

Softwarebugs in der Wettervorhersage

Seminar Softwarefehler

Florentin Wieser
Fakultät für Informatik
Technische Universität München
f.wieser@tum.de

Zusammenfassung

Um die Gründe für die Fehlvorhersage des Orkan Lothars zu bestimmen, wird die ehemalige Modellkette des deutschen Wetterdienstes beschrieben. Im Anschluss wird der Assimilationsprozess erläutert und die Ursachen der falschen Prognose - fehlerhafte Randwerte - ermittelt. Abschließend werden die Unterschiede zum aktuellen Modell des DWD dargestellt und ein Verfahren zur verbesserten Windvorhersage durch das Nutzen von Windturbinendaten vorgestellt.

1. Einführung

Die Wetterprognose besteht im Wesentlichen aus vier Schritten. Zuerst werden numerische Modelle entwickelt. Danach folgt die Einspeisung gemessener Daten in diese Modelle. Dies geschieht mithilfe der Datenassimilation. Nach der Lösung der Modellgleichungen wird der prognostizierte Atmosphärenzustand interpretiert. Dieser letzte Schritt ist dann die eigentliche Wettervorhersage.

Als Grundlage für die Modelle dient ein Gitternetz, das über das zu betrachtende Gebiet gelegt wird. Um die Berechnungen für die Prognose durchführen zu können, muss an allen Eckpunkten dieses Netzes für jede betrachtete Variable ein Anfangswert vorliegen. Die größte Herausforderung für die Wettervorhersage ist also, dass an allen Git-

terpunkten ein Anfangswert vorhanden ist.

Im Folgenden werden die einzelnen Modellbestandteile analysiert und erläutert wie es zu der Fehlvorhersage des Orkan Lothars im Jahr 1999 kommen konnte.

2. Aufbau der Modellkette um 2000

Da die Befüllung der Variablen mit Anfangswerten vor allem an den Rändern des zu beobachteten Gebiets äußerst problematisch ist, nutzt der deutsche Wetterdienst zwei Modelle: Das Globalmodell GME und das Lokalmodell LM.

Dabei deckt das LM Deutschland und seine Anrainerstaaten ab, während das GME die gesamte Erde abdeckt. Das Zusammenspiel der beiden Netze ist auch in Abbildung 1 zu sehen.

2.1. Globalmodell GME

Das Globalmodell umspannt den gesamten Globus mit einer horizontalen Gittermaschenweite von ca. 60km. Es liefert eine 174h-Vorhersage für sechs Variablen: Bodendruck, horizontale Windkomponenten, Temperatur, spezifische Feuchte, Wolkenwasser und Wolkeneis. Dabei wird vertikal in 31 Schichten unterteilt und ein Gitterpunkt repräsentiert eine Fläche von ca. 3.100km^2 [2].

Die Rechendauer für eine 24h-Vorhersage aller Variablen beträgt 5 Minuten.

2.2. Lokalmmodell LM

Das Lokalmmodell ist höher aufgelöst, sowohl horizontal mit 7km statt 60km Maschenweite als auch vertikal mit 35 Schichten. Außerdem entspricht ein Gitterpunkt einer Fläche von nur 50km^2 . Es liefert maximal eine 48h-Vorhersage, beinhaltet aber zusätzlich zu den GME-Variablen noch den Druck, die Vertikalbewegung und die turbulente kinetische Energie.

Die Berechnung einer 24h-Vorhersage des LM benötigt 30 Minuten.

2.3. Zusammenhang GME und LM

Der Zusammenhang zwischen beiden Modellen besteht, wie schon beschrieben, in der Generierung der Anfangswerte für das Lokalmmodell. Dabei übernimmt das LM an den Rändern die Daten des Globalmodells und bekommt so eine qualitative Datenbasis.

Probleme entstehen vor allem durch die Differenz der Auflösungen. So fallen die Gitterpunkte des GME und die Randpunkte des LM nicht immer genau aufeinander und es wird komplexer sie zu verknüpfen.

