersuchungszeitraum 24
Anhang 3: Methodik / Berechnungsverfahren 25

1 Einleitung

Kühlturmarten

Vor den Details zur Schwadenbildung werden zunächst die für dieses Gutachten maßgeblichen Kühlturmarten bezüglich ihres Aufbaues und ihrer Funktionsweise erläutert sowie bezüglich der sich ergebenden Schwaden beschrieben und verglichen.

Naturzug-Nasskühlturm

Aufbau

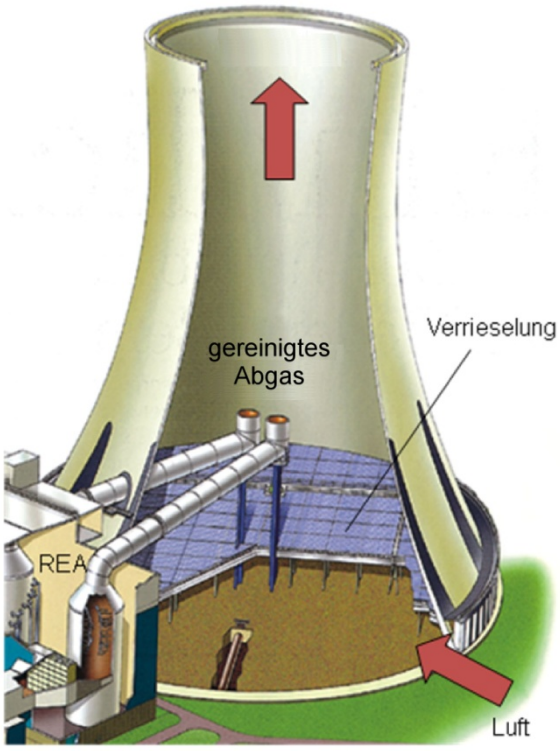


Bild 1: Aufbau eines Naturzug-Nasskühlturms (Quelle: RWE Power)

Der Naturzug-Nasskühlturm ist im Prinzip ein Hohlzylinder mit offenen Enden, der am unteren Rand genügend weit entfernt von der Bodenfläche (der Kühlturmtasse) auf Stützen aufgestellt wird. Im unteren Teil befinden sich Verteilerrohre und Düsen zur Verrieselung des Kühlwassers. Das verrieselte Kühlwasser verdunstet zum Teil und erwärmt Luft, die sich ausdehnt und aufgrund der geringeren Dichte zusammen mit dem Wasserdampf nach oben strömt (Kamineffekt). Dabei wird vom unteren Rand neue Kühlluft aus der Umgebung nachgezogen (Naturzug). Unter-

halb der Einbauten zur Verrieselung regnet das Kühlwasser in die Kühlturmtasse ab. Oberhalb der Verrieselung befinden sich sogenannte Tropfenabscheider, an denen von der Kühlluft mitgerissene Tropfen weitestgehend abgeschieden und damit Kühlwasserverlust vermieden werden. Der übrige Teil des Naturzug-Nasskühlturms ist leer und dient allein der Erzeugung eines Naturzugs (natürlicher Auftrieb). Bei vielen Kraftwerken mit Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) wird das gereinigte Rauchgas als Abgas in den Naturzug-Nasskühlturm eingeleitet. Hierdurch kann auf einen separaten Schornstein verzichtet werden. Der Einfluss der in den Kühlturm eingeleiteten Abgase auf Volumen, Aufstiegshöhe und Länge des Schwaden wird bei den Berechungen berücksichtigt.

Funktionsweise

Im Naturzug-Nasskühlturm wird die Kühlluft durch die Verdunstung eines Teils des Kühlwassers befeuchtet. Zusätzlich wird das Kühlwasser durch den direkten Kontakt mit der Luft gekühlt und die Luft dabei erwärmt. Die Befeuchtung und Erwärmung der Luft führen zu einer Abnahme der Dichte und damit zu einer Zunahme des Auftriebs der Luft. Oberhalb des Kühlturmes wird der Schwaden sichtbar, da ein Teil des Wasserdampfes durch den Kontakt mit der kälteren Umgebungsluft zu kleinsten Tropfen kondensiert. Etwa 1,5 bis 2,5 % des umlaufenden Kühlwassers verdunsten dabei und müssen laufend ergänzt werden.

Schwaden

Der Naturzug-Nasskühlturm emittiert sichtbare Schwaden, deren Volumen, Aufstiegshöhe und Länge von den meteorologischen Umgebungsbedingungen bestimmt werden. Der im Schwaden enthaltene Wasserdampf vermischt sich mit der Umgebungsluft. Die im sichtbaren Schwaden enthaltenen Tröpfchen trocknen entlang des Schwadenweges ab. Hierdurch löst sich der sichtbare Schwaden - in Abhängigkeit von den meteorologischen Umgebungsbedingungen – kraftwerksnäher oder kraftwerksferner auf und ist nicht mehr sichtbar. In größerer Entfernung vom Kühlturm sind sogenannte Sekundärschwaden möglich. Die Entstehung dieser Schwadenart wird im nächsten Kapitel beschrieben.

Der Hybridkühlturm ist baulich deutlich niedriger als ein Naturzug-Nasskühlturm gleicher Kühlleistung, da der Luftzug im Wesentlichen mit Ventilatoren erzeugt wird. Zusätzlich besitzt der Hybridkühlturm Wärmetauscher, wodurch im Normalbetrieb die Abwärme zusätzlich konvektiv ohne Wasserverdunstung an einen Teil der Kühlluft abgeführt wird.

Hybridkühlturm

Aufbau

Bild 2: Prinzipielle Darstellung des Aufbaus eines Hybridkühlturms (Quelle: http://www.strom-online.ch/hybridkuehlturm.html)

Auch der Hybridkühlturm ist ein Hohlzylinder mit offenen Enden, der vertikal und am unteren Rand genügend weit entfernt von der Bodenfläche (der Kühlturmtasse) auf Stützen aufgestellt wird. Auch bei ihm befinden sich im unteren Teil Verteilerrohre und Düsen zum Versprühen des Kühlwassers (Sprühebene). Das eingesprühte Kühlwasser verdunstet zum Teil, kühlt ab und erwärmt die Luft, die sich ausdehnt und zusammen mit dem Wasserdampf nach oben strömt. Die Kühlluft wird mittels Ventilatoren aus der Umgebung angesaugt und zu einem Teil in die Wärmetauscher und zu einem anderen Teil in die Sprühebene gefördert. Unterhalb der Sprühebene befinden sich Einbauten zur Verrieselung, von denen das gekühlte Wasser in die Kühlturmtasse abregnet. Oberhalb der Sprühebene befinden sich sogenannte Tropfenabscheider, an denen von der Kühlluft mitgerissene Tropfen weitestgehend abgeschieden und damit unnötiger Kühlwasserverlust vermieden werden. Der übrige Teil des Hybridkühlturms ist leer.

Funktionsweise

Hybridkühlung vereinigt die technisch-physikalischen Vorteile von Trockenkühlung (keine Wasserverdunstung) und Nasskühlung (hohe Kühlleistung, besserer Wirkungsgrad) bei verringertem Wasserverbrauch. Gegenüber der Nasskühlung reduziert dieses Verfahren jedoch wegen des

Leistungsbedarfes für die elektrisch angetriebenen Ventilatoren den Wirkungsgrad der Gesamtanlage. Beim Hybridkühlturm wird den Schwaden des Nassteils vor dem Verlassen in die Atmosphäre ein warmer, in den Wärmetauschern des Trockenteils erzeugter Luftstrom beigemischt. Dadurch bleibt der Mischschwaden - zumindest bei Betriebsbedingungen unterhalb der Grenzlinie (Bild 4) – untersättigt, wodurch die Bildung feinster Wassertröpfchen vermieden wird. Der Schwaden des Hybridkühlturms ist daher in der Regel nicht sichtbar.

Schwaden

Hybridkühltürme emittieren überwiegend nicht sichtbare Schwaden, deren Volumen, Aufstiegshöhe und Länge von den meteorologischen Umgebungsbedingungen bestimmt werden. Der im untersättigten Schwaden enthaltene Wasserdampf vermischt sich mit der Umgebungsluft und bleibt so entlang seines Ausbreitungsweges nicht sichtbar. Erst wenn die Außenluft nur noch wenig Wasserdampf aufnehmen kann, also bei geringeren Außentemperaturen und / oder größerer Luftfeuchte, gelingt es nicht mehr, sichtbare Schwaden zu vermeiden. Darüber hinaus sind in größerer Entfernung sogenannte Sekundärschwaden möglich. Die Entstehung dieser Schwadenart wird im nächsten Kapitel beschrieben.

