

# Die Geometrie von Meteorscatterverbindungen

Prof. Dr. Klaus von der Heide, DJ5HG

Seit Jahrzehnten wird Meteorscatter im VHF-Bereich zur Überbrückung von Entfernungen von 1000 – 2400 km benutzt. Mit der von Joe Taylor, K1JT, durch sein Programm WSJT eingeführten Betriebsart FSK441 ist Meteorscatter - einst eine Methode für Spezialisten - zu einem beliebten Sport geworden. Ziel von K1JT, war, auch die kurzen sogenannten Pings für den Funkverkehr zu nutzen. Diese Pings sind Streuungen an Meteorbahnen, deren Ionisation für eine Reflexion nicht ausreicht. Für die schwach ionisierten Bahnen gibt es ein einfaches Gesetz, das die Geometrie der Streuung beschreibt. Schon McKinley gibt in seinem Buch aus dem Jahre 1961 [1,2] quantitative Formeln an zur Berechnung der Empfangsenergie. Das Wissen darüber wird in der Praxis aber kaum genutzt. Das mag daran liegen, dass bislang die länger anhaltenden Reflexionen von hochionisierten Meteorbahnen bevorzugt wurden. Diese selteneren sogenannten Bursts werden auch für SSB-Verbindungen genutzt. Bei FSK441 jedoch sind die etwa 100 mal so häufigen kurzzeitigen schwachen Ionisationen wesentlich. Deshalb sollte man etwas über die Geometrie der Streuung wissen, um Zeitpunkt des QSOs und Antennenrichtung optimal zu wählen.

## Das Streugesetz

Das Streugesetz ist qualitativ mit einem Satz zu beschreiben: Die auf die Meteorbahn treffende Welle wird kegelförmig gestreut mit der Meteorbahn als Achse des Kegels, so dass die über die Meteorbahn geradeaus fortgeführte einfallende Welle auf dem Kegel liegt. Dies ist in Bild 1 dargestellt. Ein Meteor ist deshalb für eine gegebene Verbindung nur dann nutzbar, wenn

1. die Meteorbahn die E-Schicht durchquert
2. die Sendeantenne auf die Meteorbahn in der E-Schicht gerichtet ist
3. die Empfangsantenne auf die Meteorbahn in der E-Schicht ausgerichtet ist
4. die Empfangsantenne auf dem Streukegel liegt.