2.4. Datengewinnung

In die oben genannten Modelle werden dann zu festgelegten Zeitpunkten die gemessenen Daten eingespeist. Die Messungen werden an unterschiedlichen Orten mit verschiedenen Methoden / Instrumenten gewonnen. Die häufigsten Datenlieferanten sind Bodenstationen, Schiffsstationen, driftende Bojen, Radiosonden, Satelliten und Flugzeugmeldungen. Dabei sind besonders Radiosonden wichtig, weil sie den gesamten Aufstieg über Daten sammeln und so ein Vertikalprofil mit kon-

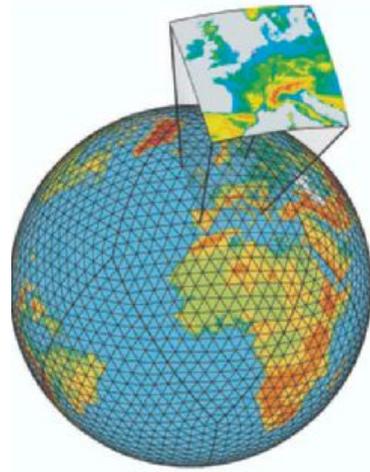


Abbildung 1. Zusammenhang von GME und LM

tinuierlichen Messungen liefern.

Weltweit gibt es ca. 10.000 Bodenstationen, 6.000 Schiffstationen und etwa 1.000 Stationen die Aufstiege von Radiosonden durchführen [8].

3. Datenassimilation

Da nur für einen kleinen Teil der Gitterpunkte Beobachtungen vorliegen, diese Messungen meist nicht direkt an Gitterpunkten anliegen und die Daten zu unterschiedlichen Zeitpunkten ermittelt werden, wendet man Datenassimilationsverfahren an.

Die Basisidee ist dabei die Nutzung der Zeitdimension: Man betrachtet neben den aktuellen Beobachtungen auch die vorherigen Messungen. Mit diesem gewonnenen Zeitverlauf und dem Wissen über atmosphärische Vorgänge lassen sich die vielen fehlenden Daten abschätzen.

Im Grunde besteht der Assimilationsprozess aus drei Teilen: Einer Schätzung, den neu gewonnenen Beobachtungen und der Analyse, d.h. der Vereinigung von prognostiziertem Zustand und aktuellem Stadium.

3.1. Schätzung

Die Schätzung ist das Ergebnis einer Kurzfristprognose. Diese Vorhersage wird am Ende jedes Assimilationsprozesses mit den Ergebnissen des Analyseschritts durchgeführt und prognostiziert die Variablen zum Datum der nachfolgenden Assimilation. Die Folgeassimilation greift dann auf die Resultate zu.

Im Beispiel in Abbildung 2 wird am Zeitpunkt $t - 1$ eine Kurzfristvorhersage mit der Datenbasis der Analyse am Zeitpunkt $t - 1$ (hier rot) gestartet. Das Ergebnis ist dann die Schätzung zum Zeitpunkt t (hier schwarz), auf die dann der Assimilationsprozess zum Zeitpunkt t zugreift.

Bei Initialisierung des Prozesses gibt es logischerweise keine vorhandenen Daten, auf die zurückgegriffen werden kann. Also kommt es zum Urstart. Dabei nutzt man, statt der letzten Analysedaten, klimatologische Felder [2]. Diese erste Schätzung ist erwartungsgemäß sehr weit von der Realität entfernt.

3.2. Beobachtungen

Die Beobachtungen enthalten alle Datenwerte, die im Zeitraum um das Prognosedatum gemessen wurden und in den Assimilationsprozess miteinbezogen werden sollen.

Je nach Menge der Datenquellen und der Varianz der Messzeitpunkte, kann die Größe des Zeitraums für einbezogene Beobachtungen variieren. Dabei ist die Abwägung zwischen Fehlervergrößerung durch große Zeitabstände und Fehlerverringern durch eine höhere Quantität der Datenerhebung von großer Bedeutung.

In der Visualisierung sind die Beobachtungen durch die blauen Kreise dargestellt. Ein beispielhafter Zeitraum für betrachtete Beobachtungen wäre zum Beispiel jeweils im Intervall $[t - 0.5; t + 0.5]$.

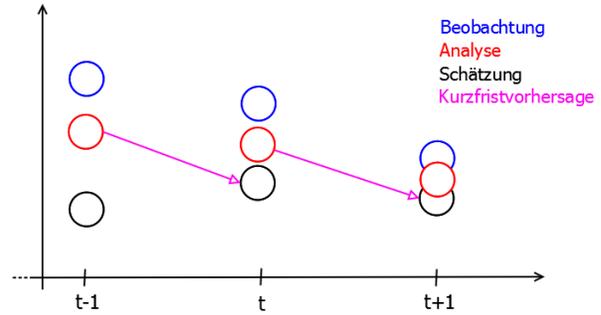


Abbildung 2. Schema des Assimilationsprozesses

3.3. Analyse

Bei der Analyse werden schließlich die prognostizierten Daten der Schätzung mit den tatsächlich gewonnenen Beobachtungen verglichen und verknüpft.