Schwadenarten

Folgende Schwadenarten lassen sich unterscheiden:

- **Nicht sichtbare Wasserdampfschwaden**
  Jede Art von Wasserdampfemission führt zu einer Art Schwaden, der solange unsichtbar bleibt, solange die Sättigung, d.h. das Aufnahmevermögen der Luft für gasförmiges Wasser, noch nicht erreicht ist.

- **Sichtbare Schwaden**
  Ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt, beginnt bei weiterer Zufuhr von Wasserdampf bzw. bei Abkühlung der Luft die Kondensation kleinster Tropfen (typischerweise mit einem Durchmesser von 2 bis 10 µm = tausendstel Millimeter), die aufgrund ihrer Anzahl je Volumen und ihren optischen Eigenschaften den Schwaden sichtbar machen.

- **Sekundärschwaden**
  Sekundärschwaden können bei geringem Wind über dem Kraftwerk oder maximal in wenigen Kilometern Entfernung und meist in größerer Höhe (einige hundert Meter über der Kühlturmmündung) auftreten. Auch wenn der Schwaden zunächst nicht sichtbar ist, entweder seit der Mündung oder nachdem er abgetrocknet ist, kann er je nach meteorologischen Umgebungs-

bedingungen in Bereiche gelangen, in denen kein Sättigungsdefizit vorhanden ist. Liegt dieser Bereich an der Grenze der Mischungsschicht (bis 1.500 m Höhe über Geländeoberkante), so kann die dort auftretende Kondensation und Tropfenbildung wolkenähnliche Strukturen bilden. Da der Strahlcharakter des Schwaden dann weitgehend abgeklungen ist, nennt man diese Ansammlung von Kondensationstropfen „Sekundärschwaden".

- **Abgasfahne des Schornsteins**
  Bei Kraftwerken mit Hybridkühltürmen muss das Abgas aus der Rauchgasentschwefelung über einen separaten Schornstein abgeleitet werden. Aufgrund der gegenüber Schwaden höheren Temperatur der Abgase können diese während der nassen Rauchgasentschwefelung (REA) mehr Wasserdampf aufnehmen. Bei einer Abgasableitung über einen Schornstein kondensiert der im Abgas enthaltene Wasserdampf schon in geringer Entfernung von der Schornsteinmündung aufgrund des Einmischens von kühler Umgebungsluft, d.h. die Abgasfahne wird durch die Kondensattropfen sichtbar.

- **Restbrüden**
  Eine weitere Wasserdampfquelle sind Restbrüden aus der Kohletrocknung, die über das Kesselhausdach abgeleitet werden. Diese Emission kann jedoch aufgrund der geringen Menge vernachlässigt werden.

Der aufgrund von kleinsten Tröpfchen sichtbare Schwaden löst sich in Abhängigkeit von den meteorologischen Bedingungen auf, d.h. er trocknet bei zunehmendem Sättigungsdefizit[1] wieder ab.

Die Untersuchung verschiedener Autoren auf Basis realer meteorologischer Vertikalprofile führt im Vergleich zu pauschalen Annahmen über den Aufbau und die Feuchteverteilung in der Atmosphäre zu realistischen Prognosen. Vor diesem Hintergrund sind die Umweltauswirkungen (Verschattungseffekte) von Hybridkühltürmen im Jahresmittel geringer, als in früheren Analysen[2] berichtet wurde.

[1] Das Sättigungsdefizit stellt ein relatives Maß für die Luftfeuchtigkeit dar. Dabei entspricht es dem Dampfdruck jener Gasmenge (Wasser gasf.), die die Luft bei einer bestimmten Temperatur noch aufnehmen kann bis sie gesättigt ist. Verschwindet das Sättigungsdefizit, ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt und Kondensation in Form feinster Tropfen tritt auf.

[2] Necker 2003 - Necker, J., Nebelschwaden von Hybridkühltürmen (Diss. Univ. Karlsruhe), Fortschr.-Ber. VDI Reihe 15 Nr. 248 106 S., 2003

2 Aufgabenstellung

Die zu erwartenden Auswirkungen nach Aufnahme des kommerziellen Betriebs des geplanten 1.100 MW Musterkraftwerks (siehe Begründung Bebauungsplan Nr. 261/Na) mit Hybridkühlturm am Standort Niederaußem auf die Sonnenscheindauer in der Umgebung sind unter Berücksichtigung der vorgesehenen Stilllegungen am Standort Niederaußem abzuschätzen und in ihrer örtlichen Ausprägung darzustellen.

Für eine Beurteilung der Veränderung der Sonnenscheinstunden gibt es keinen Bewertungsmaßstab und auch keine per Konvention festgesetzten Grenzwerte. Die natürliche Variation in Raum (geografische Lage) und Zeit (Jahressumme) liegt für die Anzahl der Sonnenscheinstunden im Bereich von 20%. Zusätzliche sichtbare Schwaden reduzieren die Anzahl der Sonnenscheinstunden örtlich je nach den Wetterbedingungen.

3 Untersuchte Fälle

Bei der Modellierung werden die Kühltürme und die größeren, für die Schattenbildung relevanten Bauwerke berücksichtigt (vgl. Bild 3).

Aufgrund der Vorgaben in Art. 33 der CCS-Richtlinie der EU wird im BPlan Nr. 261/Na auch den Platzbedürfnissen für eine gegebenenfalls später einzurichtende CO_2-Abscheidung vorsorglich Rechnung getragen. Für die Anlagenteile zur CO_2-Abscheidung und –Verdichtung ist eine Fläche entlang der Nord-Süd-Bahn und der B477 vorgesehen. Die Anlagenteile würden bei Verwirklichung der CCS-Anlage in geschlossenen Bauwerken von maximal 100 m Höhe untergebracht werden. Die Verschattungseffekte dieser Bauwerke würden sich im Wesentlichen auf das Werksgelände selbst sowie die unmittelbar benachbarten Freiflächen beschränken. Zudem würden diese Verschattungseffekte durch die anderen Bauwerksschatten überlagert. Daher ist hierfür keine weitere Berücksichtigung im Rahmen der Modellierung erfolgt.

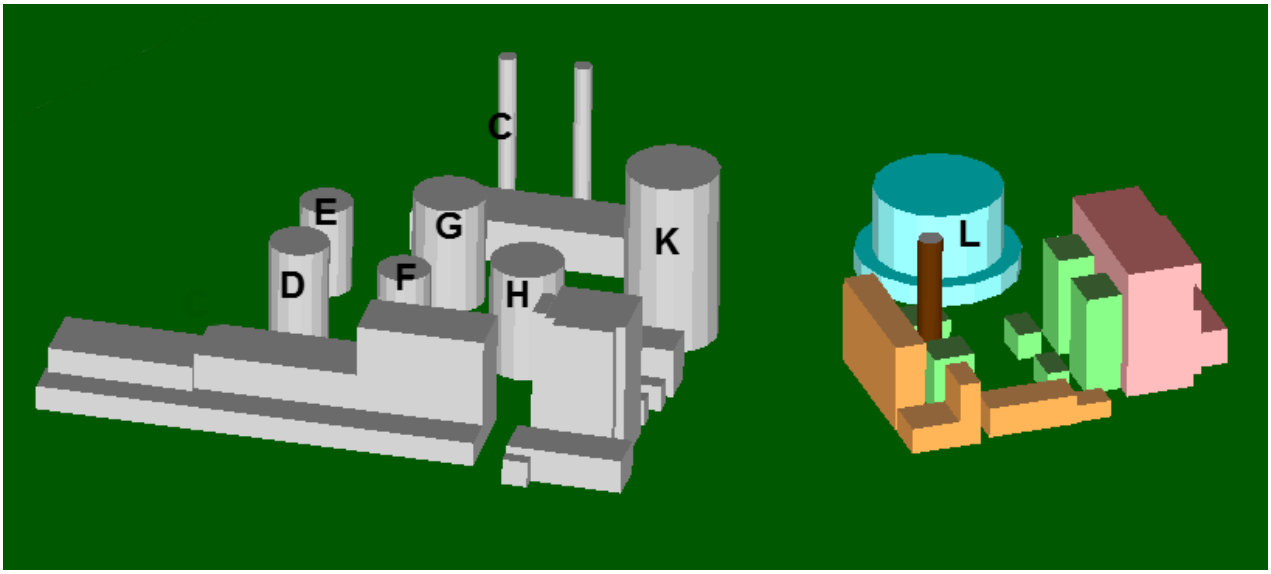


Bild 3: ***Schematisierte Darstellung der bei der Verschattungsberechnung berücksichtigten Bauwerke*** *(Hybridkühlturm hellblau; Block L= Musterkraftwerk BoAplus)*

Folgende Fälle werden für den Standort Niederaußem betrachtet (mit MW ist stets die elektrische Leistung gemeint):

Fall 1 = vor der Aufnahme des kommerziellen Betriebs des Musterkraftwerks BoAplus im Plangebiet