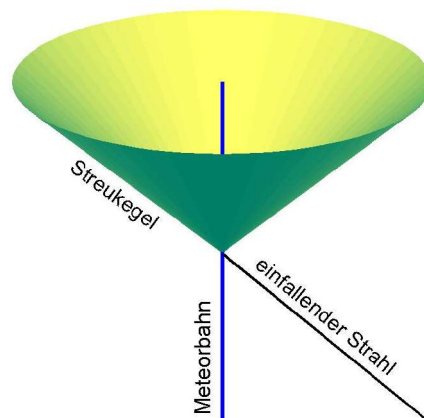


Bild 1

Geometrie des Streukegels

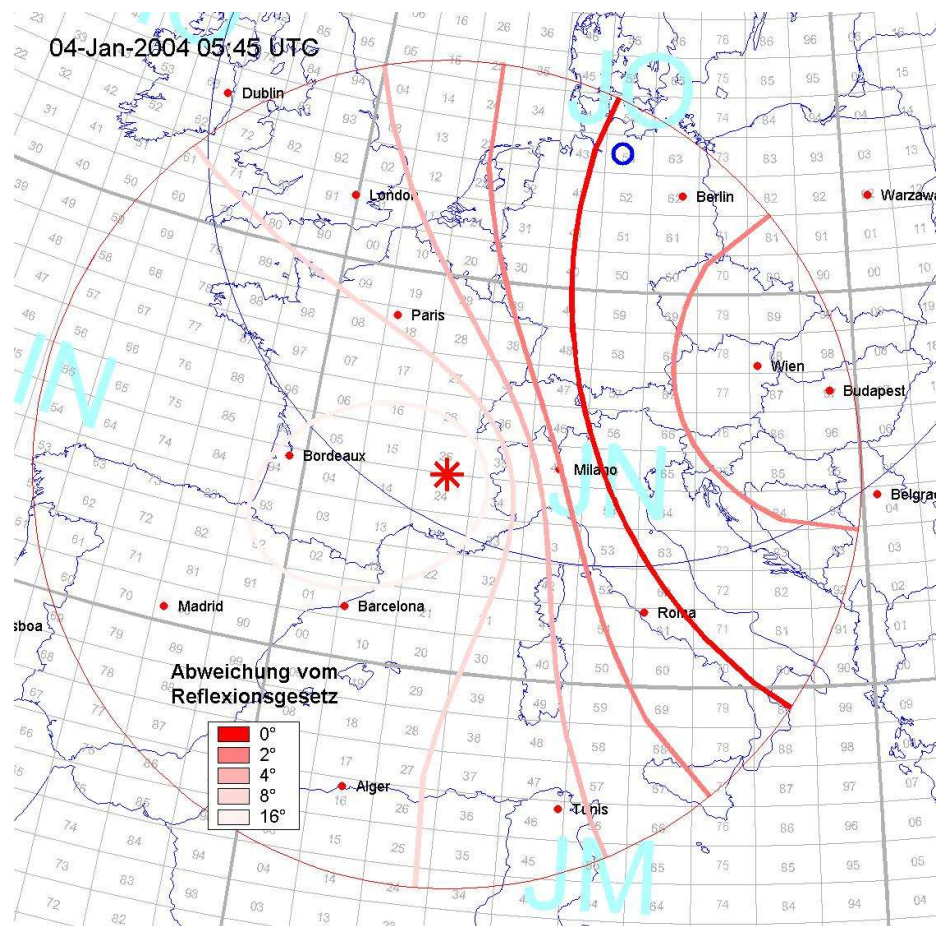
Die Kegelwand ist allerdings nicht unendlich dünn. Die ionisierte Meteorbahn nutzen wir nämlich als parasitären Strahler. Das Richtdiagramm dieses Strahlers ist der genannte Kegel, wobei die

Kegelwand im Querschnitt die Hauptkeule darstellt. Diese Hauptkeule ist wegen der Länge des parasitären Strahlers von vielen tausend Wellenlängen ziemlich scharf. Bei flachem Einfall der Kegelfläche (große Entfernungen!) kann das Schnittgebiet mit der Erdoberfläche dennoch recht groß sein.

## QSOs in bekannten Meteorschauern

Wir betrachten zunächst den Fall von QSOs in einem bekannten Meteorschauer. Dann ist der Radiant der Meteorbahnen bekannt. Die zugehörigen Sternschnuppen scheinen radial vom Radianten am Himmel auszugehen (daher der Name). Tatsächlich sind sie alle parallel. Man sieht aber nur die Projektion an die Himmelskugel. Der Radiant bewegt sich mit den Sternen am Himmel. Die Geometrie einer Verbindung ändert sich deshalb mit der Tageszeit. Es ist dabei nicht nur wichtig zu wissen, ob der Radiant über dem Horizont ist (nur dann gibt es Meteorbahnen), sondern auch, in welche Richtung die Streuung führt. Erst dann kann man sinnvoll CQ rufen, und nur dann begeht man nicht den fatalen Fehler, die Antenne auf einen schon erfolgten Anruf hin direkt auf den Anrufer auszurichten. Das minimiert nämlich fast immer den Erfolg und maximiert die Frustration gleich an zwei Enden.

Bild 2  
 Senderstandort JO53  
 In Südostfrankreich steil  
 von Nordost einfallender  
 Meteor (roter Stern).  
 Die Schnittlinie des  
 Streukegels mit der  
 Erdoberfläche ist als  
 dunkelrote Linie  
 eingezeichnet