Ein besonderes Merkmal der Datenassimilation ist, dass mögliche Fehler - sowohl von Schätzung als auch von Messungen - mit in das Modell einfließen [2], [4].

Dabei werden zunächst die Fehler der beiden Komponenten kalkuliert. Angenommen f_B sei der Beobachtungsfehler und f_S der Fehler der Schätzung. Dann ist der Gesamtfehler f_G gegeben durch

$$f_G = \frac{f_S^2}{f_S^2 + f_B^2} * \text{Beobachtung} + \frac{f_B^2}{f_S^2 + f_B^2} * \text{Schätzung}$$

Die Quadratur der Fehler erlaubt eine Miteinbeziehung von sowohl positiven als auch negativen Fehlern. Die beiden Terme vor den Werten *Beobachtung* und *Schätzung* dienen als Gewichtung der Analysebestandteile. Damit liegt die Analyse immer zwischen den Beobachtungen und der Schätzung.

Ist der Beobachtungsfehler im Vergleich zum Schätzungsfehler sehr gering, fließt die Beobachtung viel stärker ein und vice versa. Wird nun der Gesamtfehler minimiert, bekommt man die "fehlerärmste" Verknüpfung.

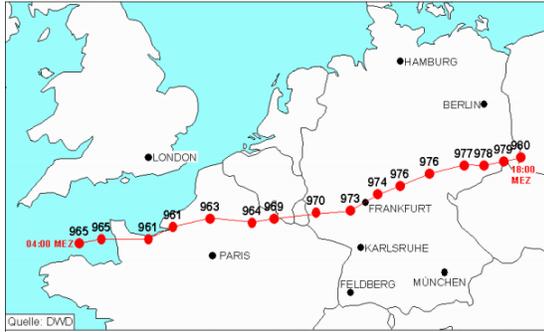


Abbildung 3. Zugbahn des Orkan Lothars mit dem Kerndruck

4. Orkan Lothar

Der Orkan Lothar war ein schwerer Wintersturm, der am 26.12.1999 auftrat. Viele Messstationen verzeichneten während des Sturms neue Extremwerte [1].

4.1. Entstehung

Der Orkan entwickelte sich im Seegebiet südlich Irlands. Anschließend zog er, wie in Abbildung 3 zu sehen, über den Norden Frankreichs, Luxemburg und Frankfurt hinweg. In Ostachsen wurde der Orkan schwächer.

Besonders hervorzuheben sind die starken Luftdruckänderungen. So wurde in Karlsruhe zuerst ein Abfall von 30 hPa und anschließend ein Anstieg von 22 hPa gemessen. In Caen an der Kanalküste Frankreichs wurde ein noch stärkerer Unterschied aufgezeichnet: Einem Abfall von 27,7 hPa folgt ein Anstieg von 29,0 hPa [1]. Solch hohe Werte sind mit großer Wahrscheinlichkeit noch nie in Zentraleuropa aufgetreten.

Die intensiven Druckänderungen führten zu extrem hohen Windgeschwindigkeiten. Im Rheintal traten zum Beispiel Mittelwinde von $90 \frac{km}{h}$ und Spitzenböen mit $151 \frac{km}{h}$ auf. Der ehemalige Böerekord lag bei $115 \frac{km}{h}$. Wetterstationen in den Bergen maßen noch höhere Geschwindigkeiten. Am Feldberg wurden Mittel-

winde mit einer Geschwindigkeit von $130 \frac{km}{h}$ und Böen mit $212 \frac{km}{h}$ gemessen [1].

4.2. Auswirkungen

Lothar hinterließ eine große Spur der Verwüstung. Vor allem Gebiete, die südlich des Orkans liegen, also Süddeutschland und die Schweiz, waren besonders betroffen. Hervorzuheben sind die Sturmschäden, die durch Baumfall entstanden sind. In Baden-Württemberg fielen zum Beispiel 30 Millionen Festmeter, der dreifache Jahreseinschlag [10].

Neben den Waldschäden wurden auch Bahnstrecken, Bundesstraßen und Stromleitungen beschädigt sowie Hausdächer abgedeckt.

5. Die Fehlvorhersage

Obwohl längerfristige Prognosen korrekte Indizien für eine kräftige Entwicklung enthielten, konnte das Lokalmmodell weder Stärke noch Position des Orkans korrekt vorhersagen [2].