Niederaußem
2 x 150 MW Blöcke A, B endgültig stillgelegt (Bauwerke sind vorhanden)
4 x 300 MW Blöcke C, D, E, F einschließlich der Kühltürme in Betrieb
2 x 600 MW Blöcke G, H mit 2 Kühltürmen in Betrieb
1 x 950 MW BoA1 mit 1 Kühlturm in Betrieb

Neurath
3 x 300 MW mit 3 Kühltürmen in Betrieb
2 x 600 MW mit 2 Kühltürmen in Betrieb
2 x 1.100 MW mit 2 Kühltürmen in Betrieb (BoA2&3)

Fall 2 = nach der Aufnahme des kommerziellen Betriebs des Musterkraftwerks BoAplus im Plangebiet

Niederaußem
2 x 150 MW Blöcke A, B endgültig stillgelegt (Bauwerke sind vorhanden)
4 x 300 MW Blöcke C, D, E, F einschließlich der Kühltürme endgültig stillgelegt (Bauwerke sind vorhanden)
2 x 600 MW Blöcke G, H mit 2 Kühltürmen in Betrieb
1 x 950 MW BoA 1 mit 1 Kühlturm in Betrieb
1 x 1.100 MW Musterkraftwerk BoAplus mit 1 Hybridkühlturm in Betrieb

Neurath
3 x 300 MW mit 3 Kühltürmen in Betrieb
2 x 600 MW mit 2 Kühltürmen in Betrieb
2 x 1.100 MW mit 2 Kühltürmen in Betrieb (BoA2&3)

In beiden Fällen wird im Sinne eines konservativen Ansatzes ein ganzjähriger, durchgehender Volllastbetrieb angenommen; plan- und außerplanmäßige Stillstände sowie Teillastbetrieb werden nicht berücksichtigt. Weiterhin sind konservativer Weise vorgesehene Abrissmaßnahmen, welche ebenfalls zu Verringerungen der Verschattung führen, nicht berücksichtigt.

Die Daten für die Schwadenparameter sind in Anhang 1 in Abhängigkeit von der Temperatur aufgelistet. In Abhängigkeit von der Zeitreihe der meteorologischen Bedingungen wird die Schwadensimulation so realistisch abgebildet.

Das Kraftwerk Frimmersdorf wird in diesem Gutachten nicht berücksichtigt. In beiden Fällen (Fall 1 und Fall 2) sind in Frimmersdorf bereits alle 12 x 150 MW-Blöcke endgültig stillgelegt. Die beiden 300 MW-Blöcke in Frimmersdorf werden nach der Stilllegung der 150 MW-Blöcke weiter betrieben. Der Beitrag dieser Blöcke zu der Verschattungssituation im Bereich des Kraftwerks Niederaußem ist jedoch aufgrund der Entfernung sowie der Schwadenausbreitung unerheblich und wird deshalb nicht berücksichtigt.

4 Vorgehensweise

Die Dimensionen (Höhe über Erdboden, Durchmesser, Länge) und die Richtung von Schwaden sind von den atmosphärischen Bedingungen abhängig. Temperatur und Feuchte bestimmen das Sättigungsdefizit der Umgebungsluft. Ist dieses nicht Null, so trocknet ein Schwaden mit kondensierten Tröpfchen nach und nach ab und wird dann unsichtbar, d.h. er löst sich optisch auf. Die Windrichtung bestimmt, wohin sich die Achse des aufsteigenden Schwadens erstreckt und die Windgeschwindigkeit bestimmt, wie stark die Achse von der Senkrechten im Fall von kompletter Windstille abweicht, d.h. wie sehr die Schwadenachse schräg steht.

Das optische Gebilde „sichtbarer Wasserdampfschwaden“ wird als undurchsichtig angenommen, obwohl zumindest in den Randbereichen des Schwaden die Sonne sichtbar bleibt.

Jeder undurchsichtige Gegenstand wirft bei Sonnenschein einen Schatten. Unabhängig davon, ob die Sonne für einen Beobachter erkennbar bleibt, wird unterstellt, dass der sichtbare Schwaden den Blick auf die Sonne versperrt. Da die Sonne in Abhängigkeit von der Tages- und Jahreszeit wandert, verlagert sich auch der Schatten (im Bodenniveau).

Die Ausbildung der sichtbaren Schwaden und der Schattenwurf können mittels Computer-Programmen berechnet/modelliert werden. Hierbei werden alle meteorologischen, astronomischen und geometrischen Verhältnisse berücksichtigt.

Eingangsdaten hierfür sind die Lage der Schwadenquellen und die meteorologischen sowie astronomischen Daten. Die Emissionsdaten der Kühltürme und Schornsteine sind im Anhang 1 beschrieben. Die meteorologischen Daten wurden einer Datenbank des Deutschen Wetterdienstes für den dem Standort nächstliegenden Gitterpunkt entnommen [1], da kontinuierliche, zeitlich hoch aufgelöste Daten über den vertikalen Aufbau der Atmosphäre nur hier verfügbar sind.

Mit dem *SPLaSh* genannten Modellsystem ([3] und [4] sowie siehe Anhang 3) werden aufgrund der Stundenzeitreihe des Sonnenscheins im Umfeld des Standorts die Orte ermittelt, an denen die Sonne in Folge der sichtbaren Schwaden nicht direkt zu sehen ist. Da Daten am Standort nicht vorliegen, wird die Stundenzeitreihe der Sonnenscheindauer des Forschungszentrums Jülich [2] verwendet (vgl. auch Anhang 2). Führt man diese Berechnungen für ein ganzes Jahr durch, so lassen sich Karten erstellen, die eine zur Gesamtsonnenscheindauer relative Verminderung zeigen.

Diese Modell-Rechenläufe wurden für beide Fälle durchgeführt. Die Ergebnisse beider Fälle werden in eine Differenzdarstellung überführt, um aufzuzeigen, wo und in welchem Umfang Veränderungen auftreten. Die Berechnungen wurden für die Jahre im Zeitraum 2002 bis 2011 vorgenommen, da hierfür zeitlich hoch aufgelöste Vertikalprofile von Temperatur und Feuchte verfügbar sind. Aufgrund der Länge von 10 Jahren und der weniger als 10 Jahre zurück liegenden Er-

fassungszeit ist nach allgemeiner fachlicher Einschätzung eine zeitliche Repräsentanz und Aktualität des Datensatzes gegeben.
Während die bestehenden Naturzug-Nasskühltürme auch bei relativ trockener Außenluft an der Kühlturmmündung immer sichtbare Schwaden aufweisen, wird der Trocken- und Nassteil des Hybridkühlturms durch den Betrieb so eingestellt, dass an der Mündung und darüber hinaus überwiegend kein sichtbarer Schwaden auftritt.

Nicht sichtbare Schwaden sind vergleichbar mit lokal begrenzten Schwankungen der Luftfeuchte. Ihre Wirkung auf das einfallende Licht unterscheidet sich nicht von der feuchter aber wolkenfreier Luftmassen bei maritim geprägten Wetterlagen. Deshalb liegen hier keine relevanten Einflüsse vor.

Die Gesamtheit der Punkte in Bild 4 stellt alle für den Standort tagsüber anwendbaren Temperatur/Feuchte-Wertepaare im Zeitraum 2002 bis 2011 dar (Datenquelle [1]).

Die Häufigkeit eines sichtbaren Schwadens beim Hybridkühlturm ist durch die Grenzlinie gegeben, die im Werteraum Temperatur/relative Feuchte durch einen Farbwechsel von blau nach grau visualisiert wird. In der überwiegenden Zeit kann ein Betrieb unterhalb der Grenzlinie ohne sichtbaren Schwaden eingestellt werden.

Bezogen auf die Tageszeit kann durch den Hybrid-Betrieb über ein Jahr gesehen in mehr als 90% der Tagesstunden ein Betrieb ohne sichtbaren Schwaden eingestellt werden.

Wenn für den Hybridkühlturm die Parameter der Umgebungsluft im Bereich des nicht sichtbaren Schwadens liegen, kann der zunächst unsichtbare Schwaden im Verlauf des Aufsteigens bei Kondensation in der Höhe wieder sichtbar werden.

Sekundärschwaden werden nur für die schwadenfreien Bedingungen modelliert. Hier wird die Entwicklung eines wolkenähnlichen Sekundärschwadens im Kondensationsniveau angenommen, das aufgrund der atmosphärischen Daten bestimmt wird (vgl. auch Erläuterungen im Anhang 3). Die entstehenden Sekundärschwaden können so einige hundert Meter Durchmesser und Längen bis zu 2 oder 3 km aufweisen. Je nach Windgeschwindigkeit, d.h. Achsverlauf im Schwadenmodell, kann der Sekundärschwaden mehr horizontal oder vertikal ausgerichtet sein.

