

D 2048



**1-2
2009**

Januar 2009
81. Jahrgang

CITEAH 81 (1-2)
1-188 (2009)
ISSN 0009-286 X

Reprint

Herausgeber:

DECHEMA
GDCh
VDI · GVC

Chemie Ingenieur Technik

Verfahrenstechnik · Technische Chemie · Apparatewesen · Biotechnologie

www.CIT-journal.de

Themenheft:

Sicherheitstechnik in Chemieanlagen: 30-jähriges Jubiläum bei der DECHEMA

Gastherausgeber:

Axel Schönbacher und Jürgen Schmidt

 **WILEY-VCH**

Hat der Klimawandel Auswirkungen auf die Anlagensicherheit?

Manfred Stock*

Umgebungsbedingte Gefahrenquellen für Anlagen wie Stürme, Hochwasser, Waldbrände und Gewitter hängen von Klimaparametern ab und zeigen teilweise erhöhte Risiken im Klimawandel. Für diese Ereignisse beobachtet man seit etwa 1970 eine Zunahme der Häufigkeit sowie teilweise auch der Parameter, die das Schadenspotenzial erhöhen. Zusammenhänge mit dem bereits laufenden Klimawandel deuten sich an, sind aber noch relativ unsicher. Für einige Prozesse, wie tropische Wirbelstürme und lokale Gewitterereignisse ist dies ansatzweise quantifizierbar, für andere Risiken lässt sich qualitativ der Bezug zur Temperaturänderung aufzeigen. Die aufgeführten Temperaturabhängigkeiten weisen eine exponentielle Abhängigkeiten oder solche mit hoher Potenz auf, sodass bei stark zunehmender globaler Erwärmung oberhalb von 2 °C neue Qualitäten erhöhter Risiken nicht auszuschließen sind.

Schlagerwörter: Klimawandel, Anlagensicherheit, Naturkatastrophen

Eingegangen: 18. November 2008; *akzeptiert:* 19. November 2008

1 Problemstellung

Das Thema Klimawandel mit der Frage der zu erwartenden Auswirkungen erfuhr im Jahr 2007 eine erhöhte öffentliche Aufmerksamkeit, insbesondere durch den aktuellen Bericht des Weltklimarats der Vereinten Nationen [1] und der Auszeichnung dieses Gremiums mit dem Friedensnobelpreis. Die dargelegten Daten weisen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit darauf hin, dass die zwischen 1906 und 2005 beobachtete globale Erwärmung von nahezu 0,8 °C nicht mit natürlichen Ursachen zu erklären ist, sondern auf die anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen wie Kohlendioxid, Methan und Stickoxide zurückzuführen sind.

Der Bericht enthält außerdem eine Fülle von Daten zu bereits dokumentierten Folgen der Erwärmung im Zeitraum von 1970 bis 2004. Neben Meeresspiegelanstieg, Schmelze bei Gletschern, Meer- und Inlandeis, auftauenden Permafrostböden und vielen Veränderungen in Flora und Fauna sind auch bei extremen Witterungsphänomenen Trends zu verzeichnen, die mit der beobachteten Erwärmung konsistent sind. Dies betrifft zunehmende Temperaturextreme, Hitze- und Dürreperioden, zunehmende Starkniederschläge in vielen Regionen der Erde sowie Stürme. Es wird erwartet, dass sich die meisten Trends entsprechend der weiter zunehmenden Erwärmung zukünftig fortsetzen werden, die je nach

Szenario und Unsicherheit um etwa 2 bis über 6 °C bis 2100 zunimmt.

Die Münchener Rückversicherung berichtet in ihren Jahresrückblicken zu Naturkatastrophen über den Anstieg von Anzahl und Auswirkungen von Extremereignissen mit hydrologischen, meteorologischen und klimatologischen Ursachen [2]. Auch wenn nichtklimatische Faktoren dabei eine wichtige Rolle spielen und sich einzelne Katastrophen kaum direkt auf klimatische Veränderungen zurückführen lassen, gibt es Indizien und gute Gründe anzunehmen, dass sich dieser Trend auch im Klimawandel fortsetzen wird. Diese Hypothese findet bereits Eingang in die Gesetzgebung mit der Maßgabe, die Auswirkungen des Klimawandels bei Bewertung und Management von Hochwasserrisiken zu berücksichtigen [3] und wäre dann konsequenterweise beim Schutz von neuen und bestehenden Anlagen und Betriebsbereichen gegen natürliche, umgebungsbedingte Gefahrenquellen zu beachten [4].

Vor diesem Hintergrund ist es von Interesse, den vorhandenen Wissensstand zum Klimawandel bezüglich möglicher Auswirkungen auf die Anlagensicherheit kritisch zu beleuchten. Dabei geht es weniger um Fragen zu Ursache und Wahrscheinlichkeit globaler Erwärmung, sondern darum, bei welcher Entwicklung man gegen welche Wirkungen und Folgen Vorsorge treffen sollte und kann.

Die Daten aus dem Bericht des Weltklimarats der Vereinten Nationen von 2007 weisen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit darauf hin, dass die zwischen 1906 und 2005 beobachtete globale Erwärmung auf die anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen zurückzuführen sind.

Vor diesem Hintergrund ist es von Interesse, den vorhandenen Wissensstand zum Klimawandel bezüglich möglicher Auswirkungen auf die Anlagensicherheit kritisch zu beleuchten.