Das Zusammenspiel mehrerer, im Folgenden aufgeführten, Fehlerkomponenten führte zu dem Versagen der Modellkette.

5.1. Fehlerhafte Randwerte des GMEs

Im Nachhinein wurde festgestellt, dass die Randwerte des GMEs (und somit auch die Randwerte des LMs) größere Abweichungen von der Realität enthielten. Gründe für diese Diskrepanz sind vordergründig ein großer Beobachtungszeitraum, die Nichtnutzung von Satellitendaten und der Neustart einer Radiosonde.

5.1.1. Beobachtungszeitraum. Der Zeitraum für miteinbezogene Beobachtungen war - mit sechs Stunden um den Analysezeitpunkt - groß bemessen. "Der dadurch [durch das große Zeitfenster]

verursachte Fehler ist im allgemeinen klein und wird ausgewogen durch eine höhere Redundanz in den Beobachtungen [...]” [2].

In diesem Fall stieg der Fehler allerdings durch die ”[...] Auflösung des Modells und [...] der Intensität der aktuellen Entwicklung in der Atmosphäre.” [2].

Bei einem Vergleichslauf, bei dem als einzige Anpassung das Zeitfenster auf drei Stunden verkürzt wurde (also ± 90 Minuten um den Prognosezeitpunkt), war die Vorhersage der Sturmbildung sehr nah an der Realität [2].

5.1.2. Verwerfen von Daten. Eine weitere Quelle der verfälschten Randwerte war das Verwerfen von Temperatur- und Feuchtedaten polarumlaufender Satelliten. Wegen Qualitätsproblemen wurden diese Daten seit dem 19.11.1999 nicht mehr im Assimilationsverfahren genutzt. [6]

5.1.3. Neustart der Radiosonde. Der gestörte Aufstieg der Radiosonde ”Sable Island” ist ein weiterer Einflussfaktor auf die Fehlprognose des DWD.

”Sable Island” steigt vor der östlichen amerikanisch-kanadischen Grenze bei Nova Scotia auf. In Abbildung 4 ist der Aufstiegsort der Sonde zu sehen. Direkt südlich befindet sich das Entstehungsgebiet des Orkan Lothars. Fernerhin ist nördlich von Frankreich noch ein weiteres Sturmfeld zu sehen. Dieses zog jedoch hauptsächlich über den Ärmelkanal und richtete keine größeren Schäden an.

Aufgrund einer zu geringen erreichten Höhe wurde ein Neuaufstieg knapp zwei Stunden später veranlasst. Die gewonnenen Daten wurden allerdings mit dem Zeitstempel des ersten Aufstiegs versehen [2]. Dadurch, dass zum Zeitpunkt des Neustarts das Entstehungsfeld des Orkan Lothars nahe an dem Messstandort vorbeizog (siehe Abbildung 4), wurden für die Prognose wertvolle Daten zeitlich falsch eingeordnet und somit die Modelldarstellung des Tiefdruckgebiets verfälscht.

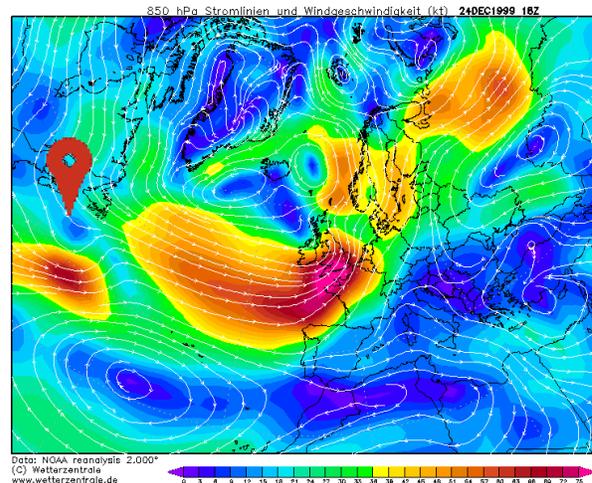


Abbildung 4. Wetterkarte vom 24.12.99 mit Windgeschwindigkeiten und Standort der Radiosonde [7]

5.2. Diskrepanz zwischen Kurzfristprognosen und Langfristprognosen

Mit diesem Wissen lässt sich auch erklären, warum längerfristige Voraussagen die Entwicklung besser beschrieben als der 24h-Wetterbericht: Die zusätzlichen, fehlerbehafteten Messungen haben das Atmosphärenbild in eine falsche Richtung verzerrt. Also lieferten die langfristigen Prognosen ein besseres Ergebnis, obwohl sie weniger Beobachtungen verwendeten.