Insgesamt ist die Modellierung sowohl bei den sichtbaren Schwaden eines Naturzug-Nasskühlturms wie auch beim Hybridkühlturm konservativ, also tendenziell überschätzend, angelegt.

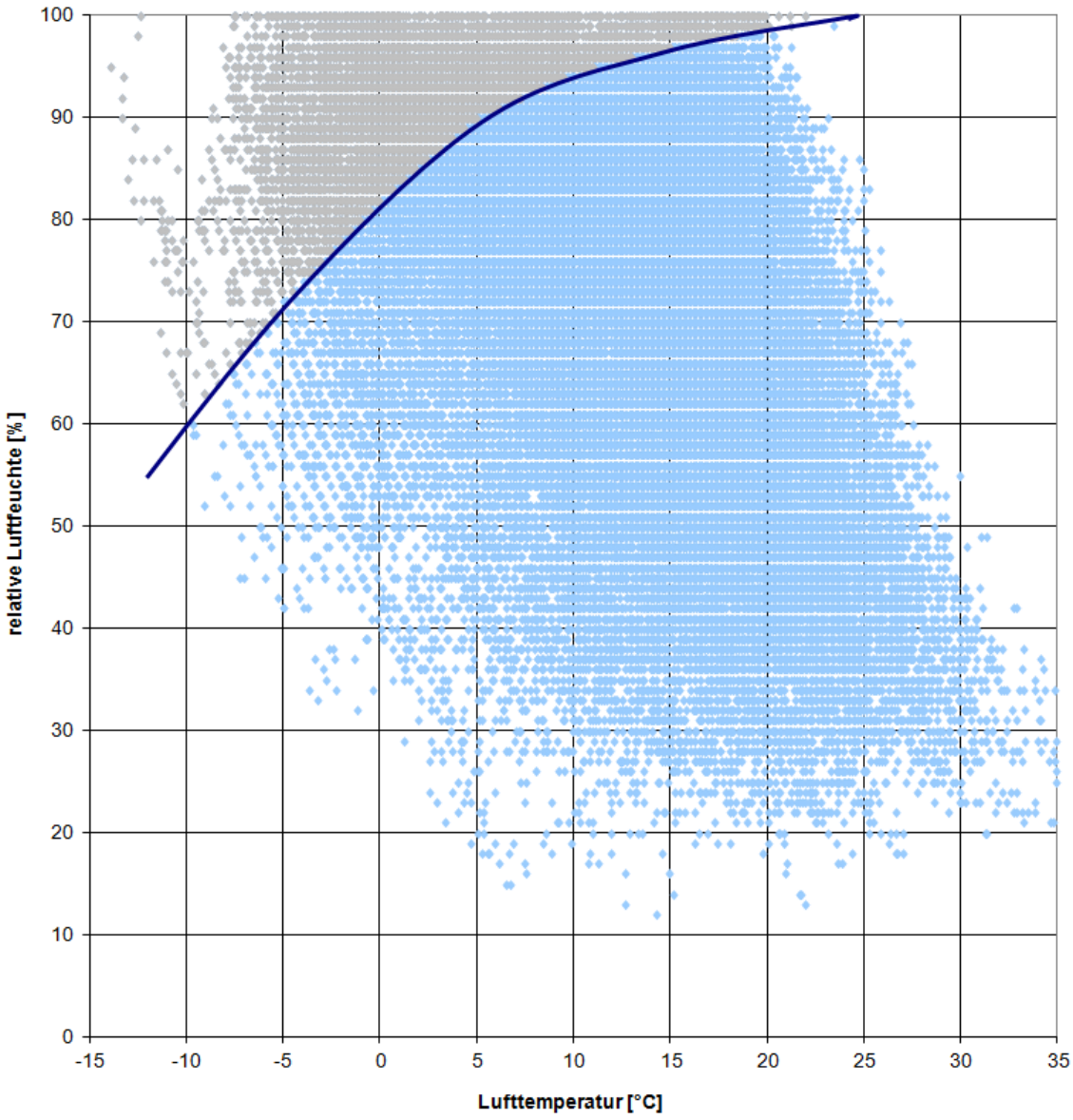


Bild 4: ***Werteraum aus Lufttemperatur und relative Luftfeuchte mit Grenzlinie der sichtbaren Schwaden für den Hybridkühlturm[3] (an der Mündung) (meteorologische Daten der Jahre 2002-2011)***

Hinweis: Das Diagramm erzeugt wegen Mehrfachbelegung von Punkten im Werteraum nicht den gleichen Eindruck, den eine statistische Auswertung ergibt. In die Berechnungen geht die vollständige Statistik ein.

[3] Grenzlinie bereitgestellt von Fa. HAMON Thermal, extrapoliert auf den kompletten Datenbereich

Nachtabschaltung des Hybridkühlturm-Trockenteils

Der Hybridkühlturm arbeitet tagsüber im Regelfall mit einer Kombination aus Nass- und Trockenkühlung. Der Trockenteil bewirkt, dass der im Nassteil entstehende Schwaden überwiegend nicht sichtbar wird. Der Nassteil alleine ist grundsätzlich so dimensioniert, dass der Hybridkühlturm auch ohne den Betrieb des Trockenteils über eine ausreichende Kühlleistung verfügt. Im Vergleich zum Tagbetrieb wird bei einer möglichen nächtlichen Abschaltung des Trockenteils zum Einen der Schwaden sichtbar und zum Anderen der Auftrieb des Schwaden leicht abgeschwächt. Die Ventilatoren des Nassteils, die neben dem Naturzug des Kühlturms den maßgeblichen Auftrieb des Schwaden erzeugen, bleiben jedoch auch bei Abschaltung des Trockenteils weiter in Betrieb. So ist auch nachts ein ausreichender Auftrieb des Schwaden sichergestellt. Eine nachtspezifische Neigung zu Nebelbildung, Eisglätte oder ähnlichen Effekten ist daher nicht zu erwarten. Diese und ähnliche Auswirkungen von Nasskühltürmen sind in einer VDI-Richlinie[4] beschrieben.

[4] VDI 3784 Blatt 1, Beurteilung von Kühlturmauswirkungen

5 Aufbereitung und Darstellung der Ergebnisse

1. Die Differenzkarte (Bild 5) stellt die durchschnittliche Veränderung der Sonnenscheindauer durch den Betrieb des Musterkraftwerks BoAplus mit Hybridkühlturm und Schornstein, einschließlich der Wirkung der Sekundärschwaden sowie der endgültigen Stilllegung der 4 x 300 MW-Blöcke und der dazu gehörenden Naturzug-Nasskühltürme gegenüber dem Ist-Zustand dar (Differenz zwischen Fall 1 und Fall 2, siehe Seite 10).

2. Die Verschattung durch sichtbare Schwaden aus den Kühltürmen (bei Hybridkühlturm einschließlich Sekundärschwaden), durch Abgase aus den Schornsteinen sowie durch die Kraftwerksbauwerke selbst wird auf die durchschnittliche Jahressumme der Sonnenscheinstunden im Zeitraum 2002-2011 bezogen.

3. Die berücksichtigten Bauwerke sind in der Ergebniskarte (Bild 5) als graue Rechtecke bzw. Kreise (für die Kühltürme) erkennbar. Bei den Berechnungen wurde auch die Verschattung durch die Baukörper der nach der Stilllegung nicht mehr in Betrieb befindlichen Kühltürme der vier 300 MW-Blöcke berücksichtigt. In Bild 3 sind diese Bauwerke aus der Vogelperspektive als Modellschema auf eine Landkarte platziert.

4. Die Beiträge der Anlagen des nordwestlich gelegenen Kraftwerks Neurath (bestehende Anlagen einschließlich BoA 2&3) sind rechnerisch berücksichtigt, im näheren Umfeld von Niederaußem aber faktisch vernachlässigbar. Beiträge der am Standort Frimmersdorf verbleibenden beiden 300 MW-Blöcke sind für den Betrachtungsbereich aufgrund der Entfernung sowie der Schwadenausbreitung unerheblich und daher nicht berücksichtigt.

