

# Herausforderungen und Perspektiven schlecht konditionierter Ortungsprobleme

Daniel ALTMANN<sup>1</sup>, Thomas THENIKL<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vallen Systeme GmbH, Schäftlarnener Weg 26a, 82057 Icking

Kontakt E-Mail: [daniel.altmann@vallen.de](mailto:daniel.altmann@vallen.de), [thomas.thenikl@vallen.de](mailto:thomas.thenikl@vallen.de)

**Kurzfassung.** Wie in vielen anderen Bereichen, in denen die TDOA-Ortung (Time Difference of Arrival) zur Anwendung kommt, ist auch die Analyse von Schallemissionsdaten von schlecht konditionierten Ortungsproblemen betroffen. Eine Arbeit von Ge und Mottahead [1] aus dem Bereich der Mikroseismik schlägt eine Art Qualitätsprotokoll vor und beschreibt eine Idee zum Umgang mit unterschiedlichen Wellentypen bei schwellwertbasierter Ankunftszeitbestimmung ohne dabei auf TR-Daten zuzugreifen. Wir möchten diese Idee im deutschsprachigen Raum populär machen und aufzeigen, daß mit diesen Ideen und vergleichsweise geringem Aufwand bereits Verbesserungen in der Ortung erzielt werden können.

## Struktur der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in zwei Teile; beide sind inspiriert von Ge und Mottahead [1]. Der Gedanke ist, die strukturellen Elemente der Datenanalyse, wie sie in der Mikroseismik verwendet werden, auf die Schallemission zu übertragen.

Im ersten Teil möchten wir auf bereits bekannte Probleme der Ortung von Schallemissionsquellen in der industriellen Praxis hinweisen. Uns ist klar, daß viele einzelne Aspekte bereits in der Forschungsliteratur abgehandelt wurden, diese sind jedoch nicht in der industriellen Praxis verbreitet. Um ganz konkret zu werden, hat beispielsweise die Genauigkeit und die Qualität eines Ortungsergebnisses keinen festen Platz in der automatisierten Analyse gefunden. Damit meinen wir nicht die Größe von Clustern, sondern vielmehr die Approximationsgüte zwischen den gemessenen Ankunftszeiten und denen des zugrundeliegenden Ortungsmodells. D.h. also: Die Antwort auf die Frage, wie gut die gemessenen Ankunftszeiten erklärt werden konnten, wird häufig nicht evaluiert. Die Idee, nach Gesichtspunkten der Fehlerrechnung und Statistik (und vor allen Dingen ohne Nutzung der TR-Daten), eine Verbesserung der Ortungsergebnisse zu erreichen, kommt von [1]. Die Analyse des Fehlers selbst wurde schon mit Nachdruck von [2] gefordert („Wir dürfen uns nicht mit der Berechnung [...] begnügen, ohne uns ein Urteil über die erreichte Genauigkeit respektive über die mittleren befürchteten Fehler [...] dieser Größen gebildet zu haben“) und von [2, 3] und vielen anderen durchgeführt. Eine mathematische Analyse, die unterschiedliche Wellentypen miteinbezieht, ist uns nicht bekannt.



Im zweiten Teil möchten wir als *proof of concept* (POC) eine Variante des USBM-Algorithmus vorstellen, die Ge und Mottahead [1] eventuell bereits bekannt ist; in der Arbeit wurde jedoch kein Pseudocode veröffentlicht. Unsere Implementierung ist ein simples *trial and error* - Verfahren, dem bestimmte Filterbedingungen bezüglich der Zielfunktion zugrunde liegen.

## Herausforderungen bei der Ortung von Schallemissionsquellen in der aktuellen industriellen Praxis

Die Ortung von Schallemissionsquellen hat viele Gemeinsamkeiten mit der Satellitennavigation, der Ortung von Erdbeben [2] oder mikroseismischen Aktivitäten. Gemeinsamkeiten mit den Geowissenschaften finden sich in der Präsenz unterschiedlicher Wellentypen und Moden im Signal und dem Phänomen der Plattenwellen. Ein wesentlicher Unterschied zur Satellitennavigation ist, daß man im AE-Bereich niemals über einen Zeitstempel des Emitters verfügt. Daher hat sich die Methode etabliert, die absolute Ankunftszeit herauszurechnen bzw. zu ignorieren, also *Zeitdifferenzen* zu betrachten – daher kommt der Name TDOA (*time differences of arrival*). Typische (lineare) Transformationen  $\mathbf{D}$  der Ankunftszeit im Falle von drei Sensoren wären

