Kassandras Dilemma

Jacques Ambühl, Januar 2013
Übersetzung Brigitta Klingler, August 2014

Cet essai a été publié en français en 2013 dans la Revue MetoMagazine.

Kassandra, die trojanische Prinzessin, sieht die Zukunft. Hektor, der trojanische General, verteidigt seine Stadt vor dem Ansturm der Athener. Kassandras Zuverlässigkeit ist beschränkt, ihre Worte handeln von Wahrscheinlichkeiten. Hektor kennt die Schwächen seiner militärischen Aufstellung. In unserer Zeit würde man sagen: Er kennt sein Anfälligkeitsprofil. Wenn er Entscheidungen trifft, konsultiert er unter anderen auch Kassandra. Wie gestaltet sich die Zusammenarbeit der beiden?

Vor zweieinhalb Jahrtausenden von Homer in seinem Epos „Ilias" beschrieben, wird dieser Frage mit Blick auf die Beziehung zwischen einer Meteorologin und einem Nutzer ihrer Vorhersagen nachgegangen. Das Konzept eines Entscheidungsmodells für Wetteralarme wird vorgestellt. Die Analyse schlägt ein Schema für die optimale Entscheidungsfindung dieses Nutzers vor, indem sie einerseits ein Mass für die Leistung eines meteorologischen Alarmsystems hinzuzieht und andererseits die Anfälligkeit des Nutzers des Alarmsystems betrachtet.

Die Ungewissheit der Vorhersage ausdrücken

Der Schmetterlingseffekt, der besagt, dass der Flügelschlag eines Schmetterlings in Alaska einen Sturm in Europa hervorruft, ist allen bekannt. Diese Metapher drückt den chaotischen Charakter der Atmosphäre aus. Für den Physiker ist die Atmosphäre ein dynamisches, nicht-lineares System, dessen Entwicklung in kritischer Weise von seinem Anfangszustand abhängt: der Flügelschlag verändert diesen Anfangszustand unmerklich und macht damit jeden Versuch einer Prognose zunichte.

Die Meteorologin kann probieren, gegen die Natur anzukämpfen, indem sie versucht, ein unendlich genaues Beobachtungssystem aufzubauen, das alle Flügelschläge aller Schmetterlinge aufzeichnet – ein lächerliches Unterfangen, oder sie kann mit ihr spielen. Mit der Natur spielen bedeutet hier, nicht eine, sondern ein Ensemble von Anfangsbedingungen zu konstruieren. Alle, leicht ungenau, liegen nahe bei dem verdeckt gebliebenen Anfangszustand und vermögen deswegen trotzdem, dessen Essenz zu erfassen.

Unter der Bezeichnung Ensemblevorhersage wird diese Technik seit Ende der 90er-Jahre routinemässig am Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage ECMWF in Reading (England) angewandt. Parallel zur gewohnten deterministischen Prognose liefert das Zentrum zweimal täglich eine Ensemblevorhersage, welche sich auf den ganzen Planeten bezieht, zusammengesetzt aus 50 einzelnen Vorhersagen. Diese sind in Realität 50 Klone, die aus einem Anfangszustand stammen, der jedes Mal ganz leicht gestört wurde (Ref. 1). Seit Anfang dieses Jahrhunderts liefert MeteoSchweiz ebenfalls Ensemblevorhersagen unter dem Namen COSMO-LEPS (Ref. 2). Eine Ensemblevorhersage des ECMWF, welche sich auf die Niederschläge in Genf am 24. Dezember 2012 bezieht, wird als Beispiel in der Abbildung 1 dargestellt.