2 Unterschiede der Veränderungen von Wetter und Klima

Wetter ist die Gesamtheit kurzfristiger und verhältnismäßig kleinskaliger Veränderungen meteorologischer Parameter von Atmosphäre und Erdoberfläche wie Sonnenschein, Temperatur, Niederschlag, Luftdruck, Windfeld, Bodenfeuchte sowie weiterer Parameter auf der Basis eines langfristig (über mindestens 30 Jahre) als stabil und unverändert angesehenen Klimas. Das Klima setzt die Grenzen, in denen sich in einer bestimmten Klimazone oder an einem bestimmten Ort die meteorologischen Parameter jahreszeitlich und statistisch verändern. Dazu gehören auch die Wahrscheinlichkeiten bzw. Wiederkehrintervalle von extremen Wetterereignissen wie Starkregen oder Stürme, die mit Risiken für die Anlagensicherheit verbunden sind.

Eine Klimaveränderung, egal ob aus natürlichen oder anthropogenen Ursachen, ist eine instationäre Zustandsänderung des Klimasystems, die die Grundlage für Bezugsgrößen wie Mittelwert, Varianz und damit für Wiederkehrintervalle z. B. beim Bemessungshochwasser verändert. Wie sich diese Veränderungen zukünftig entwickeln können, lässt sich nicht mehr allein aus der statistischen Analyse vergangener Daten ermitteln. Es braucht zusätzlich Simulationen mit Computermodellen, die die relevanten Prozesse bei Klima, Abflüssen und Auswirkungen numerisch beschreiben. Da sowohl das wissenschaftliche Verständnis bei einigen Prozessen noch verbesserungswürdig ist als auch die numerische Umsetzung an Leistungsgrenzen der Computer stößt, sind die Simulationsergebnisse mit Unsicherheiten behaftet.

Im Unterschied zu Wetterprognosen, die das Wetter auf der Basis weitgehend deterministischer meteorologischer Prozesse vorhersagen, liefern Klimamodelle jedoch keine Prognosen, sondern verschiedene Projektionen zur zukünftigen Veränderung der Klimaparameter für verschiedene Szenarien zu Landnutzung und Emissionen. Diese beruhen auf unterschiedlichen demographischen, sozioökonomischen und technologischen Entwicklungsalternativen. Für jedes Szenario lassen sich langfristige Trendentwicklungen der Klimaparameter angeben, während eine Prognose spezifischer kurzfristig veränderlicher Witterungsverhältnisse in der Zukunft nicht möglich ist, zum Beispiel ob es in einem bestimmten Jahr feuchter oder trockener als im Mittel sein wird. Für ein Szenarium können sich verschiedene Rechenläufe eines Klimamodells unterscheiden und verschiedene Realisierungen unterschiedlicher Klimavariabilität in den Zukunftsprojektionen ergeben.

Der Unterschied zwischen Witterungsgrößen und Klimaparametern lässt sich am Beispiel des Hitzesommers 2003 mit über 80 000 zusätzlichen Todesfällen in Europa verdeutlichen [5]. Die Sommertemperaturen lagen um mehr als 5 °C über dem langjährigen Mittelwert seit Beginn der Messungen und um mehr als 2 °C über dem 1000-Jahr-Wiederkehrintervall [6]. Das ist statistisch so außergewöhnlich, dass man hierin ein Indiz für den Klimawandel sehen kann [7]. Im Klimawandel-Szenario A2, das nicht den *worst case* darstellt, wird ein Sommer wie 2003, der bisher außerhalb der Statistik lag, der Normalfall in den Vierzigern unseres Jahrhunderts sein und eher angenehm kühl jenseits von 2060.

3 Mögliche sicherheitsrelevante Veränderungen des Klimas

Die Analyse möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf eine Anlage betrachtet zuerst die geographische Lage und die sich daraus ableitbaren Verwundbarkeiten. Diese unterscheiden sich für unterschiedliche Klimazonen sowie danach, ob die Anlage an der Küste, an einem Fluss oder im Bergland steht. Das Umfeld einer Anlage und dessen Veränderungen sind Ansatzpunkte für eine anlagenbezogene Analyse der möglichen Klimawirkungen. Eine derartige Analyse kann sich an verschiedenen Regionalstudien zu den Auswirkungen des Klimawandels orientieren, z. B. [8] und [9].

3.1 Trendentwicklungen bei Klimaparametern und -wirkungen

Im Zusammenhang mit einer globalen Erwärmung denkt man zuerst an die oben aufgeführten Temperaturerhöhungen. Die allmählichen Veränderungen im Trend der Mittelwerte von Temperatur und Niederschlag lassen sich als Verschiebung von einer Klimazone in eine andere betrachten. Hier beobachtet man weltweit und am stärksten in Europa signifikante und starke Veränderungen. Beim Betrieb von Anlagen mag dies zwar bei Energie- und Wasserbedarf eine gewisse Rolle spielen, lässt sich aber sicherheitstechnisch einfach berücksichtigen.

Kritischer in Bezug auf die Anlagensicherheit sind die mit der Klimaänderung einhergehenden Veränderungen der Variabilität der Klimaparameter, insbesondere der Extreme die auch mit Naturkatastrophen einhergehen. Es ist noch unsicher, ob und wie stark sich in der von der Münchener Rückversicherung und anderen Institutionen beobachteten und in

Klimamodelle liefern keine Prognosen, sondern verschiedene Projektionen zur zukünftigen Veränderung der Klimaparameter für verschiedene Szenarien zu Landnutzung und Emissionen.

Die allmählichen Veränderungen im Trend der Mittelwerte von Temperatur und Niederschlag lassen sich als Verschiebung von einer Klimazone in eine andere betrachten.