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(hier wird die Ankunftszeit des erstgetroffenen Kanals von allen anderen abgezogen) oder

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

(hier werden paarweise Differenzen gebildet). Gibt man eine bestimmte Emitterposition  $\mathbf{e}$  vor, so liegt folgende Notation nahe:

$$\mathbf{D}\vec{\mathbf{t}}(\mathbf{e}) = \Delta\vec{\mathbf{t}}(\mathbf{e}).$$

Dabei ist  $\vec{\mathbf{t}}(\mathbf{e})$  der Vektor der Ankunftszeiten. Hiermit ist natürlich der *theoretische* Zusammenhang gemeint. Bei einer realen Messung ergeben sich Ankunftszeitvektoren  $\vec{\mathbf{t}}$ , die keine exakte theoretische Entsprechung haben. Es gibt viele Varianten hier Ähnlichkeitsmaße  $d(., .)$  zu definieren, die auch von der Transformation  $\mathbf{D}$  abhängen können. Meist steht am Ende der theoretischen Überlegungen ein Minimierungsproblem der Form

$$\text{minimiere } d(\Delta\vec{\mathbf{t}}, \Delta\vec{\mathbf{t}}(\mathbf{e})) \text{ für } \mathbf{e},$$

wobei das erste  $\Delta\vec{\mathbf{t}}$  den Meßwerten entspricht und das zweite  $\Delta\vec{\mathbf{t}}(\mathbf{e})$  theoretischer Natur ist. In der akademischen Literatur sind seit längerem einige Sachverhalte bekannt:

1. Das klassische Ortungsproblem für drei Sensoren ist nicht für jede Geometrie eindeutig lösbar, d.h. selbst bei perfekten Ankunftszeiten gibt es mehrere Lösungen [3, 4]. Das Phänomen heißt in der Literatur *flip ambiguity*.
2. Auch bei vier oder mehr Sensoren kann es vorkommen, daß von realen Meßdaten verfälschte Ankunftszeiten dafür sorgen, daß es mehrere *lokale* Minima gibt. Wir haben hier keine Referenz, aber praktische Erfahrung mit der Zielfunktion aus [5]

und realen Daten. Das Problem taucht vor allem in der Nähe von Sensoren auf und ist unserer Ansicht nach inhärent. Ein Beispielplot folgt weiter unten.

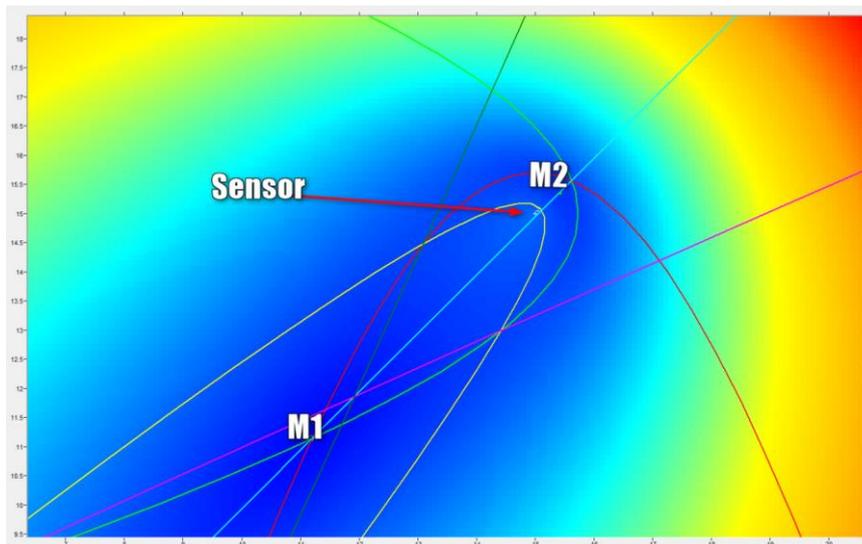
3. Zusätzlich hat man es sowohl in der Schallemission als auch in der Geologie mit unterschiedlichen Wellentypen zu tun, die eine stark unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit haben. Dieses Problem wird von dem pragmatischen Ansatz der schwellwertbasierten Ankunftszeitbestimmung verschärft, da dieser alleine keinen weiteren Anhaltspunkt zur Diskriminierung liefert.