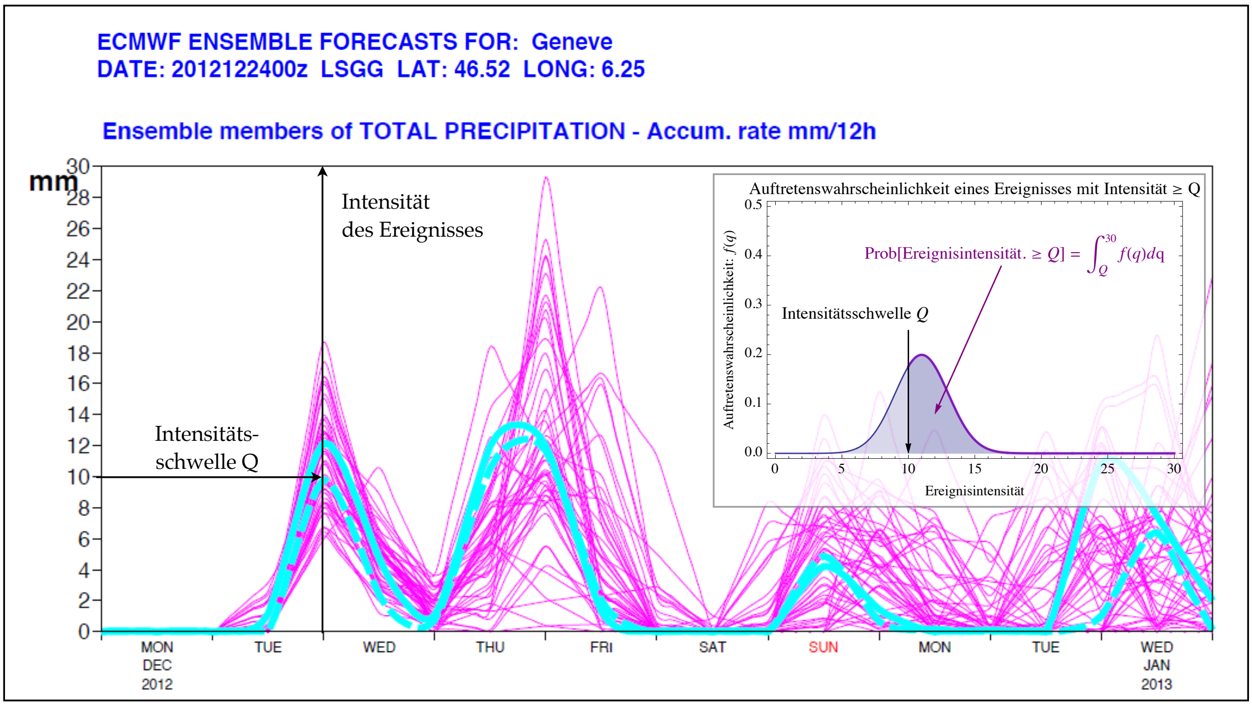

Abbildung 1. *Ensemblevorhersage ECMWF. Anfangszustand 24.12.2012, 00h. Ort: Genf. Niederschlag in mm kumuliert auf 12 Stunden. Vorhersagefrist: 24.12.2012-02.01.2013. Der chaotische Charakter des erhaltenen Signals ist offensichtlich. Die violetten Verlaufskurven zeigen die Niederschläge, die von jedem Ensembleglied vorhergesagt werden; das deterministische Modell und die Kontrolle sind in türkis dargestellt. Gemäss dieser Vorhersage regnet es im Wesentlichen in den Nächten von Dienstag auf Mittwoch, und von Donnerstag auf Freitag. Das Diagramm im Kästchen zeigt, wie man ausgehend von einem Schnitt in der Zeitachse, hier Mittwoch 00h, eine Wahrscheinlichkeit der Niederschlagsverteilung ableitet.*

Indem sie den chaotischen Charakter der zeitlichen Entwicklung erfasst, ist die Ensemble-Vorhersage eng an den Begriff der Wahrscheinlichkeit gekoppelt. Sie führt dazu, dass Berichte wie folgt formuliert werden: "*Die Wahrscheinlichkeit, dass die kumulierten Niederschlage zwischen Dienstag 18h und Mittwoch 6h in Genf über 10 mm betragen, liegt bei 51%*". Machen solche Aussagen Sinn? Mehrere Konzepte kreuzen sich hier: der Begriff des Wetterereignisses, "*eine Niederschlagsmenge, die an einem bestimmten Ort in einem bestimmten Zeitraum fällt*". Das Ereignis ist klar bezeichnet, es kann stattfinden oder auch nicht, und es kann im Nachhinein verifiziert werden. Ein Wahrscheinlichkeitsgrad ist auch gegeben: *51%*. Schliesslich stellt sich auch die Frage, ob 10 mm Niederschlag in 12 Stunden in Genf von Bedeutung sind oder nicht. Auf diese Fragen zu antworten läuft zuallererst darauf hinaus, dass man die Leistung eines probabilistischen Systems misst, dann aber auch, dass man das Profil eines Nutzers dieses Systems betrachtet. Gehen wir die erste Frage an!