Abb. 1 dargestellten Zunahme wetterbedingter Naturkatastrophen der Klimawandel widerspiegelt. Folgende Arten von hydro-meteorologischen Naturkatastrophen wurden erfasst:

- Meteorologische Ereignisse (45 %): Tropischer Sturm, Wintersturm, lokaler Sturm, Tornado, Hagel und Unwetter
- Hydrologische Ereignisse (37 %): Sturzflut, Flusshochwasser, Sturmflut, Massenbewegung (Erdrutsch)
- Klimatologische Ereignisse (9 %): Hitze-, Kältewelle, Dürre, Waldbrand

Datenbasis ist eine Analyse von knapp 17 000 Naturkatastrophen im Zeitraum von 1980 – 2007 durch die Münchener Rück [2]. Geophysikalische Ereignisse wie Erdbeben und Vulkanausbrüche mit etwa 9 % Anteil lassen keinen signifikanten Anstieg der Anzahl erkennen und wurden in Abb. 1 nicht berücksichtigt. Die möglichen Zusammenhänge zwischen Klimawandel und einigen hydro-meteorologischen Ereignissen sollen im Folgenden an Beispielen diskutiert werden.

Für direkte Klimawirkungen kann man aus fundamentalen physikalischen und biologischen Prozessen ableiten, dass die Wirkungen W disproportional mit steigender Temperatur T zunehmen. Eine Übersicht dazu findet sich bei [10].

Für niederschlagsbestimmte Klimawirkungen ändern sich infolge der zunehmenden Wasseraufnahmefähigkeit der Atmosphäre und dem damit intensivierten Wasserkreislauf die klimabezogenen Wirkungen z. B. von Fluten nach der Gleichung von Clausius-Clapeyron:

$$W(T) = w_0 + w_1 \exp(w_2 \Delta T) \quad (1)$$

Die Wirkfaktoren w_0 , w_1 und w_2 enthalten regionale klimatische und nichtklimatische Einflussfaktoren und müssen aus Beobachtungsdaten hergeleitet werden.

Für indirekte Klimawirkungen, die den Charakter von Schadensfunktionen haben, kann man verschiedene Potenzfunktionen ansetzen:

$$W(T) = w_0 + w_1 (\Delta T)^h \quad (2)$$

Solche vereinfachten Ansätze sind für eine erste orientierende Abschätzung verschiedener physikalischer und physiologischer Klimawirkungen nützlich, z. B. hinsichtlich möglicher Kosten für den Küstenschutz (parabolisch: $h = 2$), für Entwicklungen der Agrarproduktion (invers parabolisch), der Sturmschäden ($h = 3$) oder der Mortalität bei Hitzewellen ($h = 4$). Ein wissenschaftlich befriedigender Nachweis der Gültigkeit derartiger Beziehungen anhand von

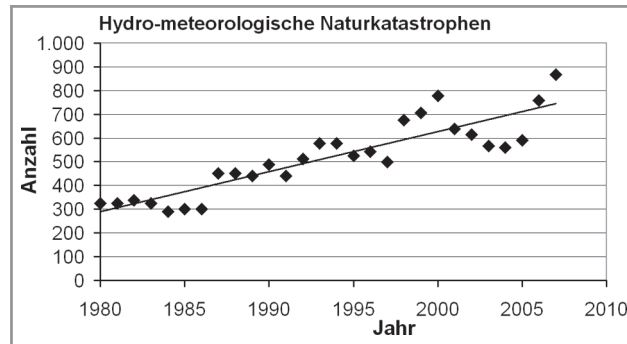


Abbildung 1. Anzahl hydro-meteorologischer Naturkatastrophen in den Jahren 1980 – 2007 nach Daten der Münchener Rückversicherung [2].

Daten aus Beobachtung oder Experiment fehlt allerdings weitgehend. Verschiedene Studien zu den Beziehungen zwischen Klimawirkungen und globalem Temperaturanstieg ergaben bisher nur wenige konsistente und nachvollziehbare Funktionsbeziehungen [11].

3.2 Risiken extremer Hitzeperioden

Am Beispiel der Auswirkungen des Extremommers 2003 in Europa lassen sich einige eher unkritische Probleme für die Anlagensicherheit ableiten wie Produktionseinschränkungen z. B. bei Kühlwassermangel oder Gesundheitsprobleme beim Betriebspersonal (Kreislaufprobleme, Schlafmangel, Abgespanntheit, Allergien, Aufmerksamkeitsdefizite). Ein wahrscheinlich größeres Risiko stellt die zu erwartende Zunahme bei Häufigkeit und Ausdehnung von Buschfeuern und Waldbränden in der Nachbarschaft einer Anlage dar. Für die Abschätzung des Brandrisikos werden Temperatursummenindizes verwendet, z. B. der Index M68 nach Käse beim Deutschen Wetterdienst DWD [12]:

$$W(T, e) = k_1 \sum_i \{ (T_i + k_2) \Delta e_i \} \quad (3)$$

mit T_i Tagestemperatur (mittags) in °C, Δe_i Dampfdruckdefizit gegenüber Sättigung in hPa, k_1 , k_2 Konstanten.

In Nordamerika verdoppelten sich etwa Anzahl und Flächengröße von solchen Feuern seit 1970 und je nach Szenario ist mit einer weiteren deutlichen Zunahme in diesem Jahrhundert zu rechnen. In Europa sind besonders Mittel- und Südeuropa betroffen, mit ähnlichen Trenderwartungen. Im Hinblick auf die Anlagensicherheit ist zu berücksichtigen, dass bei Hitze- und Dürreperioden niedrige Pegelstände in Flüssen und Seen ein Problem für die Verfügbarkeit von Löschwasser darstellen.

Für direkte Klimawirkungen kann man aus fundamentalen physikalischen und biologischen Prozessen ableiten, dass die Wirkungen disproportional mit steigender Temperatur zunehmen.

Ein wahrscheinlich größeres Risiko stellt für Anlagen die zu erwartende Zunahme bei Häufigkeit und Ausdehnung von Buschfeuern und Waldbränden in der Nachbarschaft dar.

Neben der Niederschlagsentwicklung kommen weitere nichtklimatische Einflussfaktoren bei Landnutzung, Wasserbau sowie Siedlungs- und Infrastruktur mit ihren Veränderungen hinzu.