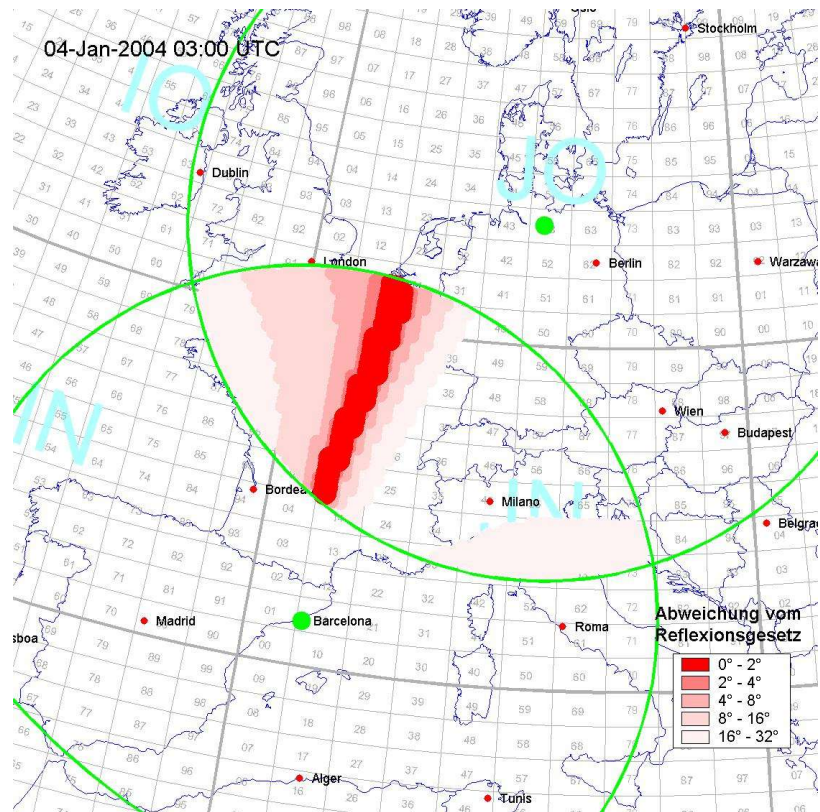
Zunächst betrachten wir den einfacheren Fall, bei dem die Meteorbahn und der Ort des Senders bekannt sind. Daraus kann die Lage des Streukegels berechnet werden und dessen Schnittlinie mit der Erdoberfläche. Natürlich ist von dieser Schnittlinie nur der Teil relevant, der vom Streupunkt aus über dem Horizont liegt. Bild 2 zeigt als Beispiel den Fall der Quadrantiden morgens um 5.45 UTC. Offensichtlich lohnt es sich vom Standort Hamburg aus in Richtung Barcelona/Mallorca CQ zu rufen, denn für ganz Italien ist das Streugesetz allein schon für einen einzigen Streupunkt erfüllt. Der Autor hat dies probiert und in schneller Folge mehrere I- und S5-Stationen mit QTF=205°

gearbeitet, in der Hoffnung dass diese nicht auf die Idee kommen, ihre Antenne nach Hamburg zu drehen. S5 geht zu dieser Zeit genauso gut. Das Reflexionszentrum liegt dann von Hamburg aus exakt in der selben Richtung, aber etwas näher.

Das Streugesetz ist bei den einzelnen Meteoren meistens nur für höchstens eine Gegenstation erfüllt. Die Tatsache, dass fünfzig Stationen im Europa gleichzeitig auf 144.370 MHz senden können (in der E-Schicht muss ein grauenvolles QRM herrschen) und man dennoch die einzelnen trennen kann, ist die Folge der Gültigkeit des Streugesetzes.

Bild 3

Die Reflexionsbedingung ist für die Strecke Hamburg-Barcelona im Fall der Quadrantiden um 3:00 UTC im rot markierten Gebiet erfüllt. Die grünen Kreise markieren jeweils die Schnittlinie des Horizonts mit der E-Schicht.