Die Leistung eines Alarmsystems bewerten

Betrachten wir ein klar bezeichnetes meteorologisches Ereignis und ein Ensemble-Vorhersage-System, das jedes Mal einen Alarm auslöst, wenn die Wahrscheinlichkeit eines Eintretens dieses Ereignisses einen bestimmten Schwellenwert überschreitet. Mit Hilfe einer Statistik über einen langen Zeitraum wollen wir zwei Histogramme berechnen: Das erste stellt die Verteilung der Wahrscheinlichkeiten dar, die von unserem System angegeben wurden, wenn das Ereignis nicht stattgefunden hat; das zweite, wenn es stattgefunden hat. Bei einem qualitativ hochstehenden System erwartet man, dass es tiefe Wahrscheinlichkeiten angegeben hat in den Fällen, wo das Ereignis nicht stattgefunden hat und hohe, wo es stattgefunden hat. Die Abbildung 2, links, zeigt zwei solche Histogramme mit Punktsäulen. Die blaue Kurve $\boldsymbol{v(p)}$ idealisiert die Verteilung der Wahrscheinlichkeiten, wenn das Ereignis nicht stattgefunden hat, die rote Kurve $\boldsymbol{u(p)}$ die entsprechende Verteilung, wenn es stattgefunden hat. Im Einklang mit unseren Erwartungen sind die vom System gelieferten Wahrscheinlichkeiten im allgemeinen tief, wenn das Ereignis nicht stattgefunden hat (blaue Kurve) und eher hoch, wenn es stattgefunden hat (rote Kurve) .

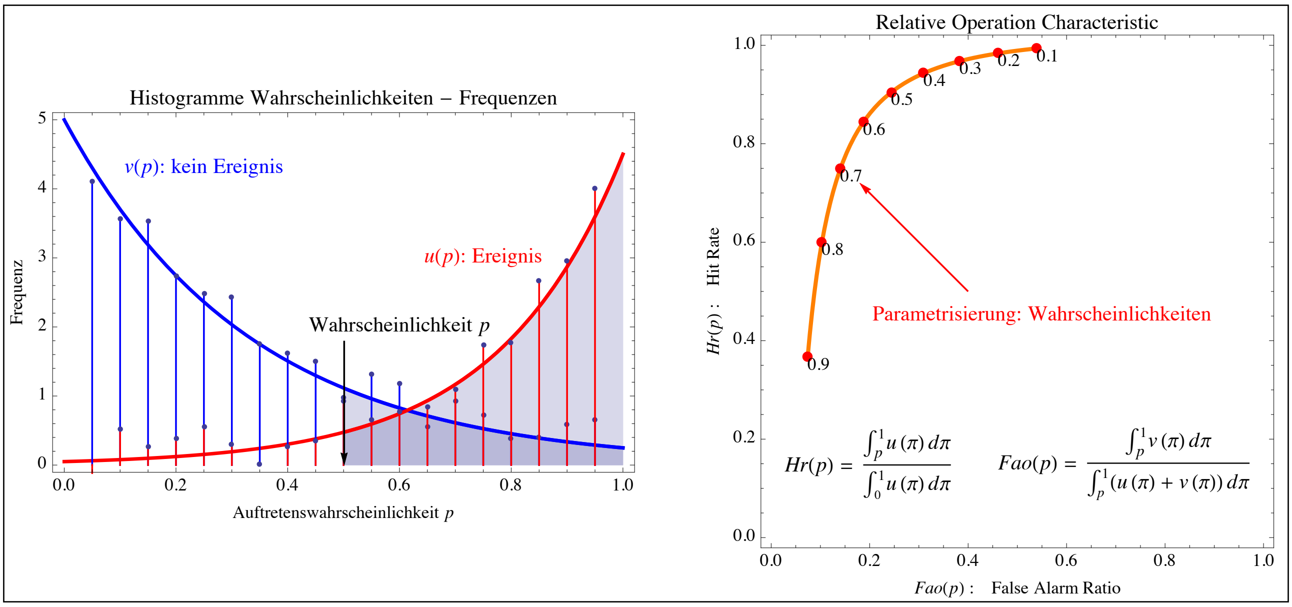

Abbildung 2. *Grafik links: Histogramme von Wahrscheinlichkeiten für ein bestimmtes Wetterereignis, die von einem Ensemble-Vorhersage-System geliefert wurden. Blaue Kurve : Vom System geliefertes Histogramm, wenn das Ereignis nicht stattgefunden hat. Rote Kurve : entsprechendes Histogramm für ein Ereignis, das stattgefunden hat. Grafik rechts : Grenzwertoptimierunskurve (ROC) eines Alarmsystems, das auf der betrachteten Ensemble-Vorhersage basiert. Mit einer gebogenen Abszisse, welche die Wahrscheinlichkeit ausdrückt, gibt die ROC-Kurve für jeden Wahrscheinlichkeitswert die Relation zwischen der Quote falscher Alarme (auf der x-Achse) und der Erfolgsrate (auf der y-Achse) an.*