Für das erste Problem gibt es ein Provisorium: Man schränkt die Ortung auf einen Bereich ein, in dem das Problem eindeutig lösbar ist. Damit verliert man einen Teil der Überdeckung. Hierbei sei angemerkt, daß es nicht ausreichend ist, die konvexe Hülle der Sensoren zu betrachten [3, 4]. Ansonsten kann man das Problem lediglich durch mehr Sensoren oder die Diskriminierung von Wellentypen anhand von TR-Daten vermeiden.

Das zweite Problem tritt vor allem dann zutage, wenn iterative Algorithmen zum Einsatz kommen, die mit *einem oder wenigen* Startpunkten arbeiten. Es ist technisch möglich globale Verfahren anzuwenden (differential evolution, particle swarm o.a.), die aber tendenziell zeitaufwendig sind und daher nicht zu jeder Applikation passen. Die folgenden beiden Aspekte müssen gegeneinander abgewogen werden:

- Der Anspruch an die Qualität der Ortungsergebnisse.
- Die erwartete Hitrate in Verbindung mit den Echtzeitanforderungen der Anwendung.

Wir sind noch einen Beispielplot schuldig, der die Problematik lokaler Minima auch für vier Sensoren untermauert. Die Plattenwellengeschwindigkeit wurde angegeben mit 550 cm/ms, die Sensorpositionen sind  $S1 = (15 \text{ cm} \mid 60 \text{ cm})$ ,  $S2 = (15 \text{ cm} \mid 15 \text{ cm})$ ,  $S3 = (60 \text{ cm} \mid 15 \text{ cm})$  und  $S4 = (60 \text{ cm} \mid 60 \text{ cm})$ . Die Reihenfolge der getroffenen Kanäle war 2, 3, 1, 4 und die Ankunftszeiten relativ zu Sensor 2 sind  $0,0 \mu\text{s}$ ;  $79,1 \mu\text{s}$ ;  $79,3 \mu\text{s}$  und  $115,3 \mu\text{s}$ .



Umgebung von Sensor 2. Reale Daten, die lokale Minima (M1 und M2) der Zielfunktion nach sich ziehen. Die Schnitte der Hyperbeln geben einen Eindruck, warum die Daten auf mehrere Arten erklärt werden können.

Das dritte Problem mag man als altes Leid oder als Teil der Lösung sehen. Es gibt mehrere Arbeiten, die sich mit der Konstruktion von *time picking* - Verfahren beschäftigen, d.h. Verfahren, welche die Ankunftszeit robuster und konsistenter im Sinne der Ortung bestimmen, als es das Schwellwertverfahren vermag. Vielversprechend scheint das Akaike-Information-Criterion zu sein, es wurde in [6] erfolgreich auf Volumenwellen angewendet.

Wir sehen Potential und Bedarf die Idee eines Rankings, wie es in [1] zu finden ist, auf die Schallemission zu übertragen. Der wesentliche Vorteil des Konzepts ist, daß dabei

nicht auf TR-Daten zurück gegriffen wird. Vielmehr wird die Konsistenz der Ankunftszeiten und die Residuen der einzelnen Kanäle in ein Ranking miteinbezogen.

Wir meinen mit dem Wort Ranking explizit nicht eine Bewertung durch den Prüfer, sondern eine automatisierte Bewertung der Ortungsergebnisse durch die Software. Man hat in der realen Anwendung, vor allem bei Druckprüfungen, keine Zeit für eine ausführliche, manuelle Analyse der Daten, sondern es muß gegebenenfalls schnell reagiert werden. Wir denken drei Eigenschaften sind wesentlich für die Priorisierung eventueller Kriterien:

1. Wie groß ist das Risiko, daß durch das Zutreffen eines bestimmten Kriteriums offenbart wird?
2. Falls ein Kriterium nicht zutrifft, ist im Sinne eines Umkehrschlusses ebenso gewährleistet, daß das entsprechende Risiko nicht vorliegt?
3. Wie leicht und robust kann das Kriterium automatisiert abgeprüft werden? Damit ist vor allen Dingen gemeint, daß eine sehr komplexe Analyse, die u.U. viel Rechenzeit benötigt, ein Kriterium unnütz erscheinen läßt, da es schlicht nicht *rechtzeitig* evaluiert werden kann.