Die Einschätzung der Risiken von durch Extremniederschläge ausgelösten Massenbewegungen gestaltet sich sehr komplex. Im Klimawandel können sich Risikozonen deutlich verschärfen und ausweiten.

3.3 Risiken extremer Niederschläge

Die Entwicklung beim Niederschlag ist im Vergleich zur Temperatur sehr viel unsicherer. Die Verteilung zeigt große räumliche Unterschiede und es gibt ausgeprägte jahreszeitliche Unterschiede. Im Winter findet sich sowohl ein Trend zu höheren Monats- und saisonalen Summen als auch eine erhöhte Variabilität, was verbreitet zu einer deutlichen Zunahme von extrem hohen Niederschlagssummen in dieser Jahreszeit führt. Im Sommer hingegen gibt es widersprüchliche Trends. Beobachtet werden für einige Großwetterlagen zwischen 1881 und 2001 eine abnehmende Anzahl von Starkregentagen (> 30 mm, Juni – August), weitere Großwetterlagen zeigen aber eine signifikant ansteigende Anzahl von Starkregentagen [13]. Auffällig ist z. B. ein Anstieg bei so genannten Vb-Wetterlagen. Diese Großwetterlage gab es z. B. bei den Hochwasserereignissen an der Oder 1997 und an der Elbe 2002 und wahrscheinlich auch beim bisher größten bekannten Hochwasserereignis in Mitteleuropa im Jahr 1342 (vor allem: Main, Rhein, Donau). Beim Elbehochwasser wurden extreme Stauniederschläge am Erzgebirge gemessen (312 mm in 24 h).

3.3.1 Bemessungsgrößen für Hochwasserereignisse

Für die in der Folge von extremen Niederschlägen auftretenden Flusshochwasser und lokalen Sturzfluten ist es noch schwieriger, zukünftige Entwicklungen im Klimawandel abzuschätzen. Als Unsicherheitsquellen kommen neben der Niederschlagsentwicklung weitere nichtklimatische Einflussfaktoren bei Landnutzung, Wasserbau sowie Siedlungs- und Infrastruktur mit ihren Veränderungen hinzu.

Am Beispiel von Hochwasserereignissen zeigt sich die Schwierigkeit in der Bewertung von Wetterextremen als statistische Größe mit gesellschaftlicher Schwellensetzung. Jedes statistische Verfahren ist eine Hilfskonstruktion zur Einschätzung von Risiken. Die Schätzgrößen zur Häufigkeit von Extremen basieren auf empirisch gemessenen Daten der Vergangenheit, für die methodisch Stationarität und Unabhängigkeit der Ereignisse angenommen werden müssen (Fisher-Tippet Theorem). Diese Voraussetzungen sind aber für Extreme im Klimawandel in der Regel nicht gegeben. Ähnlich wie auch bei Seedeichen werden Bemessungsgrößen für Flussdeiche auf der Basis von Flutjährlichkeiten (z. B. 100-jährige Wiederkehr) bestimmt. Weil bekannt ist, dass diese Messgrößen unsicher sind, werden bei-

spielsweise in Bayern Unsicherheitszuschläge von 10 – 15 % und zusätzlich ein Klimafaktor von 10 – 20 % addiert. Neuere methodische Entwicklungen zur Extremwertstatistik [14] zeigen jedoch, dass der Informationsgehalt empirischer Messreihen bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist und verbesserte Bewertungsverfahren einsetzbar sind. So zeigt die beobachtete Veränderung der Bemessungswasserstände für das Donaueinzugsgebiet unter Berücksichtigung von internen Korrelationen sowie Nichtstationarität, dass die Jährlichkeit von 100-jährigen Ereignissen entweder deutlich über- oder aber unterschätzt wurde. Im Mittel kann man für 100-jährige Ereignisse von 10 – 20 % zu niedrigen Wiederkehrschwellen ausgehen. Für das Einzugsgebiet ergeben sich sehr uneinheitliche Trendentwicklungen: einige Pegel zeigen einen steigenden, andere einen fallenden und wieder andere keinen Trend. Ein pauschaler mittlerer Klimazuschlag für alle würde angesichts des Aufwands von Deichertüchtigungen bedeuten, dass an einigen Stellen zuviel, an anderen dagegen zuwenig zugelegt würde.

3.3.2 Ausweitung von Risikozonen bei Massenbewegungen

Noch komplexer gestaltet sich die Einschätzung der Risiken von durch Extremniederschläge ausgelösten Massenbewegungen wie Muren- und Lawinenabgänge sowie Schlamm- und Gerölllawinen. Im Klimawandel erhöhen sich diese Risiken durch das Auftauen von Permafrostgebieten im Hochgebirge und eine möglicherweise weiter zunehmende Variabilität im Wettergeschehen. Dadurch können sich Risikozonen deutlich verschärfen und ausweiten.

Die Ausweitung von Risikozonen lässt sich an einem Fallbeispiel plausibel machen. Am 23.02.1999 forderte die Lawinenkatastrophe von Galtür in Österreich 38 Todesopfer. Betroffen war auch das bislang als sicher geltende Ortszentrum. Die Ausgangslage war eine Abfolge extremer Wettersituationen. Seit Januar brachten schwere Stürme über dem Nordatlantik immer wieder Niederschlagsfronten mit ergiebigen Schneefällen an der Nordseite der Alpen. Im Raum Galtür fielen bis zum 23. Februar etwa vier Meter Neuschnee. Dieser fiel in Form von trockenem und leichtem Pulverschnee mit nur geringer Bindungsfähigkeit, da in diesem Zeitraum gleichzeitig polare Kaltluft in den Alpenraum strömte. Außerdem traten immer wieder Stürme mit Windgeschwindigkeiten von oft über 100 km/h auf, wodurch es zum Aufbau extrem großer Schneewächten kam. Vor dem Beginn der ergiebigen Schnee-

fälle hatte sich an der Schneeoberfläche durch die Sonnenwärme tagsüber und durch Nachtfroste eine dünne Eisschicht gebildet, die mit dem später folgenden Pulverschnee nur eine sehr lockere Bindung einging. Zum Ursachenkomplex gehören also drei Faktoren, die im Klimawandel möglicherweise die Risiken erhöhen können:

- hohe Variabilität mit Wechseln zwischen Kalt- und Warmfronten,
- extreme Niederschläge über einen längeren Zeitraum und
- lang andauernder außergewöhnlich heftiger Winde aus Nordwesten.