Mit dieser Information ist es möglich, die Leistung des Vorhersagesystems zu beschreiben. Sie enthält einerseits die Erfolgsrate (Hit Rate), andererseits die Quote der falschen Alarme (False Alarm Ratio)[1]. Beide sind für das betrachtete Ereignis berechnet, mit den Schwellenwerten für die Intensität ***Q*** und für die Wahrscheinlichkeit ***p***. Formell ausgedrückt ist die Hit Rate ***Hr(p)*** das Verhältnis zwischen der Anzahl der korrekt vorhergesagten Ereignisse, für die ein Alarm ausgelöst wurde, und der Gesamtzahl der stattgefundenen Ereignisse. Die False Alarm Ratio ***Far(p)*** ist das Verhältnis zwischen der Anzahl der ausgelösten falschen Alarme, wenn das Ereignis nicht stattgefunden hat, und der Gesamtzahl der ausgelösten Alarme. Diese beiden Grössen können ausgehend von den Funktionen *u(p)* und *v(p)* integriert werden: die integralen Formeln sind in der Abbildung zwei, rechts, angegeben; sie entsprechen den schattierten Feldern der Grafik auf der linken Seite. Die so gebildete Kurve, deren gebogene Abszisse die Schwellenwerte für die Wahrscheinlichkeit ausdrückt, heisst Grenzwertoptimierungskurve (ROC- Relative Operation Characteristic) des Alarmsystems.

Im Beispiel von ROC zeigt sich zum ersten Mal das Dilemma der Kassandra: Man kann alarmieren, indem man einen niederen Schwellenwert für die Wahrscheinlichkeit wählt, dass das Ereignis eintritt, nämlich auf der äussersten rechten oberen Seite der Kurve. Damit deckt man die Mehrzahl der Ereignisse ab, zum Preis einer nicht akzeptablen Rate an Falschalarmen. Wenn man sich hingegen auf der untersten linken Seite platziert, wartet man sozusagen die Gewissheit für den Eintritt eines Ereignisses ab, bevor man alarmiert. Diese Wahl reduziert die Anzahl der falschen Alarme, erhöht jedoch die Menge der verpassten Ereignisse. In jedem Fall steigt die Qualität des Alarmsystems, wenn die ROC - Kurve sich in der oberen linken Ecke des Diagramms befindet. Das System ist perfekt, wenn es alle Ereignisse anzeigt und keinen falschen Alarm auslöst: ***Hr= 1** und **Far = 0***. Es ist ausgeschaltet wenn ***Hr= Far = 0.***

---

[1] Ich habe die angelsächsischen Ausdrücke übernommen im Bestreben, die Leserschaft am Jargon teilhaben zu lassen.

Man vermutet, dass ein guter Kompromiss in der Mitte der ROC – Kurve angesiedelt ist und einer mittleren Wahrscheinlichkeit entspricht, von ungefähr 0.5 - 0.6. Um diese Frage zu beantworten, muss man jetzt Hektors Anfälligkeitsprofil miteinbeziehen.

Die Anfälligkeit eines Nutzers messen

Die angewandte Methode, um dieses Profil zu bestimmen, bedient sich einer einfachen wirtschaftlichen Funktion, welche die Kosten eines den Nutzer treffenden Unglücks als Folge eines Wetterereignisses angibt – das kann eine Privatperson, eine Firma, ein Gebiet sein [Ref. 3 & 4]. Der Nutzer verfügt über Schutzmassnahmen, die er umsetzt, indem er den Vorgaben des Alarmsystems zuverlässig nachkommt. Folgende Fälle lassen sich unterscheiden: Das Ereignis erzeugt eine Katastrophe mit Kosten $\boldsymbol{L}$, wenn keine Schutzmassnahme ergriffen wurde. Jedes Mal wenn die Schutzmassnahmen ergriffen werden, erzeugen sie Kosten $\boldsymbol{C}$, die unter den Kosten $\boldsymbol{L}$ liegen – dies unabhängig davon, ob das Ereignis stattgefunden hat oder nicht. Kein Schutz ist zu 100% wirksam: Restkosten $\boldsymbol{R}$, viel tiefer als $\boldsymbol{L}$, verbleiben in der Folge eines Ereignisses, für das Schutzmassnahmen erfolgreich durchgeführt wurden. Die mittleren Kosten $\boldsymbol{M_{(Hr,\ Far)}}$, welche beim Eintreten des Wetterereignisses erzeugt werden, können also in der Form eines skalaren Produkts angegeben werden, in welches die Leistung des Alarmsystems, die Anfälligkeitsprofil des Nutzers und klimatische Kosten einfliessen [Ref. 4]:

$$\boldsymbol{M_{(Hr,\ Far)} = \textit{Klimatische Kosten} \ < \textit{Leistungsprofil} \mid \textit{Anfälligkeitsprofil} >}$$