6 Ergebnisse

Differenzkarte

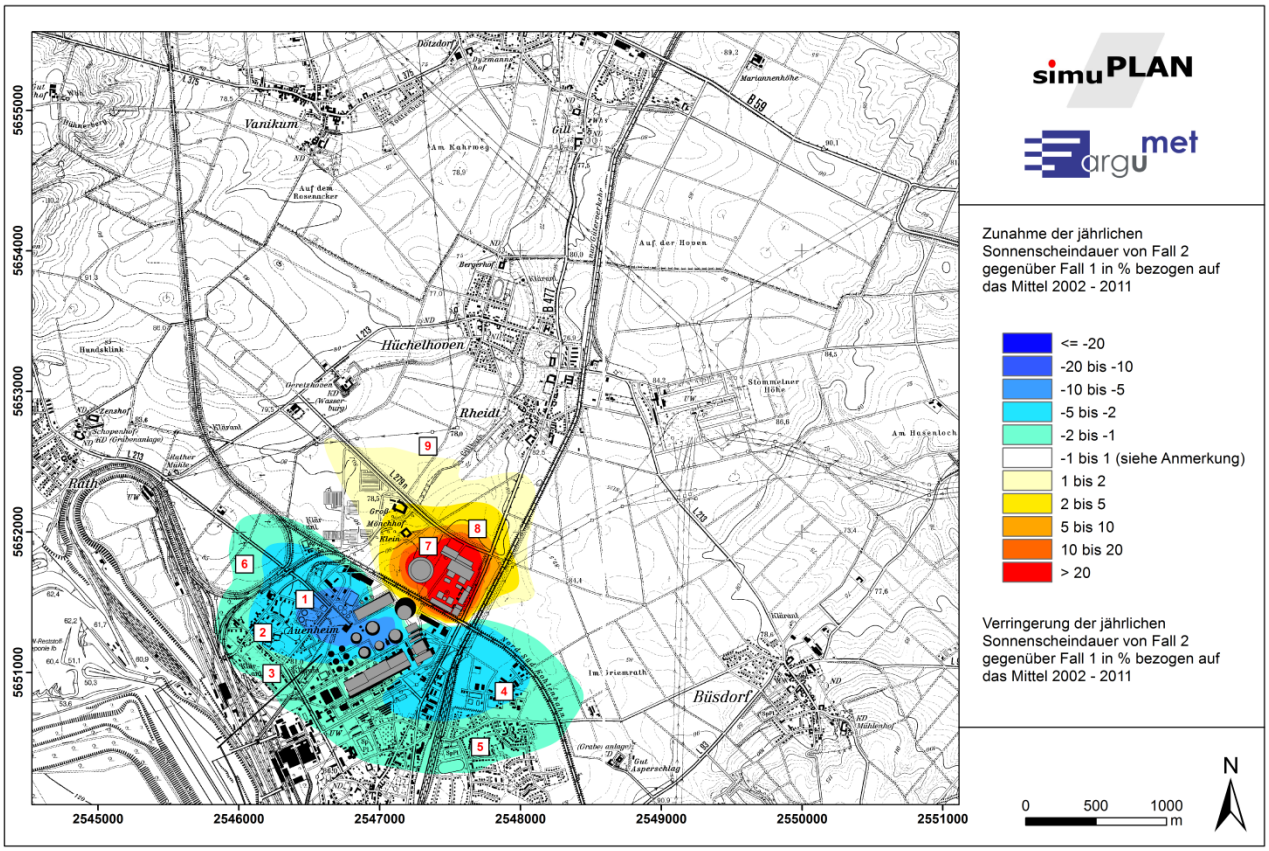


Bild 5: Durchschnittliche Veränderung der jährlichen Sonnenscheindauer bezogen auf die mittlere Sonnenscheindauer im Zeitraum 2002 bis 2011
Differenz aus Fall 1 minus Fall 2

Anmerkung: Eine Veränderung von weniger als 1% ist als im Allgemeinen nicht wahrnehmbar einzustufen. und wird deshalb nicht dargestellt. Selbst die Variation durch jahreszeitliche Änderung der Belaubung oder ein kleinräumiger Ortswechsel verursachen bereits größere Veränderungen.

Kernergebnisse

1. In den an das Kraftwerk Niederaußem angrenzenden Stadtteilen Niederaußem und Auenheim ergibt sich durch das Musterkraftwerk und der damit zusammenhängenden Stilllegung der 300-MW-Blöcke eine deutliche Verringerung der Verschattung.

2. In den Wohngebieten der anderen angrenzenden Stadtteile Rheidt, Hüchelhoven, Oberaußem sowie in Bedburg-Rath ist keine Verschlechterung zu erwarten. Gleiches gilt für weiter entfernt liegende Wohngebiete. Hier sind keine signifikanten Veränderungen der bisherigen Situation zu erwarten.

3. Im Bereich des Musterkraftwerks kommt es kraftwerksnah zu einer Zunahme der Verschattung. Hiervon sind primär das Sondergebiet Braunkohlenkraftwerk (Kraftwerksgelände) sowie unmittelbar benachbarte Ackerflächen betroffen.

4. Die Beiträge der Anlagen des nordwestlich gelegenen Kraftwerk-Standortes Neurath – bestehendes Kraftwerk einschließlich BoA 2&3 - sind rechnerisch berücksichtigt, aber im näheren Umfeld von Niederaußem vernachlässigbar. Beiträge der am Standort Frimmersdorf verbleibenden beiden 300 MW-Blöcke sind für den Betrachtungsbereich aufgrund der Entfernung sowie der Schwadenausbreitung unerheblich und daher nicht berücksichtigt.

Darstellung und Erläuterung der Auswirkung auf Einzelpunkte im Untersuchungsraum

Die in Bild 5 farblich dargestellten Flächen zeigen die Veränderungen nach Aufnahme des kommerziellen Betriebes des Braunkohlenkraftwerks sowie der endgültigen Stilllegung der 4 x 300-MW-Blöcke am Standort Niederaußem (Fall 2) im Vergleich zum Zeitpunkt vor Aufnahme des kommerziellen Betriebes des Braunkohlenkraftwerks (Fall 1).

Im Bereich der blau, türkis und grün dargestellten Flächen wird sich eine Verringerung der Verschattung und damit eine Erhöhung der jährlichen Sonnenscheinstunden ergeben.

Im Bereich der rot, orange und gelb dargestellten Flächen wird sich lokal begrenzt eine Zunahme der Verschattung und damit eine Reduzierung der jährlichen Sonnenscheinstunden ergeben.

Die in Bild 5 mit einem Rechteck (z.B. 2) dargestellten Punkte werden beispielhaft als repräsentative Punkte innerhalb der in der Legende angegebenen Verschattungsklassen betrachtet. An den in Bild 5 dargestellten Orten ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle 1 aufgeführten Absolutwerte und Veränderungen:

Tabelle 1: Prozentuale Zunahme (+) bzw. Minderung (-) sowie absolute Änderung der jährlichen Sonnenscheindauer

Markierung in Bild 5	Ort	Durchschnittliche jährliche Sonnenscheinminderung **vor** Aufnahme des kommerziellen Betriebes des Braunkohlenkraftwerks in Niederaußem in Prozent der jährlichen Sonnenscheindauer (Mittel 2002-2011) Fall 1	Durchschnittliche jährliche Sonnenscheinminderung **nach** Aufnahme des kommerziellen Betriebes des Braunkohlenkraftwerks in Niederaußem in Prozent der jährlichen Sonnenscheindauer (Mittel 2002-2011) Fall 2	Prozentuale Zunahme (+) bzw. Minderung (-) sowie absolute Änderung der jährlichen Sonnenscheindauer Fall 1 minus Fall 2
1	Auenheim Nord-Osten	22,8	17,9	+4,9 % / +78 h
2	Auenheim Ortsmitte / Kirche	12,6	10,1	+2,5 % / +40 h
3	Auenheim Süd-Westen	9,1	7,9	+1,2 % / +19 h
4	Niederaußem Nähe Nord- Süd-Bahn	9,7	7,4	+2,3 % / +37 h
5	Niederaußem Nord-Osten	5,1	3,8	+1,3 % / +21 h
6	Ackerflächen nordwestlich von Auenheim	12,7	11,2	+1,5 % / +24 h
7	Sondergebiet Braunkohlenkraftwerk	21,7	39,1	-17,4 % / -278 h
8	Ackerflächen nordöstlich L279n	16,2	21,3	-5,1 % / -82 h
9	Ackerflächen im Bereich der Gillbachaue	9,5	10,4	-0,9 % / -14 h

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Modellierung des Einflusses der Bauwerke und der sichtbaren Schwaden auf die Sonnenscheinminderung nach Aufnahme des kommerziellen Betriebes des Musterkraftwerks mit einem Hybridkühlturm lassen unter Berücksichtigung der mit der Realisierung des Musterkraftwerks zusammenhängenden endgültigen Stilllegung der vier 300 MW-Blöcke folgende Rückschlüsse zu:

- Die Situation in den angrenzenden Stadtteilen Auenheim und Niederaußem verbessert sich deutlich. Die Verbesserung beträgt 1 bis 5 %-Punkte.
- In den Wohngebieten der anderen angrenzenden Stadtteile Rheidt, Hüchelhoven, Oberaußem sowie in Bedburg-Rath ist keine Verschlechterung zu erwarten. In den weiter entfernten Wohngebieten sind keine signifikanten Veränderungen der bisherigen Situation zu erwarten.
- Im Bereich des Musterkraftwerks kommt es kraftwerksnah zu einer Zunahme der Verschattung. Hiervon sind primär das Sondergebiet Braunkohlenkraftwerk (Kraftwerksgelände) sowie unmittelbar benachbarte Ackerflächen betroffen. Im Bereich der benachbarten Ackerflächen ist mit einer Zunahme der Verschattung von jährlich 1 bis 5 %-Punkten zu rechnen.