Der letzte Faktor wird im Zusammenhang mit Sturmereignissen näher betrachtet.

3.4 Risiken großräumiger Sturmereignisse

Große ausgedehnte Sturmtiefs mit hohen Druckgradienten erzeugen hohe Windgeschwindigkeiten von über 75 km/h bei Stürmen und über 118 km/h bei Orkanen. Neben den Wirbelstürmen der Tropen existieren außerhalb der Tropen die Winterstürme.

3.4.1 Winterstürme

Bei Winterstürmen und, auch bereits erwähnt, bei Starkregenereignissen sind in den letzten Jahrzehnten signifikante Veränderungen bei einigen ursächlich damit verbundenen Großwetterlagen zu beobachten, die mit dem Klimawandel in Zusammenhang gebracht werden können. Für bestimmte Westwind-Wetterlagen in Europa (Zyklon West) konnte eine signifikante Zunahme der Andauer seit den Siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts gezeigt werden [15]. Dies ist in Abb. 2 deutlich zu erkennen, wobei die beiden Achsen die unterschiedliche zeitliche Dimension von Klima (x-Achse: 100 Jahre) und Wetter (y-Achse: 2 bis 4 Tage) wiedergeben.

Die Westwind-Großwetterlagen im Winter sind häufig auch mit extremen lokalen Niederschlägen und heftigen Stürmen verbunden, z. B. bei der zuvor diskutierten Lawinenkatastrophe von Galtür bzw. bei den verheerenden Orkanen Lothar, Ende 1999, oder Kyrill, Anfang 2007. Mit der Andauer A eines Sturms und etwa der vierten Potenz der Windgeschwindigkeit V steigen die Sturmschäden S deutlich an:

$$S(V, A) = k A V^4 \quad (4)$$

Auch bei den Windgeschwindigkeiten lassen sich Veränderungen beobachten. So zeigte sich

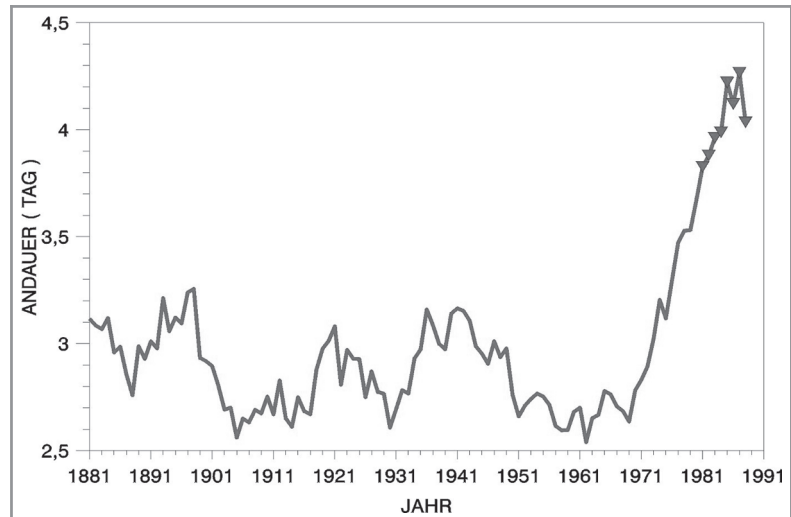


Abbildung 2. Ergebnis einer statistischen Analyse von winterlichen Westwind-Wetterlagen in Europa für den Zeitraum 1881 – 1991 [15]. Die Andauer in Tagen ist im zehnjährigen Mittel angegeben. Seit etwa 1970 nimmt sie signifikant zu. Diese Großwetterlagen sind mit Extremereignissen wie Starkregen und Stürmen verbunden.

im Zeitraum von 1952 bis 2003 eine markante Zunahme der Böengeschwindigkeit von 18,8 m/s auf 23,6 m/s in Tallagen, gemessen an der Station Karlsruhe [16]. An Bergstationen wie dem Feldberg im Schwarzwald konnte dieser Trend dagegen nicht beobachtet werden.

3.4.2 Sturmfluten an der Küste

Erfahrungen zum Risiko von Sturmfluten an der Küste sind über Jahrhunderte gewachsen und führten zu hoch entwickelten Schutzsystemen. Die Bemessungshöhe eines Deichs ist eine komplexe Größe, die sich aus Vergleichswerten (höchste jemals gemessene Wasserstände), statistischen Größen (Eintrittswahrscheinlichkeit für eine 100-jährige Flut), Sicherheitszuschlägen sowie Erfahrungen über Windrichtung, Windstau und seeseitiger Wellenaufbauhöhe zusammensetzt.

Mögliche Entwicklungen des Sturmflutrisikos an der Nordseeküste wurden bei der GKSS untersucht [17]. Die Sturmaktivität hat ab 1970 ähnlich zugenommen, wie Abb. 2 dies für die Andauer von Westwinden zeigt; sie nimmt nach 1995 aber wieder ab. Für die zukünftigen Fluthöhen wurden Modellrechnungen durchgeführt. Zusammen mit dem vom IPCC erwarteten Anstieg des mittleren Meeresspiegels um ca. 40 cm bis Ende des 21. Jahrhunderts ergibt sich dazu beim A2-Szenario mit einem moderaten Anstieg der mittleren Windgeschwindigkeit ein Gesamtanstieg bei Sturmflut um 70 cm. Eine solche Entwicklung würde zu einer Abnahme des Sicherheitsspielraums derzeitiger Küstenschutzmaßnahmen an der

In den letzten Jahrzehnten sind signifikante Veränderungen bei einigen Großwetterlagen zu beobachten, die mit dem Klimawandel in Zusammenhang gebracht werden können.