Das Leistungsprofil des Warnsystems ist ein Vektor $\boldsymbol{LP_{(H,Far)} = [\ 1\text{-}H,\ H,\ H/(1\text{-}Far)\ ]}$. Es hängt von der Hit Rate und von der False Alarm Ratio ab. Das Anfälligkeitsprofil des Nutzers $\boldsymbol{AP_{(U,K)} = [\ 1,\ U,\ K\ ]}$, ist auch ein Vektor, Funktion von zwei Verhältnissen zwischen den drei Kosten L, R et C: die **Cost-Loss Ratio** $\boldsymbol{K = C/L}$ und die **Residual-Loss Ratio** $\boldsymbol{U = R/L}$.
Die **Klimatischen Kosten** (climatic burden) sind die mittleren statistischen Kosten, mit denen der Nutzer zu rechnen hat, wenn er keinerlei Schutzmassnahmen gegen das Klima trifft, mit dem er konfrontiert ist. Eine Analyse, die hier nicht präsentiert wird und die auf der Kombination Hit Rate - False Alarm Rate[2], beruht, erlaubt es diese Kosten zu evaluieren. Indem sie das Klima des Ortes einbezieht, wo sich der Nutzer befindet, berücksichtigt sie die bedingte Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Katastrophen als Folge von Wetterereignissen, die gleich oder über dem Schwellenwert Q, liegen, mit dem die Kosten L, R *und* C verbunden sind, welche mit der Intensität des Ereignisses ansteigen. Dieser Approach führt zur Definition der Klimatischen Kosten $\Omega\, L$, bei der L die Kosten einer « Referenzkatastrophe » und Ω ein integrales Mass für die Auswirkung des Kostenanstiegs sind.
Schliesslich kann man beweisen, dass die **Anfälligkeit** durch $\boldsymbol{E_{(Q)} = C/(L\text{-}R) = K/(1\text{-}U)}$ mit $\boldsymbol{R << L}$ et $\boldsymbol{C < L}$ ausgedrückt wird. Die Anfälligkeit beschränkt sich auf die Cost-Loss Ratio, wenn die Restkosten null sind, sie geht gegen unendlich, wenn sich die Restkosten denen einer Katastrophe annähern: In einem solchen Fall haben die Schutzmassnahmen jede Wirksamkeit eingebüsst.

Auf einer Wahrscheinlichkeitsbasis entscheiden

Legen wir nun den Schlussstein auf das Gebäude. Betrachten wir auf der einen Seite die Hit Rate und die False Alarm Ratio als die beiden Variablen der Funktion $\boldsymbol{M_{(H,\ Far)} = \Omega\ L < LP_{(Hr,\ Far)} \mid AP_{(U,\ K)} >}$, und behandeln wir auf der anderen Seite die Anfälligkeit $\boldsymbol{E = K/(1\text{-}U)}$ als Parameter. Nun übertragen wir diese Funktion in den Raum {Hit Rate - False Alarm Ratio} der Kurve ROC (Abbildung 3). Die Isolinien $\boldsymbol{M_{(H,\ Far)} =}$ ***Konstante***, von denen einige gezeichnet sind, erscheinen in diesem Raum als Iso-Kosten-Linien. Ihre Richtung hängt von der Anfälligkeit ab. Sie sind konvex und ihre Kostenwerte verkleinern sich in Richtung der oberen linken Ecke, ein Bereich, welcher die leistungsfähigen Alarmsysteme auszeichnet. Schliesslich ist die Kurve ROC konkav.

---

[2] Die False Alarme Rate wird in der Praxis oft anstelle der False Alarme Ratio verwendet. Sie unterscheidet sich aber von letzterer, indem sie die Zahl der unnötig ausgelösten Alarme pro Zeiteinheit angibt, in der Regel pro Jahr. Die False Alarm Rate ist wichtig für den Nutzer, die False Alarm Ratio für den Meteorologen [Ref. 4].

Also :

Es existiert eine einzige Iso-Kosten-Linie, die als Tangente die Kurve ROC berührt. Sie ist minimal in Bezug auf die Kosten und ihr einziger Berührungspunkt mit ROC definiert auf ROC den optimalen Wahrscheinlichkeits-Schwellenwert, ab dem der Alarm ausgelöst werden muss.