Daher halten wir folgende Kriterien für geeignet:

1. **Überschreitet ein zonal geortetes Signal eine gewisse Schranke?** Durch eine zonale Ortung kann abgeschätzt werden, wie weit die Quelle höchstens vom erstgetroffenen Kanal entfernt ist. Eine entsprechende Voronoi-Unterteilung kann im Vorfeld der Messung berechnet werden und hängt, wenn man von Schweißnähten und anderen Besonderheiten absieht, nur vom Schallschwächungsprofil und der Sensorgeometrie ab. Wenn die erwartete Aktivität oder der Noise Level bei gegebener Sensorgeometrie keine zufriedenstellende Analyse zulassen, muß eine andere Sensorgeometrie mit eventuell mehr Sensoren verwendet werden. Uns scheint dieses Kriterium wichtig, weil es sehr schnell evaluiert werden kann und auf robuste Art den höchst möglichen Wert einer Amplitude am Ort der Quelle abschätzt. Unabhängig von eventuellen weiteren Schwierigkeiten bei der Ortung, hätte man hierdurch schnell wertvolle Information gewonnen.
2. **Bewegen sich die Ankunftszeiten im Bereich des stochastisch möglichen; macht eine genauere Ortung überhaupt Sinn?** Es gibt gewisse Kombinationen und Schranken für Ankunftszeiten, die kategorisch unmöglich sind – selbst wenn man mit Toleranzen arbeitet. Daher ist es wichtig, vernünftige Werte für diese Parameter im Vorfeld automatisch zu berechnen. Werden diese Schranken verletzt, so ist eine präzise Ortung statistisch unwahrscheinlich und sollte unterbleiben. Die Hoffnung ist, daß auf diese Art mehr Störgeräusche gefiltert werden, oder die Relevanz derselben zumindest an anderen Kriterien als der geschätzten Position festgemacht wird.
3. **Was wäre eine erste, schnelle Schätzung des Quellortes? Insbesondere: Die Unterscheidung von schnellen Schätzungen und exakten Schätzungen (optional).** Bei sehr kritischen Anwendungen könnte man mit *delta-t-mappings* arbeiten, um schnelle Aussagen über den potentiellen Quellort zu bekommen [7]. Hier gibt es zwei Varianten; in einer werden virtuelle Emitter Positionen simuliert, in einer anderen Variante werden manuell Bleistiftminenbrüche an verschiedenen Gitterpunkten durchgeführt. Für viele industrielle Anwendungen wäre dieser Prozeß in manueller Manier nicht mehr wirtschaftlich. Da die S0/A0-Ausbreitung jedoch prinzipiell in Software simulierbar ist, steckt hier einiges an Potential.
4. **Was ist die exakte Schätzung der Quellposition?** Die klassische Ortung durch Ankunftszeitdifferenzen liefert schon heute einen Zielfunktionswert – eine Art Approximationsgüte der gemessenen Ankunftszeiten durch das theoretische Modell. Man kann mit künstlichen Quellen unterschiedlicher Magnitude eine Schranke

etablieren und so einen *sanity test* für Ortungen definieren. Quellortungen während der Druckprobe, die eine im Vorfeld ermittelte Schranke nicht befriedigen, müssen zonal behandelt werden, was wiederum eine *worst case* Abschätzung für die Amplitude wie in Punkt 1 bedeutet.

5. **Weitere Qualitätsmerkmale einer exakten Schätzung.** Können Quellpositionen durch Ankunftszeitdifferenzen geortet werden und wird die Schranke für den Zielfunktionswert befriedigt, so kann man weitere Qualitätsmerkmale betrachten:
  - a. Der Fall mit drei Sensoren ist in vielerlei Hinsicht kritisch und verdient daher eine eigene Behandlung. Insbesondere der Fall, daß die Quelle in Bereichen liegt, in denen keine eindeutige Ortung möglich ist, sollte das Ranking verschlechtern.
  - b. Es macht einen erheblichen Unterschied, ob die Ortung innerhalb der konvexen Hülle der Sensoren geortet wurde. Außerhalb der konvexen Hülle ist die Präzision sehr schlecht. Ein GDOP-Wert (GDOP, *geometric dilution of precision*) sollte hier in das Ranking eingehen.
  - c. Letztendlich sind auch lokale Minima ein Qualitätskriterium. Die Aufspürung derselben ist jedoch zeitaufwendig. Daher kann dieses Kriterium keine primäre Rolle spielen.