Ein erwarteter Anstieg des mittleren Meeresspiegels kombiniert mit einem moderaten Anstieg der mittleren Windgeschwindigkeit bedeutet einen Gesamtanstieg bei einer Sturmflut. Dies würde zu einer Abnahme des Sicherheitsspielraums derzeitiger Küstenschutzmaßnahmen an der Nordseeküste führen.

Bei tropischen Wirbelstürmen ist ein Zusammenhang mit der globalen Erwärmung naheliegend, da oberhalb einer Meeresoberflächentemperatur von 26,5 °C Kondensationswärme mit steigender Temperatur zunehmend in kinetische Energie umgesetzt werden kann.

Voraussetzung für die Bildung von Gewitterzellen ist ein großer vertikaler Temperaturgradient sowie eine instabile Schichtung in der Atmosphäre, die den Aufstieg großer Massen feuchter Luft ermöglicht.

Nordseeküste führen. Es wird daher ähnlich wie in Bayern beim Flusshochwasser überlegt, ob auch ein Klimaänderungsfaktor in der Bemessung von Höchstwasserständen eingeführt werden sollte.

Neue Ergebnisse deuten allerdings darauf hin, dass die Meeresspiegelprojektionen durch den IPCC zu niedrig sein könnten [18], denn das Abschmelzen von z. B. den grönländischen Eismassen beschleunigt sich, sodass der Anstieg 2100 durchaus bis zu 140 cm betragen könnte, wobei aber noch erhebliche Unsicherheiten bestehen. Für deutsche Küsten besteht dennoch hinsichtlich der Deichhöhen ein ausreichender Schutz (Höhe bis zu 10 m an der Nordsee und 3,5 – 6,5 m an der Ostsee). In den vergangenen Jahren wurde in den überarbeiteten Generalplänen zum Küstenschutz zudem als Ziel eine Erhöhung der Bemessungswasserstände um 50 cm vorgesehen. Sollten sich in den nächsten beiden Dekaden weiter wesentliche Veränderungen zeigen, kann darauf noch adäquat reagiert werden.

3.4.3 Tropische Wirbelstürme

Bei tropischen Wirbelstürmen (Hurrikan, Zyklon, Taifun) ist ein Zusammenhang mit der globalen Erwärmung naheliegend, da oberhalb eines Schwellenwerts der Meeresoberflächentemperatur von 26,5 °C mit steigender Temperatur zunehmend Kondensationswärme in kinetische Energie umgesetzt werden kann. Der Trend der Meeresoberflächentemperatur wiederum folgt dem Anstieg der globalen Erwärmung. Inzwischen liegen Messdaten und Computersimulationen dazu vor [19, 20].

Tab. 1 zeigt Simulationsergebnisse für einen Anstieg der CO₂-Konzentrationen, die im Mittel etwa 3 °C Erwärmung entsprechen [19]. Es ist eine Verschiebung in der Häufigkeitsverteilung hin zu schwereren Wirbelstürmen zu erkennen.

Noch deutlicher wird der Zusammenhang in den Daten, die Kerry Emanuel für tropische

Wirbelstürme im Atlantik und Pazifik analysiert hat [20]. Als Maß für die Zerstörungskraft eines Wirbelsturms definierte er einen vereinfachten Index PDI des Leistungspotenzials als Funktion der maximalen ständigen Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe V_{\max} und der Lebensdauer τ des Zyklons:

$$PDI = \int^{\tau} V_{\max}^3 dt \quad (5)$$

Trägt man diesen Index PDI in Abhängigkeit von der Meeresoberflächentemperatur auf, so erhält man einen Ansatz zur Abschätzung der möglichen Zunahme des Schadenspotenzials tropischer Wirbelstürme mit weiterem Temperaturanstieg im Klimawandel. Abb. 3 zeigt eine solche Auswertung auf der Basis von Emanuels Daten für tropische Wirbelstürme im Nordatlantik im Zeitraum von 1972 – 2003. Ähnlich sieht der Zusammenhang für Wirbelstürme im Pazifik aus.

3.5 Risiken lokaler konvektiver Ereignisse

Neben den großskaligen Wetterabläufen gibt es auch lokale konvektive Prozesse, bei denen Gewitterzellen bis hin zu so genannten Superzellen gebildet werden und verheerende Gewitter- und Hagelstürme mit hohen Windgeschwindigkeiten die Folge sein können. Voraussetzung für die Bildung von Gewitterzellen ist ein großer vertikaler Temperaturgradient sowie eine instabile Schichtung in der Atmosphäre, die den Aufstieg großer Massen feuchter Luft ermöglicht. Die Kondensationswärme wird auch hier bei der Konvektion frei- und in kinetische Energie umgesetzt. Bei einer Superzelle kommt es dabei zu einer hochreichenden, länger andauernden Rotation des Aufwinds, die in 10 – 20 % zur Ausbildung eines Tornados führt.

Das Risikopotenzial dieser konvektiven Prozesse besteht aus drei Komponenten mit steigender Relevanz für die Anlagensicherheit:

- extreme Niederschläge mit lokal begrenzten heftigen Sturzfluten,
- extrem hohe Windgeschwindigkeiten und
- Blitzschlag.