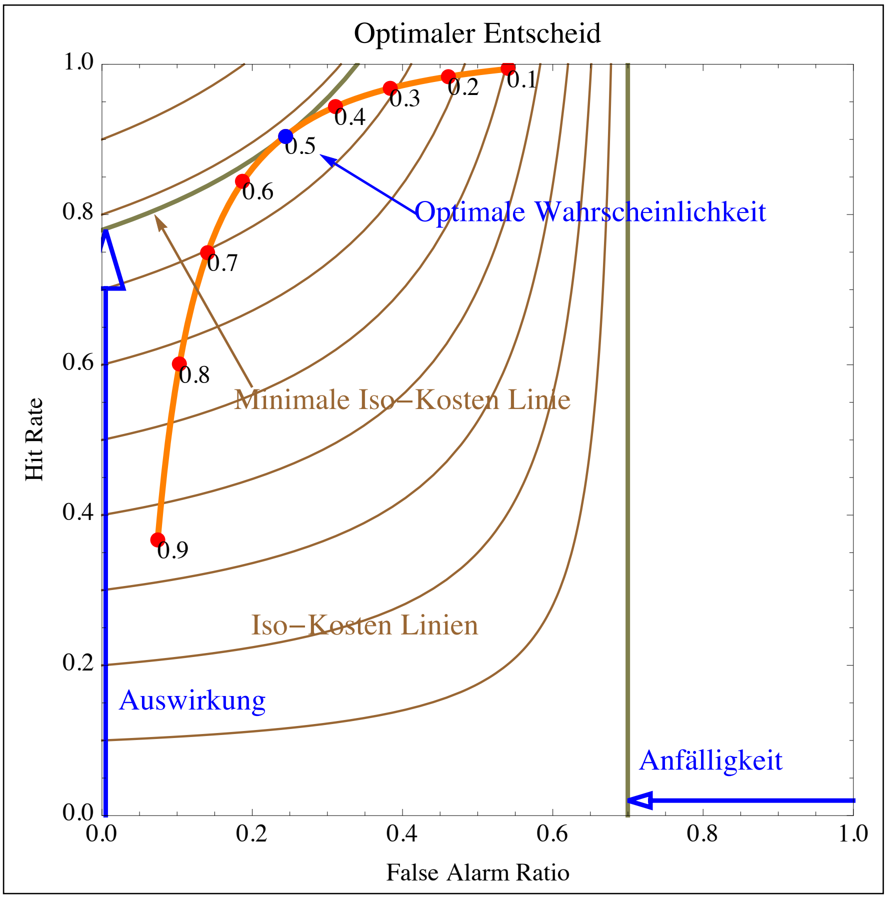

Abbildung 3: *Optimaler Entscheid und entsprechende Wahl des Schwellenwertes für die Alarmwahrscheinlichkeit : 51%. Orangefarbene Kurve : Leistungsprofil des meteorologischen Alarmsystems. Braune Kurven : Iso-Kosten-Linie der Anfälligkeit des Nutzers. Alle kritischen Parameter sind auf ihrem Optimum und können auf dem Diagramm abgelesen werden.*

Die übrigen Iso-Kosten-Linien, welche ROC kreuzen, tun das in zwei Punkten und illustrieren Kassandras Dilemma von neuem. Jenseits des Optimums zeigen sich zwei Lösungen. Die eine entspricht einer hohen Hit Rate und einer tiefen False Alarm Ratio, die andere einer tiefen Hit Rate und einer hohen False Alarm Ratio. Dadurch, dass sie auf derselben Iso-Kosten-Linie liegen, haben sie die gleiche Auswirkung (Impact) auf den Nutzer. Schliesslich verschmelzen sie im Berührungspunkt und lösen so das Dilemma auf. Zum Schluss können alle bestimmenden Werte des Optimums auf dem Diagramm abgelesen werden. Hit Rate: 0.9, False Alarm Ratio: 0.26, Alarmwahrscheinlichkeit 0.51, Impact: 0.77, Anfälligkeit: 0.3.

Im betrieblichen Alltag trifft der Nutzer seine Schutzmassnahmen bei jedem Alarm, das heisst jedes Mal, wenn die Wahrscheinlichkeit, dass das Wetterereignis eintritt, höher oder gleich dem oben definierten optimalen Schwellenwert ist.

Die Auswirkungen (Impact) des Alarmsystems beurteilen

Unsere zwei Akteure verfolgen verschiedene Ziele. Die Meteorologin versucht, die Leistung des Warndispositivs, für das sie Verantwortung trägt, zu verbessern. Der Nutzer will den Anteil der Schäden, die ihm das Warndispositiv einspart, kennen. Im Klartext will er die Auswirkung (**Impact**[3]) des Alarmsystems auf die Geschäfte, die er betreibt, messen. Indem sie dieser Erwartung entspricht, ist die folgende Definition des Impact klassisch [Ref. 3 & 4] und verwendet die eingeführten Begriffe ($M_{(0,0)}$: ausgeschaltetes System, maximale Kosten; $M_{(H,Far)}$: System und tatsächliche Kosten; $M_{(1,0)}$: perfektes System mit minimalen Kosten):