5.3. Anpassungen infolge des Orkans

Infolge der Erkenntnisse aus der Fehlvorhersage wurden mehrere Änderungen in der Datenassimilation des GMEs realisiert.

So wurde das Zeitfenster für Beobachtungen von sechs Stunden um den Prognosestermin auf drei Stunden gesenkt [6]. Wie schon beschrieben, brachte ein experimenteller Lauf mit einem verkleinerten Zeitraum erhebliche Verbesserungen. Dieser Fortschritt wurde nun auch in die operationale Analyse übernommen.

Als weitere Maßnahme wurden die Daten der po-

larumlaufender Satelliten erneut genutzt. Nur drei Monate nach der Abschaltung hat man ebendiese wieder rückgängig gemacht. Die Folge waren leichte Verbesserungen über Europa und eine deutliche Steigerung der Südhemisphären-Daten [6].

Zur Verbesserung der Abläufe fokussierte man sich auf das Qualitätsmanagement. So wurde "[...] die Qualitätskontrolle der Beobachtungsdaten und die Verwendung von Fernerkundungsdaten in der Datenassimilation verbessert und ausgebaut." [11]

6. Fehlvorhersage in den USA

Am 22.11.1980 entwickelte sich 240km vor der Küste der USA ein rauer Sturm, der vom National Weather Service ¹ nicht vorhergesagt wurde. In dem Orkan mit Windgeschwindigkeiten von $160 \frac{km}{h}$ starben drei Fischer die vom Sturm überrascht wurden.

Im Nachhinein wurde das Fehlversagen auf eine defekte Wetterboje zurückgeführt. Des Weiteren erschwerte die plötzliche Bildung des Sturms eine Vorhersage.

Nach den tragischen Todesfällen wurde der Wetterdienst von Angehörigen verklagt und haftbar gemacht. Das ist insbesondere deshalb interessant, weil zum ersten Mal ein Wetterdienst für eine falsche Vorhersage verantwortlich gemacht wurde. Diese Entscheidung ist aber hauptsächlich auf eine wochenlang unterlassene Reparatur der angesprochenen Wetterboje zurückzuführen [9].

7. Aktuelles Wettermodell ICON

Das GME wurde am 23.02.2015 abgeschafft und durch das Globalmodell ICON ersetzt. Das LM wurde zum Modell COSMO weiterentwickelt, es betrachtet nun den Raum Deutschland, Österreich, Schweiz und Anrainerstaaten. Im Folgenden wird kurz auf die Neuerungen der aktuellen Modelle

¹Wetterdienst der Vereinigten Staaten von Amerika

eingegangen.

Als größte Neuerung ist die Anpassung der Systemarchitektur zu nennen. Um in Zukunft mit der technischen Entwicklung mithalten zu können, hat man auf Parallelisierung und Skalierbarkeit gesetzt.

7.1. ICON

Das Modell, das den kompletten Globus umspannt, hat eine horizontale Maschenweite von 13km. Die vertikale Auflösung umfasst Werte bis in 75km Höhe und ist in 90 Schichten aufgeteilt.

Durch die neue Architektur und dem Einsatz leistungsstärkerer Rechner dauert die Berechnung einer 24h-Wettervorhersage 8 Minuten [5].

Neben dem Lokalmodell COSMO des DWD, beziehen auch 30 weitere nationale Wetterdienste ihre Randwerte aus dem ICON-Modell.

7.2. COSMO

Die Weiterentwicklung des LM besitzt ein Gitter mit einer Maschenweite von 2.8km. Auch im vertikalen wird höher aufgelöst: 25km Höhe werden in 50 Schichten gesplittet.

Mit dieser hohen Auflösung können sogar kleinere Gewitterzellen, wie zum Beispiel Sommergewitter die sich schnell bilden und meist einen Durchmesser von nur wenigen Kilometern besitzen, simuliert werden [5].

8. Verbesserung der kurzfristigen Windvorhersage

Die Wettervorhersage spielt vor allem für die erneuerbaren Energien eine bedeutende Rolle. Besonders Wind- und Solarenergie hängen stark vom Wetter ab.