Die Schadenswirkung lokaler Sturzfluten hängt stark von der Orographie des Geländes und den vom Wasser mitgeführten Gegenständen ab. Hohe Strömungsgeschwindigkeiten liegen an steilen Hängen und an Querschnittsverengungen vor.

Windgeschwindigkeiten können Orkanstärke erreichen. Bei Tornados sind sogar höhere Windgeschwindigkeiten als in tropischen Wirbelstürmen möglich; jedoch sind solche Ereignisse relativ selten.

Kategorie	Wind [km/h]	Flutwelle [m]	Zentraldruck [hPa]	Anteil heute	Bei 220 % CO ₂
Tropischer Sturm	63 – 118	0 – 1			
1 (schwach)	119 – 153	1 – 2	> 980		
2 (mäßig)	154 – 177	2 – 3	965 – 979		
3 (stark)	178 – 209	3 – 4	945 – 964	18 %	6 %
4 (sehr stark)	210 – 249	4 – 6	920 – 944	71 %	57 %
5 (verwüstend)	ab 250	> 6	< 920	11 %	37 %

Tabelle 1. Für tropische Wirbelstürme zeigen Simulationsergebnisse eine Verschiebung in der Häufigkeitsverteilung zu höheren Kategorien [19].

In Bezug auf die Anlagensicherheit sind Blitze von besonderem Interesse. Bei einer Untersuchung von insgesamt 480 Tankfeuer-Ereignissen, die weltweit zwischen 1951 und 2003 erfasst wurden, konnten Blitze bei 150 Ereignissen als die dominierende Ursache identifiziert werden [21]. Andere Ursachen folgen erst mit Abstand. Als Auslösendes Ereignis kommen Blitze generell auch für andere Brand- und Explosionsereignisse in Anlagen in Frage, z. B. bei der Leckage von Druckbehältern [22].

Bei Blitzen beobachtet man eine Zunahme der Häufigkeit in den letzten Jahren; in Deutschland stieg beispielsweise die Anzahl der Blitze zwischen 2004 und 2007 von 4,9 auf 7,5 Blitze pro km [23]. Die Experten vom Blitz-Informationssdienst führen dies auf vermehrte und verbesserte Registriereinrichtungen zurück, was sicherlich eine Rolle spielt. Der Umstand, dass die Blitzhäufigkeit in den heißen Monaten des Jahres deutlich stärker ist als in kühleren, lässt einen Temperatureinfluss erwarten, der sich auch mit einer meteorologisch-statistischen Analyse nachweisen lässt (s. Abb. 4) [24]. Die Zahl der Blitze pro Monat Z_m steigt exponentiell mit der Monatsmitteltemperatur T_m an ($R^2 = 0,8158$):

$$Z_m(T) = a \exp(b T_m) \quad (6)$$

mit $a = 95,219$ und $b = 0,3749$.

Welche Entwicklungen sind im Klimawandel zu erwarten? Das Potenzial für die Entstehung von Gewitterstürmen lässt sich aus Konvektionsindizes ableiten. Diese wurden beispielsweise in einer Analyse der Universität Karlsruhe aus Radiosondenaufstiegen an der Station Stuttgart seit 1971 abgeleitet und analysiert [16]. Als entscheidender Parameter wird die CAPE (Convective Available Potential Energy) betrachtet, die die zum Antrieb der Konvektion vorhandene Energie der Atmosphäre wiedergibt. Dabei war für verschiedene Schwellenwerte ein signifikanter Anstieg im Zeitraum von 33 Jahren zu beobachten. Auch der Jahreshöchstwert nahm in dem Zeitraum um fast 170 % zu. Die sehr starke Zunahme der CAPE ist vor allem auf eine deutliche Erhöhung der bodennahen Taupunkttemperatur zurückzuführen. Aufgrund des sehr starken Anstiegs der CAPE kann der vorsichtige Schluss gezogen werden, dass sich die atmosphärischen Bedingungen dahingehend änderten, indem das Potenzial für Gewitter und schwere Gewitter im Zeitraum zwischen 1971 und 2003 zugenommen hat. Man kann daraus weiter die Erwartung ableiten, dass sich dieses Potenzial im Klimawandel weiterhin deutlich

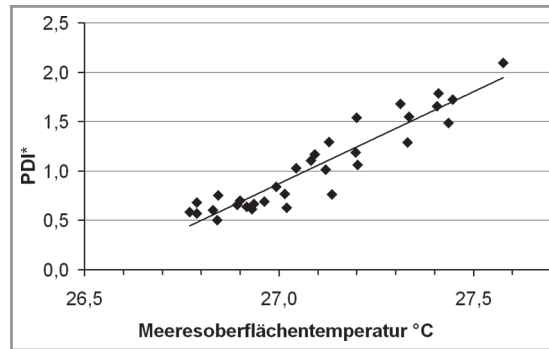


Abbildung 3. Abhängigkeit des Schadenspotenzials tropischer Wirbelstürme im Nordatlantik von der Meeresoberflächentemperatur nach Daten von K. Emanuel für den Zeitraum 1972 – 2003 [20] (<http://wind.mit.edu/~emanuel/home.html>). Der Index PDI* des Schadenspotenzials wurde auf den Wert des Jahres 2000 ($PDI^*_{2000} = 1$) normiert.

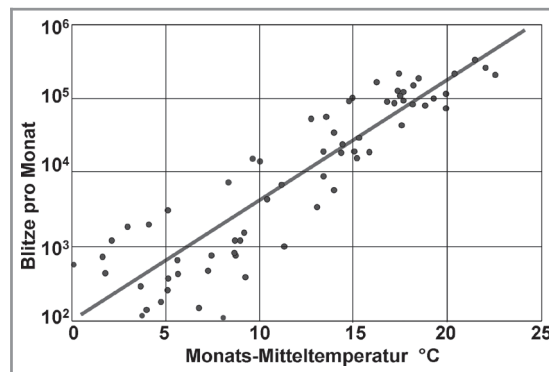


Abbildung 4. Anzahl von Blitzen in Abhängigkeit von Monatsmitteltemperaturen in Deutschland im Zeitraum 1992 – 1998, nach [24], mit Dank an P. Höpfe, Münchener Rückversicherung.

erhöhen wird, d. h. eine Zunahme von Gewittern, Blitzen und schweren Gewitterstürmen. Möglicherweise steigt auch das Risiko durch Tornados.