Für eine Beurteilung der Veränderung der Sonnenscheinstunden gibt es keinen Bewertungsmaßstab und auch keine per Konvention festgesetzten Grenzwerte. Die natürliche Variation in Raum (geografische Lage) und Zeit (Jahressumme) liegt für die Anzahl der Sonnenscheinstunden im Bereich von 20%. Zusätzliche sichtbare Schwaden reduzieren die Anzahl der Sonnenscheinstunden örtlich je nach den Wetterbedingungen.

Durch den Einsatz eines Hybridkühlturms werden die Auswirkungen des gesamten Kraftwerkes Niederaußem nach Aufnahme des kommerziellen Betriebs des Musterkraftwerks bezogen auf die Häufigkeit der Sonnenscheinstunden, minimiert. Sie werden nur im nahen durch Ackerflächen geprägten Umfeld als signifikant prognostiziert. Negative Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum sind auch dort entsprechend den agrarmeteorologischen Untersuchungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (LWK) nicht zu erwarten [5].

Aufgrund der vorgesehenen Stilllegung alter Naturzug-Nasskühltürme werden in deren Umfeld deutliche Verbesserungen der Verschattungssituation auftreten.

8 Literatur, Daten

[1] Deutscher Wetterdienst
Analysefelder der LME/COSMO-Datenbank für Temperatur, Feuchte und Wind zwischen Bodenniveau und 3 km Höhe über Grund, 2002-2011

[2] Forschungszentrum Jülich
Zeitreihe der Sonnenscheinstunden 2002,2011

[3] Bahmann, W., Ludes, G.
Verschattung durch Wasserdampfschwaden - Modellkonzept und Ergebnisse von Beispielrechnungen
Posterbeitrag auf der Tagung METTOOLS VI, Garmisch-Partenkirchen, April 2007

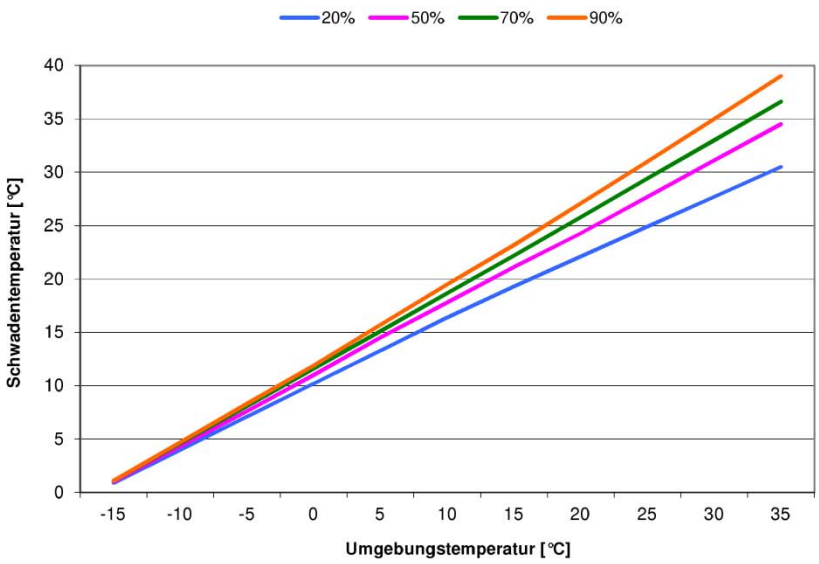
[4] Bahmann, W., Ludes, G.
Verschattung durch Wasserdampfschwaden
Immissionsschutz, Heft 2/2011, S. 67-71

[5] Deutscher Wetterdienst
Agrarmeteorologische Messungen während der Vegetationsperioden 2005 - 2010 an bis zu 6 Stationen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in der Umgebung der Braunkohlenkraftwerke Niederaußem und Neurath
Zusammenfassender Bericht, Geisenheim 2011

Anhang 1: Eingangsdaten Kühltürme und Schornsteine

Schwadentemperatur

tj	rfa			
ta	20%	50%	70%	90%
-15	0.9	1.0	1.1	1.1
-10	4.0	4.3	4.6	4.7
-5	7.1	7.6	8.1	8.3
0	10.2	11.0	11.6	11.9
5	13.3	14.5	15.1	15.7
10	16.4	17.8	18.7	19.5
15	19.3	21.1	22.2	23.2
20	22.1	24.3	25.8	27.1
25	24.9	27.7	29.4	31.0
30	27.7	31.1	33.0	35.0
35	30.5	34.5	36.6	39.0



Scharparameter für Kurven:
Umgebungsfeuchte rfa [%]

Schwadenfeuchte

rfj	rfa			
ta	20%	50%	70%	90%
-15	93.2	96.7	100	100
-10	90.6	94.1	98.3	100
-5	88.0	92.1	96.0	100
0	85.4	90.1	93.7	98.8
5	83.4	88.7	92.1	96.5
10	81.6	87.6	91.1	94.9
15	80.1	86.9	90.6	94.3
20	78.9	86.3	90.4	94.1
25	78.0	86.0	90.4	94.1
30	77.8	86.0	90.4	94.1
35	77.8	86.0	90.4	94.1