Der zweite Fall ist etwas komplizierter. Gegeben seien die Orte von Sender und Empfänger und der Radiant der Meteorbahnen sowie Datum und Uhrzeit. Wir fragen nach der Lage aller Streuzentren, die die Geometrie für perfekte Streuung zwischen den Stationen erfüllen. Als Beispiel für die beiden Orte wurde hier Hamburg und Barcelona gewählt. Meteorstrom und Datum sind wieder die Quadrantiden am 4. Januar. Weil der Radiant morgens um 8:20 Ortszeit im Zenit steht, stellt man den Wecker möglichst früh oder macht gleich die Nacht vom 3. zum 4. durch. Um 3:00 UTC sehen wir das in Bild 3 dargestellte Reflexionsgebiet. Es liegt deutlich neben der direkten Verbindung. Vier Stunden später ist das Reflexionsgebiet noch weiter westlich gedriftet, so dass die beiden Antennenrichtungen sich dort (hoffentlich!) im rechten Winkel treffen wie Bild 4 zeigt. Nach einer weiteren Stunde steht der Radiant zwischen beiden Stationen fast im Zenit. Dann kann das Streugesetz nirgends erfüllt werden außer angenähert ganz am Horizont. Bild 5 zeigt diese Situation. Man bedenke, dass zu dieser Zeit an diesem Ort maximal viele Metore fallen. Im Jahr 2004 fiel dieser Moment sogar mit dem ziemlich spitzen Maximum des Meteorstroms zusammen, und dennoch herrschte nach guter nächtlicher Aktivität plötzlich Ruhe auf dem Band – von wenigen schwachen Bursts abgesehen. Die Ruhe hält nicht lang. Eine Stunde später ist wieder voller Betrieb bei ausgezeichneten Signalen – sofern die Antenne gedreht wurde, denn das Reflexionsgebiet liegt jetzt auf der anderen Seite (Bild 6).

Bild 4

Je steiler die Meteore einfallen  
desto weiter liegt das  
Reflexionsgebiet von der  
direkten Verbindung

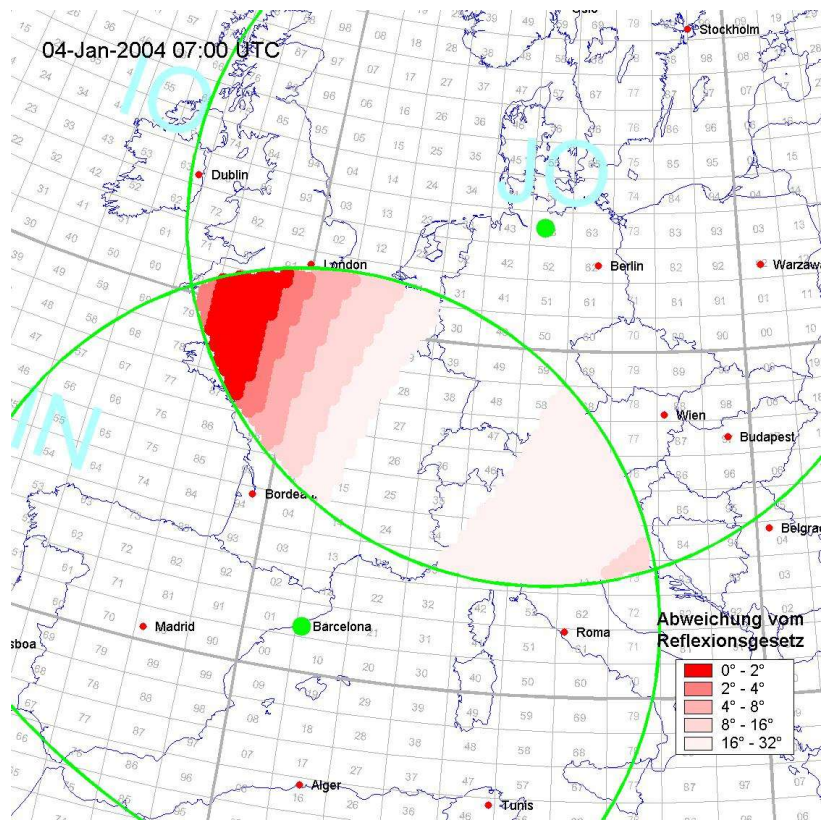
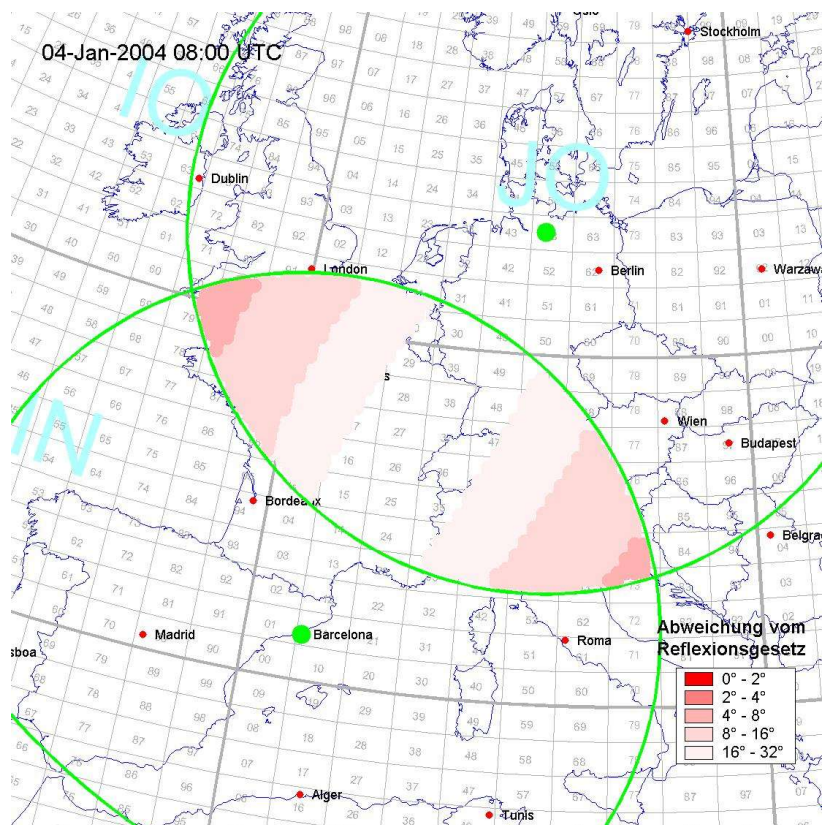