So müssen Schwankungen in der Erzeugung mit anderen Energiegewinnungsverfahren ausgeglichen werden. Kohlekraftwerke benötigen allerdings sechs Stunden bis sie auf voller Leistung laufen, Nuklearkraftwerke sogar zwölf Stunden [3].

Um mit diesen langen Vorlaufzeiten besser umgehen zu können, ist eine gute Prognose unabdingbar. Im Folgenden wird eine Möglichkeit zur Verbesserung der Kurzfristvorhersage durch die Nutzung von Turbinendaten im Assimilationsprozess erläutert. Diese Methode wurde von W. Y. Cheng et al. in [3] vorgestellt.

8.1. Standorte der Windparks

Das Problem bei vielen Windparks ist, dass in der näheren Umgebung der Standorte (z.B. bei Offshore-Parks) meist nur wenige Messstationen und damit eine geringe Anzahl an Beobachtungen zur Verfügung stehen. Um diesem Problem zu begegnen, werden die Daten der Sensoren der Windturbinen mit in den Assimilationsprozess aufgenommen.

8.2. Nutzen von reinen Geschwindigkeitsdaten

Um Daten in den Assimilationsprozess zu integrieren werden sowohl Informationen über die Windgeschwindigkeit, als auch die Windrichtung benötigt. Da aber einige Turbinen nur die Geschwindigkeiten liefern, muss die Windrichtung geschätzt werden [3]. Diese Information kann man aus einem bestehenden Prognosemodell entnehmen. In einer Fallstudie wurde gezeigt, dass dieses Vorgehen annehmbar ist und keine großen Differenzen zwischen der prognostizierten Windrichtung und der tatsächlichen Richtung auftreten [3].

8.3. Ergebnis

Als Ergebnis konnte die kurzfristige Windvorhersage verbessert werden. So senkte die Nutzung der

zusätzlichen Daten den mittleren absoluten Fehler um 20-30%. Das entspricht einem Wert von etwa 30kW bis 100kW [3].

9. Ausblick

In Zukunft wird mit der Rechenleistung auch die Auflösung der Modelle weiter steigen. Dabei sollte der Fokus sich aber nicht nur auf die Modelle beschränken, sondern es sollte auch versucht werden mehr Messtationen zu schaffen - vor allem in Gebieten mit noch wenigen Datenlieferanten.

Ein weiterer Ansatz ist, bestehende Daten verschiedenster Quellen (zum Beispiel von Wetterkameras) mithilfe neuer Technologien (z.B. Bilderkennung) anzubinden und mit in den Assimilationsprozess einfließen zu lassen.

Auch in Anbetracht des Ausbaus von erneuerbaren Energien spielt eine qualitativ hochwertige Wettervorhersage eine wichtige Rolle.

Literatur

- [1] Deutscher Wetterdienst - Abteilung Klima und Umwelt 2000, *Bewertung der Orkanwetterlage am 26.12.1999*, <http://www.dwd.de>, Aufgerufen am 31.05.2017
- [2] G. Adrian, U. Gärtner 2002, *Die neue Modellkette des DWD I*, promet: meteorologische Fortbildung - Heft 3
- [3] W. Cheng, Y. Liu, A. Bourgeois, Y. Wu, S. Haupt 2017, *Short-term wind forecast of a weather forecasting system with wind turbine anemometer measure assimilation*, Renewable Energy 107
- [4] T. Olzhabaev 2013, *Datenassimilation - Ein Überblick*, Seminar "Modellierung und Simulation" Universität Hamburg
- [5] http://www.dwd.de/DE/forschung/wettervorhersage/num_modellierung/, Aufgerufen am 01.07.2017
- [6] DWD 2000, *Mitteilung zu Änderung der Datenassimilation für GME*, Archiv der Änderungen 2010-1999
- [7] <http://www.wetterzentrale.de/de/reanalysis.php>, Aufgerufen am 03.07.2017
- [8] M. Kurz, *Das Wetter und seine Analyse*, Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland - Klima, Pflanzen- und Tierwelt
- [9] <http://www.nytimes.com/1984/12/22/us/us-weather-agency-held-liable-in-storm-deaths.html>, Aufgerufen am 02.07.2017

- [10] <http://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.orkan-lothar-vor-15-jahren-erst-die-stille-dann-die-stuermische-nacht.954ffe71-c1a9-4a88-93cb-315b158b6ba8.html>,
Aufgerufen am 03.07.2017
- [11] Dr. G. Adrian, 2000, Lothar-Workshop, <https://www5.in.tum.de/huckle/lothar>,
Aufgerufen am 14.07.2017