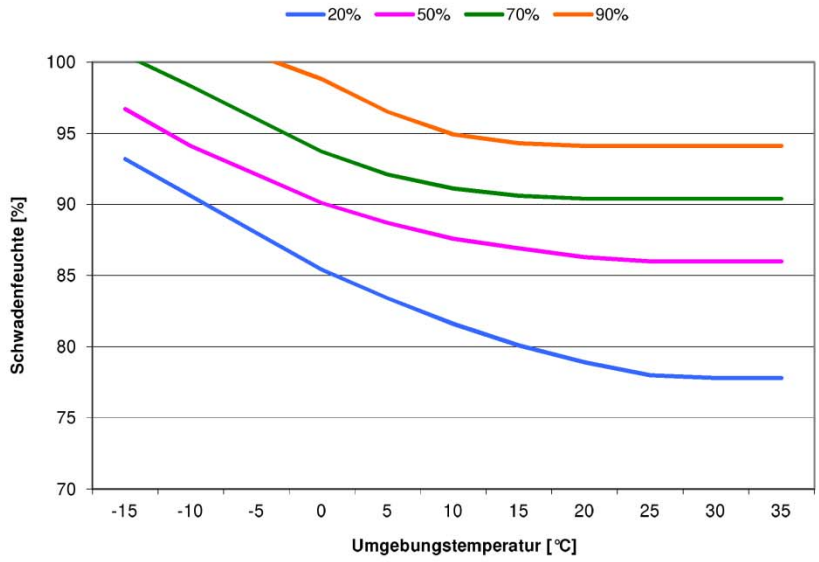


Bild A-1a: Kennlinien Hybrid-Kühlturm *(blaue Zahlenwerte extrapoliert)*

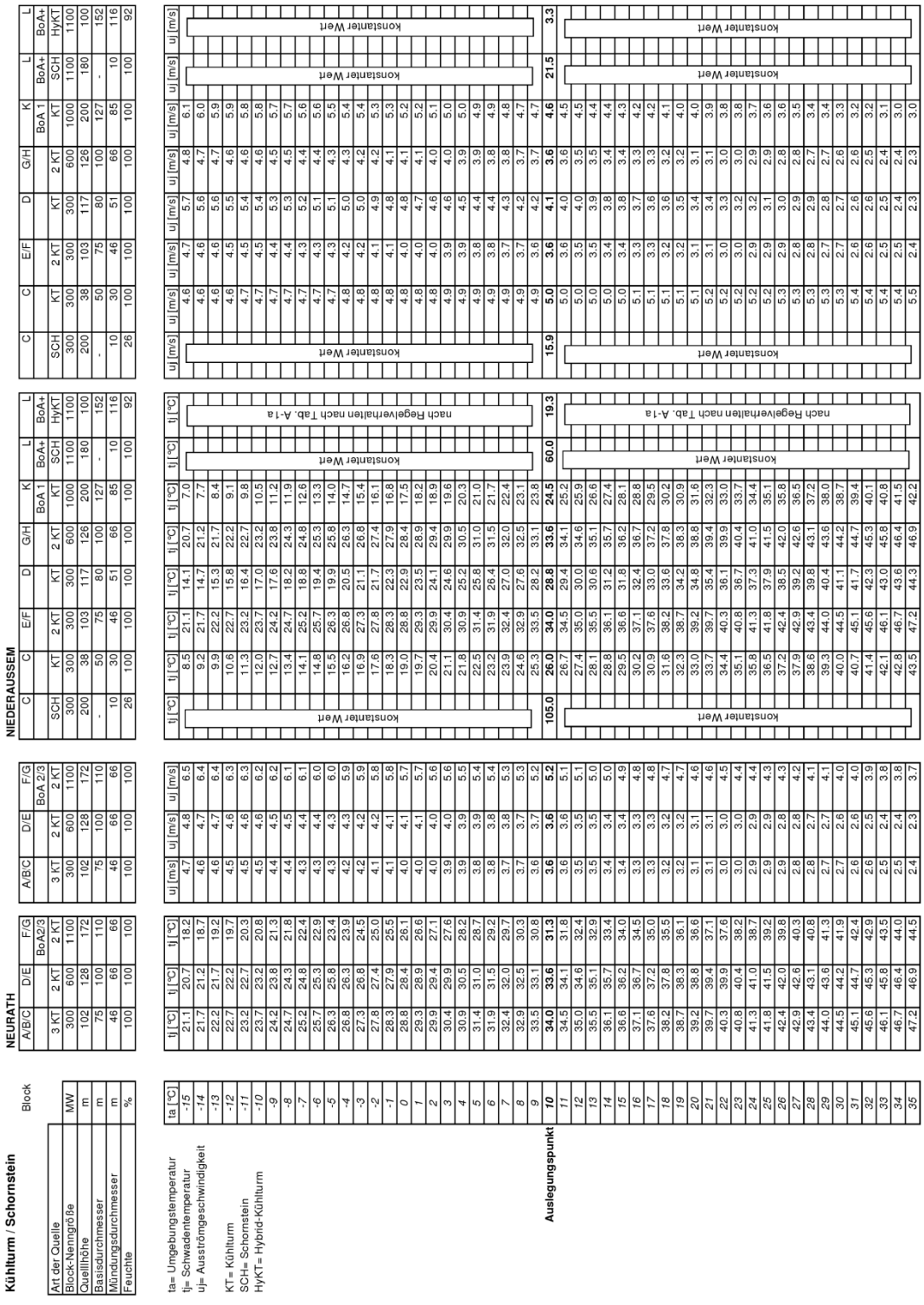


Bild A-1b: Kennzahlen Kühltürme / Schornsteine

Anhang 2: Untersuchungszeitraum

In Bild A-2 sind die Sonnenscheinstunden der laufenden Klimaperiode ab Beginn der 90er Jahre dargestellt. Da vertikale meteorologische Profile in Stundenauflösung erst seit 2002 zur Verfügung stehen, wurden bei den Berechnungen die Verhältnisse im Zeitraum 2002 bis 2011 näher betrachtet. Die Werte der nächstgelegenen beiden untersuchten Stationen (Düsseldorf und Jülich), an denen Sonnenscheinstunden aufgezeichnet werden, variieren naturgemäß; das langjährige, regionale Mittel aus beiden Stationen beträgt im Mittel knapp 1600 Stunden. Diesen Wert findet man auch als klimatologisches Mittel im DWD-Klimaatlas für das Rhein-Erft-Gebiet. Für die Verschattungsberechnungen werden die Daten von Jülich eingesetzt, da der Messort dem Standort näher liegt und die Anzahl der Sonnenscheinstunden größer ist als in Düsseldorf, was zu längeren Verschattungszeiten führt.

Bild A-2 zeigt, dass der verwendete Zeitraum in den Jahressummen der Sonnenscheindauer im Mittelfeld liegt. Das "Ausreißerjahr 2003" ist statistisch gesehen in der Betrachtung enthalten. Bezogen auf dieses Jahr werden überdurchschnittlich große Verschattungshäufigkeiten berechnet. Insofern ist der Zeitraum eher als konservativ einzuordnen, d.h. es werden tendenziell größere Verschattungshäufigkeiten ermittelt als langjährig zu erwarten. Diese Überschätzung erfolgt auch durch die Annahme eines ganzjährigen Volllastbetriebs des Kraftwerks und durch die Annahme eines grundsätzlich „undurchsichtigen“ Schwadens.

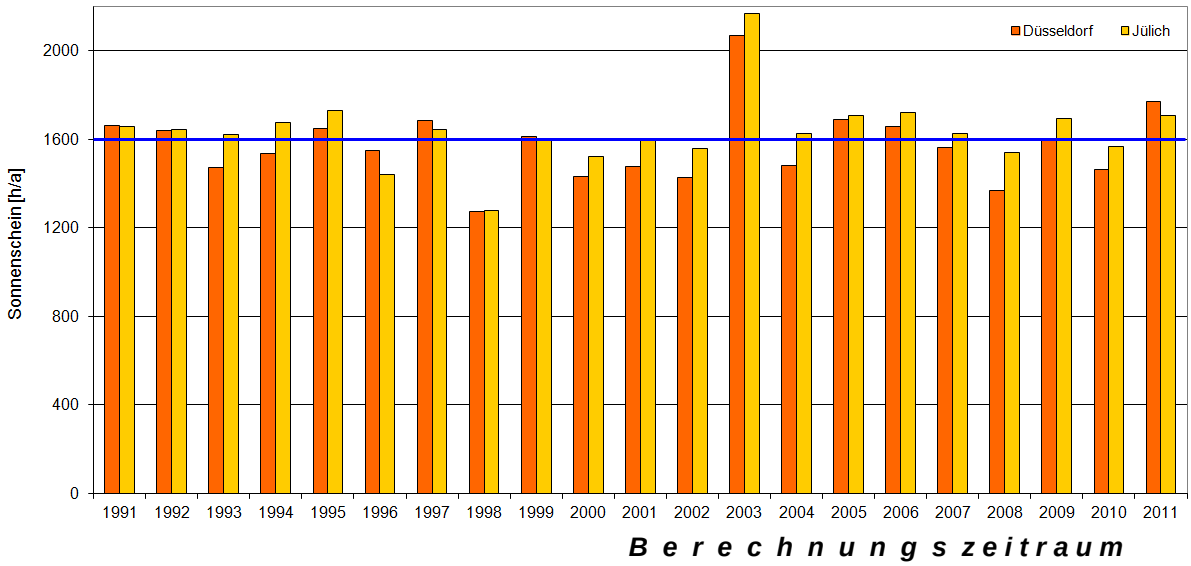


Bild A-2: Zeitverlauf der Sonnenscheinstunden (langjähriges Mittel als blaue Linie)

Anhang 3: Methodik / Berechnungsverfahren

Das Modellsystem ***SPLaSh*** (**S**imulation of water vapor **P**lumes **a**nd its **Sh**adows) dient zur Bestimmung der Verschattung durch sichtbare Schwaden (siehe auch Schema in Bild A-3). In die zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Modellrechnungen fließen neben der Kühlturmgeometrie und den in Abhängigkeit der meteorologischen Bedingungen variierenden Abluftbedingungen die tages- und jahreszeitlich wechselnden Sonnenstände am Standort ein.

Die Emission von Wasserdampf aus den Naturzug-Nasskühltürmen wird beschrieben durch den Volumendurchsatz an den Mündungsöffnungen. Die Modellierung der sichtbaren Schwaden wird mit dem Modell WCTP[5] vorgenommen, das in seiner Grundstruktur auch für die Beschreibung der Kühlturmfahnenüberhöhung (Zunahme der Quellhöhe durch thermischen Auftrieb des Schwaden über die Mündungshöhe) im Modell AUSTAL2000 (Ausbreitungsrechnung nach TA Luft; dort VDISP genannt) implementiert ist. Die Sichtbarkeitsgrenze wurde anhand von vermessenen Einzelfällen validiert. Weiterhin wurden Plausibilitätsprüfungen über Schwadenlängenstatistiken vorgenommen. Die sichtbaren Abgasfahnen von Schornsteinen werden mit dem Modell PLURIS[6] modelliert. Auch hier wird die vollständige Sättigung der Luft mit Wasserdampf als Kriterium für die Sichtbarkeit herangezogen.

In *SPLaSh* werden die Parameter ausgewertet, die den sichtbaren Anteil des Schwadens beschreiben. Bei mehreren Kühltürmen werden die Schwaden jedes einzelnen Kühlturms separat modelliert.