Bild 5

Senkrecht fallende Meteore  
erfüllen das Reflexionsgesetz  
für größere Distanzen nie



Gut zu sehen ist auf den Bildern, dass stark bündelnde Antennen durchaus angebracht sind. Man muss sich mit dem QSO-Partner nur einig sein. Das ist das Problem. Bei Random-Meteorscatter kann deshalb nur gelten: Hörst (besser: liest) du jemanden in mehreren Pings, so antworte, aber drehe die Antenne nicht. Falls aber in der Antennenrichtung mit Sicherheit kein Reflexionsgebiet

Bild 6

Von Westen einfallende Meteore erfüllen das Reflexionsgesetz nur östlich der direkten Verbindung

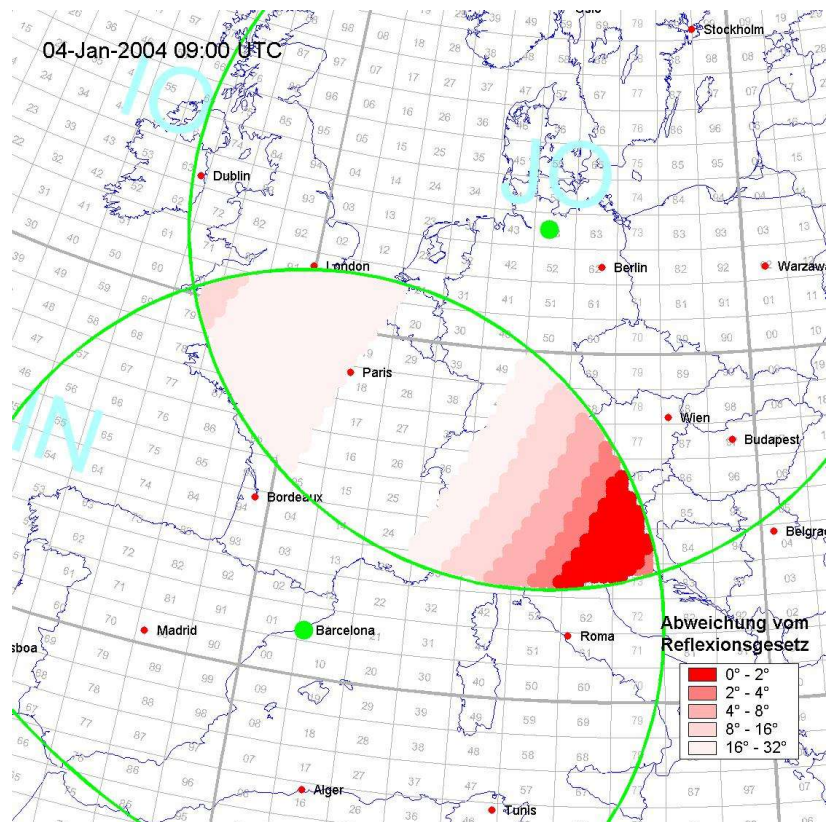
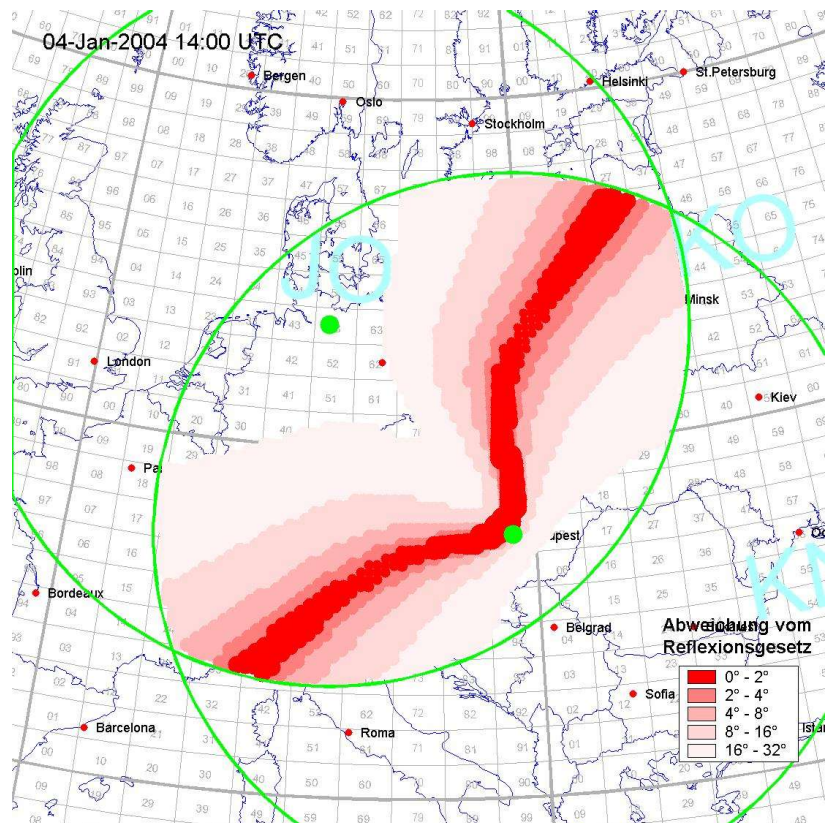


Bild 7

Bei kleinen Entfernungen kann das Reflexionsgebiet sehr groß sein. Im Fall der direkten Antennenrichtung nach JO53 muss die ungarische Antenne in diesem Fall die Elevation von 70° haben. Besser ist QTF = 0°



ist, dann richte die Antenne auf das Reflexionsgebiet und warte, ob der OM besser ankommt. Erst wenn er aus der geänderten Richtung auch mehrfach kam, sollte man auf Sendung gehen. Vermutlich werden die allermeisten Meteorscatterverbindungen mit verquer stehenden Antennen gefahren, weil man auf einen in einem Burst gelesenen CQ-Ruf antwortet. Dann kann man die

Pings nicht nutzen und muss auf weitere Bursts warten, und das kann dauern. Insbesondere QSOs mit Entfernungen unter 1000 km laufen meistens schlecht, weil die Ungewissheit über die Antennenrichtungen wegen der Nähe und Ausdehnung des Reflexionsgebietes groß ist. Bild 7 zeigt eine typische Situation. Der Leser möge sich zunächst in die Lage des Autors versetzen, der einem mit der nach Moskau gedrehten Antenne gehörten CQ-Ruf aus HA antworten möchte, und anschließend in die Lage des Ungarn, der den Anruf von DJ5HG hört anstelle eines erwarteten aus OH. Man bedenke dabei, dass im Fall der direkten Antennenausrichtung auf der ungarischen Seite eine Elevation von  $70^\circ$  erforderlich ist.