## Proof of Concept

Wir wollen an einem Beispiel illustrieren, wie man Teile der Ideen aus [1] mit vergleichsweise geringem Aufwand realisieren kann. Das selbst gesteckte Ziel ist, ohne Zugriff auf die TR-Daten, herauszufinden, mit welchem Wellenmodus man es primär zu tun hat. Der verwendete Ortungsalgorithmus ist der USBM-Algorithmus; er hat uns aus speziellen Gründen, die nicht Teil dieser Veröffentlichung sind, interessiert. Der Algorithmus ist relativ alt und benötigt mindestens vier Sensoren für eine Ortung in der Ebene. Er hat gegenüber den iterativen Verfahren jedoch einen Geschwindigkeitsvorteil und eignet sich daher gut für einen *trial and error* - Ansatz. Wir teilen die Ansicht von Maochen Ge [8], daß eine Linearisierung der Ankunftszeitgleichungen nur möglich ist, wenn innerhalb des Systems eine einheitliche Ausbreitungsgeschwindigkeit angenommen werden kann. Es ist jedoch möglich, das System entsprechend den auslösenden Wellentypen zu partitionieren. Entstehen bei einer solchen 2-Partition nur Teilsysteme mit mehr als 4 Sensoren, so kann jedes System getrennt linearisiert werden. Ab sieben Kanälen ist gewährleistet, daß mindestens eines der Teilsysteme das geforderte Minimum von 4 Kanälen für den USBM-Algorithmus Kanälen besitzt.

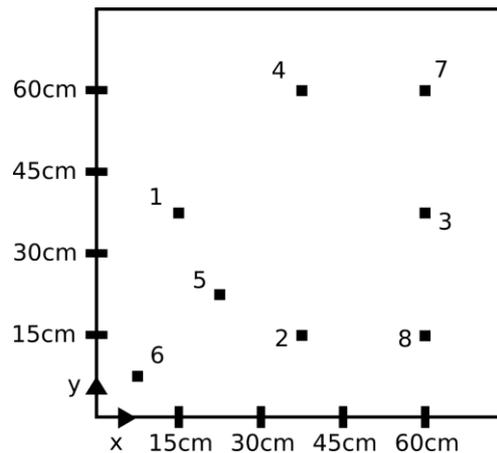
Auch in [9] wird die Redundanz des Systems ausgenutzt, jedoch schien uns eine Anpassung des Schwellwertes oder der Ausbreitungsgeschwindigkeit in unserem Kontext nicht zielführend. Die Schätzung der Ausbreitungsgeschwindigkeit erhöht die Anzahl der notwendigen Gleichungen im USBM-Algorithmus um eins. In einer hoch dotierten wissenschaftlichen Anwendung, in der die Anzahl der Kanäle nicht sparsam berechnet werden muß, wäre eine Kombination des Verfahrens aus [9] mit der Partitionsmethode aus [1] denkbar. Nichtlineare Verfahren sind geeignet um mit beliebigen Partitionen umzugehen, da jeder Kanal mit einer eigenen Wellengeschwindigkeit gerechnet werden kann (siehe auch [8]).

Unser Ansatz ist sehr pragmatisch: Wir lassen nur homogene, zusammenhängende Partitionen zu, d.h. es erfolgt keine Partition der Form [..., S<sub>0</sub>, A<sub>0</sub>, S<sub>0</sub>, A<sub>0</sub>, ...] (verschränkter Fall). Wir verwendeten für das POC insgesamt acht Kanäle, von denen jedoch nur die ersten sieben für eine Partitionierung verwendet wurden. Unsere Version der Ideen aus [1] sieht also wie folgt aus:

- Es werden Partitionen angenommen und systematisch durchgetestet – die Kanalnummern ergeben sich aus der Reihenfolge der Schwellwertüberschreitungen; Die geforderte Mindestzahl für Kanäle bei  $S_0$ -Ortungen war sechs und für  $A_0$ -Ortungen sieben, d.h.  $A_0$ -Ortungen verwendeten stets die ersten sieben Kanäle und nur eine Partition. Das läuft auf die Partitionen [1, 2, 3, 4, 5, 6], [2, 3, 4, 5, 6, 7], [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] für eine  $S_0$ -Ortung, und auf die triviale Partition [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] für eine  $A_0$ -Ortung hinaus. Kleinere Partitionen begünstigten Fehlortungen und litten bei unserer Implementierung unter *overfitting* – soweit unser Eindruck.
- Es wird für jede Variante eine Zielfunktion evaluiert. Die Zielfunktion bestraft Lokalisierungen außerhalb gewissen Schranken; effektiv werden dadurch absurde Resultate ausgefiltert. Ferner unterliegen die Resultate gewissen Filterbedingungen.
- Am Ende wird das Ortungsergebnis zurück geliefert, welches den geringsten Zielfunktionswert erreicht und den Filterbedingungen genügt.