4 Zusammenfassung und Fazit

Für die Anlagensicherheit spielen umgebungsbedingte Gefahrenquellen eine besondere Rolle, die sich aus hydro-meteorologischen Extremereignissen ergeben. Dazu gehören insbesondere meteorologische Ereignisse wie tropischer Wirbelsturm, Orkan, Gewitter und Tornado, hydrologische Ereignisse wie Sturmflut, Flusshochwasser, Sturmflut und Massenbewegung (Erdrutsch, Lawine) sowie in geringerem Umfang klimatologische Ereignisse wie z. B. Hitze- und Dürreperioden mit der Folge erhöhter Waldbrandgefahr in der Umgebung. Für diese Ereignisse beobachtet man generell seit etwa 1970 eine Zunahme der Häufigkeit sowie teilweise auch der Parameter, die das Schadenspotenzial der Ereignisse erhöhen.

Bei Blitzen beobachtet man eine Zunahme der Häufigkeit in den letzten Jahren; in Deutschland stieg beispielsweise die Anzahl der Blitze zwischen 2004 und 2007 von 4,9 auf 7,5 Blitze pro km.

Zusammenhänge mit dem bereits laufenden Klimawandel (global etwa 0,8 °C Erwärmung) deuten sich an, sind aber noch relativ unsicher und nur für einige Prozesse ansatzweise nachvollziehbar. Die Zunahme des Risikos mit der Temperatur kann für tropische Wirbelstürme und lokale Konvektionsereignisse wie Gewitter quantifiziert, für andere Risiken der Bezug zur Temperaturänderung qualitativ aufgezeigt werden.

Als Fazit lässt sich feststellen, dass klimabedingte Risiken für Anlagen schon heute erkennbar sind und der Klimawandel eine starke nichtlineare Zunahme dieser Risiken erwarten lässt. Die aufgeführten Temperaturabhängigkeiten zeigen exponentielle Abhängigkeiten oder solche mit hoher Potenz, sodass bei stark zunehmender globaler Erwärmung neue Qualitäten erhöhter Risiken nicht auszuschließen sind. Für viele Prozesse werden einschneidende Veränderungen oberhalb von 2 °C Erwärmung erwartet, bei denen Risiken möglicherweise nicht mehr durch finanzierbare Schutzmaßnahmen begegnet werden kann. Für einen stärkeren Klimaschutz gibt es daher gute ökonomische Gründe!

Manfred Stock,
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung,
Postfach 601203, D-14412 Potsdam, Germany.

Literatur

- [1] *Climate Change 2007 - IPCC Forth Assessment Report*, 2007. www.ipcc.ch
- [2] *Topics Geo – Naturkatastrophen 2007*, Münchener Rück, München 2008.
- [3] *Entwurf zum Umweltgesetzbuch (UGB II)*, BMU, Bonn 2008.
- [4] H.-J. Warm, K.-E. Köppke, W. B. Krätzig, H. Beem, *Bericht UBA-FB-001047*, 2007.
- [5] J. Robine et al., *2003 Heat Wave Project*, EU Report 2005114, 2007.
- [6] C. Schär et al., *Nature* 2004, 427, 332.
- [7] S. Rahmstorf, H. J. Schellnhuber, *Der Klimawandel*, C.H.BECK, München 2006.
- [8] M. Stock, *Umweltwiss. Schadstoff.-Forsch.* 2004, 16 (2), 115.
- [9] M. Stock, *KLARA: Klimawandel – Auswirkungen, Risiken, Anpassung*, PIK-Report No. 99, Potsdam 2005.
- [10] N. Stern, *The Economics of Climate Change – The Stern Review*, Cambridge University Press, Cambridge 2007.
- [11] S. Hitz, J. B. Smith, *OECD*, Paris 2004, 31.
- [12] H. Käse, *Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der DDR*, Bd. 94, Akademie Verlag, Berlin 1969.
- [13] W. Fricke, U. Kaminski, *GAW Brief des Deutschen Wetterdienstes Nr.12*, Hohenpreißenberg 2002.
- [14] J. P. Kropp, H. J. Schellnhuber, *In Extremis: Trends, Correlations and Extremes in Hydrology and Climate*, Springer, Berlin 2009, in Druck.
- [15] K. Fraedrich, F. W. Gerstengarbe, P. C. Werner, *Clim. Change* 2001, 50, 405.
- [16] M. Kunz, C. Kottmeier, *Studie zur Häufigkeit und Intensität meteorologischer Ereignisse mit großem Schadenpotential in Baden-Württemberg*, Abschlussbericht im Rahmen des Projekts KLARA, Karlsruhe 2005.
- [17] K. Woth, *GKSS-Report 13*, Geesthacht 2006.
- [18] S. Rahmstorf, *Science* 2007, 315, 368.
- [19] T. R. Knutson, R. E. Tuleya, *J. Clim.* 2004, 17 (18), 3477.
- [20] K. Emanuel, *Nature* 2005, 436, 686.
- [21] H. Persson, A. Lönnermark, *SP Report 14*, Boras, Sweden 2004.
- [22] M. Stock, *DEHEMA Monogr.* 1987, 111, 199.
- [23] *BLIDS: BLitz Informations Dienst von Siemens*. www.blids.de/
- [24] D. Dinnes, *Diplomarbeit*, München 1999.