$$Impact = \frac{M_{(0,0)} - M_{(H,Far)}}{M_{(0,0)} - M_{(1,0)}}$$

Der Impact drückt das Verhältnis aus zwischen den Kosten, die der Nutzer mit Hilfe des tatsächlichen Alarmsystems einspart, und den Kosten, die er einsparen würde, wenn das System perfekt wäre. Er ist unabhängig vom Klima, mit dem der Nutzer konfrontiert ist, und beschreibt einzig die Interaktion zwischen den beiden Akteuren: $\Omega\ L$ vereinfacht sich zwischen Zähler und Nenner im obigen Ausdruck. Der Impact kann direkt auf dem ROC Diagramm abgelesen werden: Die Iso-Kosten-Linien sind auch die Iso-Impact-Linien; es wird aufgezeigt, dass jede Iso-Kosten-Linie die Vertikalachse des Diagramms auf einer Ordinate schneidet, die mit dem entsprechenden Impact identisch ist. Dieser Wert wird mit dem blauen, vertikalen Pfeil auf dem ROC Diagramm angegeben.

Die Abbildung 4 illustriert verschiedene Kombinationen zwischen Leistung des Alarmsystems und Anfälligkeit.

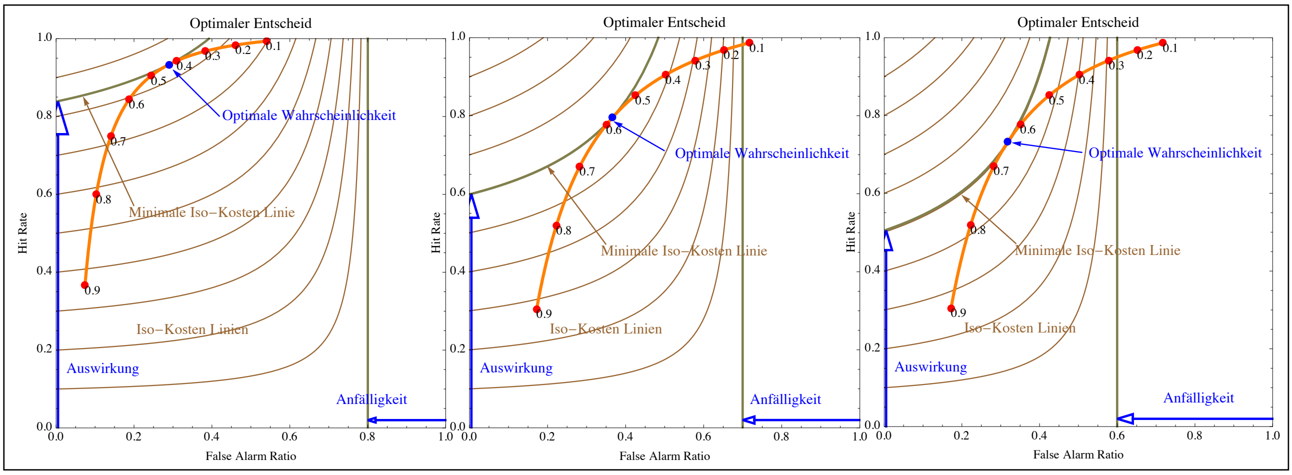

Abbildung 4. *Darstellung links: gleiche Leistung wie in Abbildung 3, geringe Anfälligkeit. Die beiden anderen Darstellungen: kleinere Leistung. Mittlere Darstellung: ursprüngliche Anfälligkeit, gleich wie in Abbildung 3. Darstellung rechts: Erhöhte Anfälligkeit. Der Impact nimmt von links nach rechts ab, während der Schwellenwert für die Alarmwahrscheinlichkeit wächst.*

Auf der Darstellung links ist die Anfälligkeit gering, doch die Leistung des Systems bleibt gleich wie die Leistung in Abbildung 3. Die Leistung des Warnsystems auf den beiden anderen Darstellungen ist verringert; in einem Fall mit der ursprünglichen Anfälligkeit, im anderen Fall mit einer erhöhten Anfälligkeit. Bei gleicher Leistung beobachtet man, dass der Nutzer seine Schutzmassnahmen bei einem niedrigen Schwellenwert für die Eintretenswahrscheinlichkeit aktiviert, falls seine Anfälligkeit tief ist: der Begriff der Kosten C für die Schutzmassnahmen ist tief, daher kann er eine grössere Anzahl falscher Alarme tolerieren. Im Gegensatz dazu aktiviert er seine Massnahmen bei einer höheren Eintretenswahrscheinlichkeit, wenn seine Anfälligkeit grösser wird und damit die Kosten für die Schutzmassnahmen steigen. Schliesslich stellt man fest, dass höhere Wahrscheinlichkeiten gewählt werden, wenn die Leistung des Systems sinkt. Der Impact reagiert in jedem Fall.
In den obenstehenden Abbildungen bleiben nur zwei Grössen im Rennen: auf der einen Seite die Anfälligkeit des Nutzers, auf der anderen der Impact des Alarmsystems. Alle aufgerufenen technischen

[3] Der Impact wird auf Englisch “Model Value”, “Economic Value” oder “Efficiency” genannt. Ich bevorzuge “Impact”.