Um nochmals auf den vorigen Gedanken zurück zu kommen: Falls deutlich mehr Kanäle zur Verfügung stehen, wäre es interessant den verschränkten Fall zu betrachten. Wir vermuten jedoch, daß willkürliche Kombinationen unter zu hohem Rechenaufwand leiden und anfälliger für *overfitting*-Phänomene sind.

Unser Setup ist in einer Grafik weiter unten veranschaulicht. Es ist eine Kombination aus einem recht gewöhnlichen Setup, Sensoren 1 bis 4, zusammen mit ein paar Asymmetrien.



Geometrie / Kanalpositionen

Die Koordinaten unserer Sensoren in [cm] sind:

1	15	37,5
2	37,5	15
3	60	37,5
4	37,5	60
5	22,5	22,5
6	7,5	7,5
7	60	60
8	60	15

Der Hintergedanke ist der, daß es bei symmetrischen Layouts tatsächlich zu uneindeutigen  $\Delta \vec{t}$ -Mustern kommen kann, d.h. Mustern, die sowohl durch  $S_0$  als auch durch  $A_0$  Ankunftszeiten erklärt werden können. Ein einfaches Beispiel wäre die Situation einer Quelle im Zentrum eines quadratischen Sensorlayouts. Hier wird keine Diskriminierung der

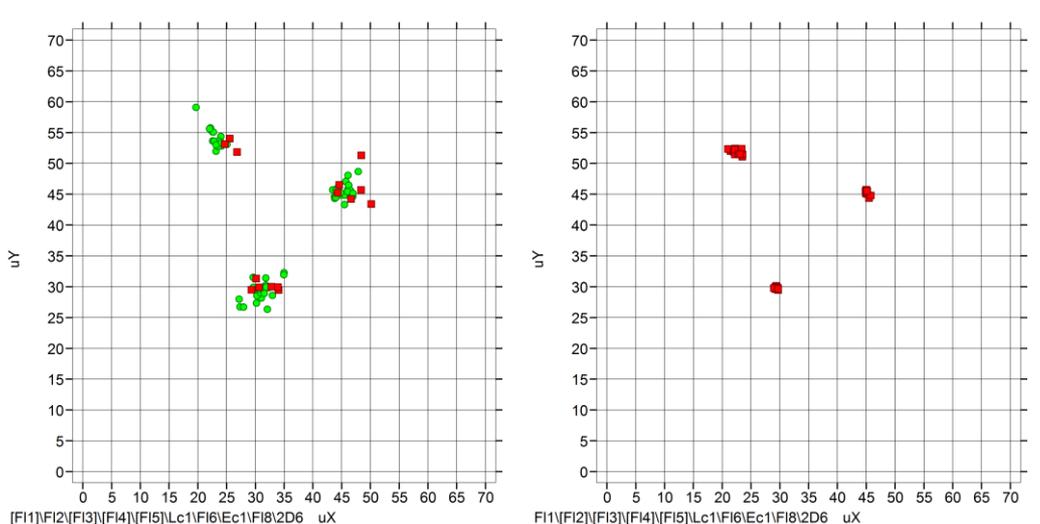
Wellentypen anhand der Ankunftszeiten möglich sein – beide liefern den Nullvektor als  $\Delta \vec{t}$ -Muster. Klassische Untersuchungen der GDOP sind also nur bedingt anwendbar. Tatsächlich von Interesse ist der minimale Abstand bestimmter gekrümmter Flächen: Man kann jeder Partition zusammen mit möglichen Emitterpositionen eine gekrümmte Fläche zuordnen, nämlich das  $\Delta \vec{t}$ -Muster der entsprechenden theoretischen Ankunftszeiten. Da diese Flächen im allgemeinen in einem Raum der Dimension „Anzahl der Sensoren - 1“ eingebettet sind und es exponentiell viele Partitionsmöglichkeiten gibt, machen veranschaulichende Plots an dieser Stelle wenig Sinn. Eine Diskriminierung der Wellentypen durch die Ankunftszeiten ist um so leichter möglich, je größer der Minimalabstand dieser Flächen ist. Verständlicherweise können die Flächen um so schlechter voneinander getrennt werden, je mehr es von ihnen gibt – sprich je mehr Partitionen betrachtet werden. Das mag aus Sicht der Theorie unterstreichen, warum die Einschränkung auf ein paar wenige Partitionen zu einem guten Ergebnis geführt hat.