Das Modell WCTP erfordert als Eingabedaten neben den Ausströmbedingungen (Geschwindigkeit und Temperatur), dem Kühlturmdurchmesser und der Kühlturmhöhe auch noch die vertikalen Profile von Temperatur, relativer Feuchte und Windgeschwindigkeit. Diese werden dem nächstgelegenen Gitterpunkt (hier Grevenbroich) aus den unteren Schichten des sog. COSMO-EU/LME-Modells (Initialisierungsfeld) des Deutschen Wetterdienstes entnommen. Sie beschreiben in stündlicher Auflösung den gesamten Jahresverlauf. Die Betrachtung eines repräsentativen Jahres oder besser mehrerer (typischerweise mindestens 5, hier 10) Jahre ergibt eine im Sinne einer Prognose übertragbare Aussage. Diese Daten basieren auf Messdaten und sind räumlich modellgestützt auf ein Gitter mit 7 km Maschenweite interpoliert.

Für die Verschattungssimulationen wird der Modell-Parameter VPD (visible plume diameter) aus-

[5] Schatzmann, M., Policastro, A.J.: An advanced integral model for cooling tower plume dispersion (WCTP - Wet Cooling Tower Plume), Atm. Environ. 18 (1984) S. 663 ff

[6] Janicke, U., Janicke, L.: A three-dimensional plume rise model for dry and wet plumes (IBJpluris), Atm. Environ. 35 (2001) S. 877-890

gewertet, der den sichtbaren Anteil des Schwaden beschreibt. Ein Einmischen von (meist) trockenerer Umgebungsluft lässt den zu Beginn gesättigten Schwaden im Verlauf des Transports mit dem Wind abtrocknen und dann optisch verschwinden.
Aus den Modell-Ergebnissen von WCTP werden die Abmessungen der sichtbaren Schwaden zusammen mit den Kühlturmpositionen und der Windrichtung der jeweiligen Stunde für ein Programm aufbereitet, das die eigentliche Verschattungssimulation dieser dreidimensionalen Objekte vornimmt. Hierfür wird jeweils ein ganzer Tagesablauf vom Sonnenaufgang bis zum Sonnenuntergang gerechnet. Als Untersuchungsgebiet wird typischerweise ein quadratisches Gitter im Umkreis von 5 bis 10 km mit einer Maschengröße von 10 bis 50 m festgelegt.

Während der Abarbeitung der Zeitreihe besteht die Möglichkeit durch Zwischenspeicherung der Ergebnisse auch saisonale Auswertungen vorzunehmen oder auch Zeitreihen an festen Orten abzuleiten. Eine Differenzierung der Ursache der Verschattung nach sichtbaren Schwaden und Bauwerke kann ebenso vorgenommen werden.
Einzelne sichtbare Schwaden werden optisch überlagert. Dies führt allerdings an einem festen Ort nicht zu mehr Schatten, da eine zu einem Zeitpunkt durch ein Objekt verschattete Zelle nicht stärker betroffen wird, wenn auch ein zweites Objekt hier zum gleichen Zeitpunkt die Sonne abschirmt. Insofern wird der Parameter Verschattung nur als zwei Zustände behandelt: ohne und mit Schatten.

Der Übergang zur realen Schattenhäufigkeit wird durch Einbindung der Zeitreihe der Sonnenscheinstunden realisiert. Schattenbildung kann es nur bei Sonne geben. Ist der Himmel mit natürlicher Bewölkung bedeckt, wird kein Schatten berechnet.

Wenn keine Zeitreihe der Sonnenscheindauer vorliegt, lässt sich aus der astronomisch/geometrisch möglichen max. Sonnenscheindauer durch Gewichtung der Zeitreihe des Bewölkungsgrads die Sonnenscheinminderung abschätzen. Der Bedeckungsgrad gibt in Achtel den Anteil des Himmelsraumes an, der von Wolken eingenommen wird. Die maximal mögliche Beschattungsdauer wird um den beobachteten Bedeckungsgrad reduziert, so dass das Maximum nur bei wolkenlosem Himmel erreicht werden kann. Bei vollständig bedecktem Himmel (8 Achtel) wird damit kein zusätzlicher Schatten durch die Schwaden erzeugt.

In den Fällen, in denen das Rechenmodell seine max. Entfernung erreicht hat, und der Schwaden noch sichtbar ist, wird die Schwadengröße beibehalten und es wird ein weiter fortgesetzter Transport in Windrichtung in gleicher Höhe angenommen. Hiervon sind etwa typischerweise 1 bis 2% der Jahresstunden betroffen. Durch diesen konservativen Ansatz ergibt sich eher eine Über- als eine Unterschätzung von langen oder hoch aufsteigenden sichtbaren Schwaden in feuchten Luftmassen.

Modellparameter: Auflösung: räumlich 20 m / zeitlich 2 Min.

Optional kann ***SPLaSh*** die Verschattung auch auf der topografischen Oberfläche ermitteln.

Die Modellierung für den Hybridkühlturm wird in zwei Fälle unterteilt:

a) Der Betrieb führt gemäß der Grenzlinie im Temperatur-/Feuchte-Werteraum zu einem sichtbaren Schwaden; dann wird der Schwaden wie für einen Naturzug-Nasskühlturm berechnet.

b) Der Betrieb erfolgt ohne sichtbaren Schwaden; dann wird der nicht sichtbare Schwaden auf seine Eigenschaften hin untersucht, in größerer Höhe ggf. einen Sekundärschwaden zu entwickeln. Dies ist ein Bereich, in dem aufgrund eines verschwindenden Sättigungsdefizits Rekondensation eintritt und der Schwaden dadurch wieder sichtbar wird.
Das Objekt Sekundärschwaden wird als Zylinder modelliert, der den Bereich mit Kondensation umhüllt. Sein Durchmesser entspricht der des Schwaden; seine Länge wird für die hier ausschließlich betrachteten Fälle mit Sonnenschein entsprechend Beobachtungen mit 10 Durchmessern abgeschätzt.

Strukturschema des Simulationssystems ***SPlaSh***

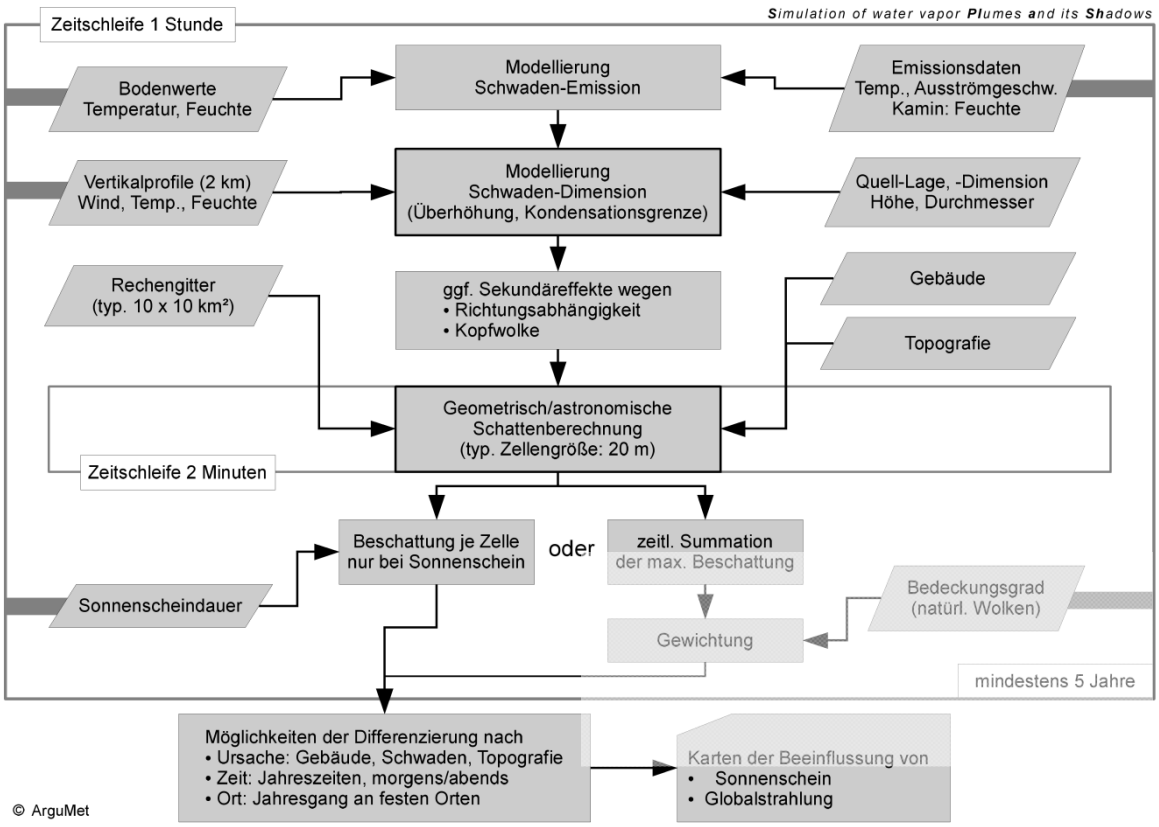


Bild A-3: Schema der Verschattungs-Simulation mit modellierten Schwaden