Parameter, die als Gerüst gedient haben, fallen in der endgültigen Formulierung des konzeptionellen Modells weg.

Die Perspektive erweitern

Es ist einfach, subjektiven Kriterien den Vorzug zu geben und sich von monetären Begriffen freizumachen. Tatsächlich sind die technischen Parameter ohne Dimensionen: Hit Rate, False Alarm, Cost- und Residual Loss Ratios, Anfälligkeit, Impact. Wenn man zum Beispiel zur Überzeugung gelangt, dass *"das Eintreten eines solchen Unglücks mir zehnmal soviel Schaden zufügt wie die Massnahmen, die ich zum Schutz davor treffe"*, dann kann man die Cost-Loss Ratio auf 1/10 veranschlagen. Wenn der Restschaden fünfmal kleiner ist als der des Unglücks, ist die Anfälligkeit 1/8, das heisst 12.5%.

Eine erweiterte Perspektive, die hier nicht besprochen wird, läuft auf ein Verhältnis hinaus, das die Anfangsverteilungen $u(p)$ und $v(p)$ direkt mit der Anfälligkeit verbindet und damit die Gesamtheit der Berechnungen vereinfacht [Ref. 4]. Unsere beiden Akteure scheinen infolgedessen in einem Dualitätsverhältnis[4] zu stehen. Sobald die ROC Kurve bekannt ist, ein Wahrscheinlichkeits-Schwellenwert für den Alarm mit dem Nutzer vereinbart worden ist und dieser sich mit der Leistung des Systems zufrieden erklärt, liefert die Projektion "auf die andere Seite des Spiegels" die Anfälligkeit sowie den Impact des Alarmsystems auf seine Geschäfte – ohne dass er diese vorab gekannt hat.

Die Aufsichtsbehörden der meteorologischen Dienste, in der Schweiz das Eidgenössischen Departement des Innern, verlangen meistens keine Beweise für die Leistungsfähigkeit dieser Dienste, sondern ein Mass für ihren Impact, ihre Auswirkung, auf die Gesellschaft. Das vorliegende Modell erfüllt diese Erwartung. Das Projekt OWARNA (Optimierung der Warnungsabläufe), das gegenwärtig bei MeteoSchweiz im Gang ist, führt zur Anwendung der vorgestellten Konzepte.

Was passiert, wenn man eine Ensemble-Vorhersage wie ein Portfolio von Vorhersagen betrachtet? Unsere Hit Rate entspricht in diesem neuen Umfeld der Rendite eines Finanzportfolios und die Quote der Falschalarme ist mit seiner Volatilität, dessen eigenes Risiko, verknüpft. Unsere ROC Kurve entspricht einer analogen Kurve, die Grenze des effizienten Portfolios – Efficient Frontier » genannt, welche die beste Leistung beschreibt, die ein Portfolio in einem vorgegebenen Finanzmarkt erzielen kann. Die Meteorologen, die dazu neigen, allzu häufig zu warnen, die "exuberant warners", befinden sich im äussersten oberen Bereich der ROC Kurve. Es ist eine pikante Beobachtung, dass sie den abenteuerlichen Händlern entsprechen, die auf der Frontseite der Financial Time erscheinen, indem sie Milliarden pulverisieren: auch diese befinden sich im äussersten Bereich rechts oben auf ihrer « efficient frontier ».

Referenzen

1. Palmer T.N. and all. 2007. The Ensemble Prediction System, Recent and Ongoing Developments (ECMWF Technical Memorandum no. 504)
2. http://www.meteosuisse.admin.ch/web/en/weather/models/COSMO-LEPS_forecasts.html
3. Richardson D.S. 2000. Skill and Economic Value of the ECMWF ensemble prediction system (Q.J.R. Met. Soc. 2000; 126, pp. 649-667)
4. Ambühl J. 2020: Tuning meteorological warning systems_E

Adresse des Autors

ambuhl@icloud.com

[4] Die Mathematiker sprechen von « Dualität », die Physiker ziehen den Begriff « Spiegeltheorie » vor.