Um sowohl schwache als auch starke Quellen zu simulieren, haben wir künstliche Quellen auf zwei Arten simuliert.

1. Herkömmliche Bleistiftminenbrüche mit 0,5er Minen
2. Das Fallenlassen von kleinen 0,5er Minenbruchstücken aus einer Höhe von 26 cm

$S_0$ -Ortungen werden in Rot dargestellt,  $A_0$ -Ortungen in Grün. Den verschränkten Fall haben wir, wie gesagt, aus pragmatischen Gründen außen vor gelassen.

Es wurden sowohl Quellen durch Bleistiftminenbrüche als auch durch fallende Bleistiftminen an den Punkten (45 cm | 45 cm), (30 cm | 30 cm) und (22,5 cm | 52,5 cm) simuliert – jeweils 20 an der Zahl. Fallende Bleistiftminen lassen sich schwieriger zählen als Bleistiftminenbrüche, da sie unter Umständen mehrfach aufkommen.



*Links: Fallende Bleistiftminen auf den Punkten (45 cm | 45 cm), (30 cm | 30 cm) und (22,5 cm | 52,5 cm); Rechts, analog: Bleistiftminenbrüche*

## Zusammenfassung

Die Ergebnisse stimmen mit unseren Erwartungen überein: Die fallenden Bleistiftminen werden überwiegend über den  $A_0$ -Typ geortet, während klassische Bleistiftminenbrüche ausschließlich über den  $S_0$ -Typ geortet wurden. Entscheidend ist, daß der Algorithmus die Fälle automatisch voneinander trennt. Aus unserer Sicht bleibt dennoch einiges zu tun:

1. Eine mathematische Analyse der Zielfunktion und den Filterbedingungen zusammen mit einem statistischen Modell sollte den Algorithmus transparenter machen.
2. Die Verwendung von nichtlinearen Verfahren wird die Granularität der Partitionierung verbessern.
  - a. Es sollte dabei getestet werden, ab wann es zu *overfitting* kommt.
3. Es gibt sicher noch weitere Anhaltspunkte für den vorliegenden Wellenmodus. Wir vermuten dies würde sich positiv auf den Aspekt des *overfitting* auswirken, da der Suchraum dadurch stark eingeschränkt werden kann.

Trotz diesen Punkten ist es bemerkenswert, mit wie wenig Aufwand man die Ideen aus [1] erfolgreich anwenden kann.

## Referenzen

- [1] M. Ge & P. Mottahead, An automatic data analysis and source location system (ADASLS), Rockbursts and Seismicity in Mines 93: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> international symposium, Kingston, Ontario, 16-18 August 1993
- [2] L. Geiger, Herdbestimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten, Königliche Gesellschaft der Wissenschaftlichen Nachrichten, Mathematisch-physikalische Klasse, 1910, Heft 4
- [3] H. J. Rindorf, Acoustic Emission Source Location In Theory And In Practice, Brüel & Kjær Technical Reviews No. 2, 1981
- [4] J. Vesely, P. Hubacek, The Analysis of the Error Estimation and Ambiguity of 2-D Time Difference of Arrival Localization Method, International Journal of Communications, Issue 4, Volume 4, 2010
- [5] T. Thenikl, D. Altmann, H. Vallen, Quantifying Location Errors, EWGAE Proceedings 2016
- [6] A. A. De Ronde, D. P. Dobson, P. G. Meredith, S. A. Boon, Three-dimensional location and waveform analysis of microseismicity in multi-anvil experiments, Geophysical Journal International, 2007
- [7] M. G. Baxter, R. Pullin, K. M. Holford, S. L. Evans, Delta-T source location for acoustic emission. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007
- [8] M. Ge, Analysis of source location algorithms Part I and II; Journal of Acoustic Emission, 21 (2003) 14-24
- [9] V. Salinas, Y. Vargas, J. Ruzzante, L. Gaete, Localization algorithm for acoustic emission, Physics Procedia, Vol. 3, Issue 1, 2010