## Effizienz der MS-Verbindungen

Die Qualität einer Meteorscatterverbindung lässt sich aufgrund der bekannten Geometrie vorhersagen. Sie hängt ab erstens von der Größe des Gebietes, in dem die Reflexionsbedingung erfüllt ist und zweitens von den aktuellen Winkeln einschließlich der Polarisation. Man könnte meinen, auch die Höhe des Radianten über dem Horizont müsste wesentlich eingehen, weil pro Quadratkilometer der Ionosphäre bei sehr hoch stehendem Radianten mehr Meteore fallen als bei flach stehendem Radianten. Tatsächlich sind die Meteorbahnen bei niedrig stehendem Radianten aber länger. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit der Nutzbarkeit für eine gegebene Verbindung. Für die nachfolgend beschriebenen Rechnungen wurde eine maximale Länge der nutzbaren Meteorbahnen von 100 km angenommen. Dieser Parameter bestimmt wesentlich die vorausgesagte Effizienz bei niedrig stehendem Radianten. Bei den folgenden Bildern wird nicht unterschieden zwischen großer Häufigkeit der Meteorbahnen einerseits und großen Signalpegeln aufgrund besserer Geometrie andererseits. Beides hebt die Effizienz. Abhängig von den benutzten Antennen, abhängig von der Richtung des Radianten und abhängig vom Meteorschauer selbst und abhängig von weiteren Parametern wie lokalem Rausch- und Stör-Pegel wirken sich Signalpegel und Häufigkeit der Meteore aber unterschiedlich auf eine Verbindung aus. Die hier angegebenen Werte für die Effizienz sind deshalb nur als Richtwerte anzusehen. Die geschätzte Genauigkeit von besser als 6 dB ist für den Bereich des Amateurfunks ausreichend. Schließlich macht gerade das Gefühl des Angelns den Reiz aus bei Random-MS.

Der Autor hat alle Faktoren einschließlich der Formel aus McKilby (1961) zusammengetragen und damit eine relative Effizienz der Meteorscatterverbindung berechnet. Als 0 dB wurde das Maximum der Effizienz einer Nord-Süd-Verbindung über den Äquator bei der Distanz 1000 km gewählt. Radiant ist dabei [0,0] und die Verbindung findet am Tag der Tag-und-Nachtgleiche statt. Die relative Effizienz lässt sich für jede Verbindung als Funktion der Tageszeit berechnen. Das Ergebnis ist in Bild 8 für die Strecken Hamburg – Barcelona, Hamburg – Sofia, Hamburg – Moskau und Hamburg - Narvik dargestellt für die Quadrantiden. Auf allen Teilbildern ist die oben beschriebene Lücke aufgrund der gegen 8 UTC senkrecht fallenden Meteore zu sehen. Die Lücke ist bei Verbindungen nach Osten früher und bei solchen nach Westen später. Der Radiant ist im Zeitraum 18 – 22 UTC im Norden tief unten am Horizont. Der Radiant der Quadrantiden steht mit  $49^\circ$  über dem Himmelsäquator und geht deshalb in unseren Breiten nicht unter. Verbindungen nach Norden (Narvik, Reykjavik, Murmansk) sind deshalb auch um diese Zeit möglich. Die Formel nach McKilby liefert in diesem Zeitbereich besonders gute Signale, wenn die Meteore genau längs der Verbindungslinie fallen. Bild 8 zeigt deshalb für Narvik das Effizienzmaximum bei ca. 19 UTC, obwohl die absolute Häufigkeit der Meteore dann gering ist. Allerdings liefert in diesem Fall auch feinsten Meteorstaub noch brauchbare Pings, so dass die beobachtete Häufigkeit der Pings bei flachem Einfall sogar zunehmen kann.

Bild 8 gibt für die betrachteten 4 Verbindungen zusätzlich den tageszeitlichen Verlauf der optimalen Antennenausrichtung an. Die größte Änderung findet wiederum statt, wenn der Radiant gegen 8 Ortszeit am Streupunkt von Ost über den Zenit nach West kippt. Am stärksten macht sich das bemerkbar bei Nord-Süd-Kontakten mit QRB unter 1500 km.

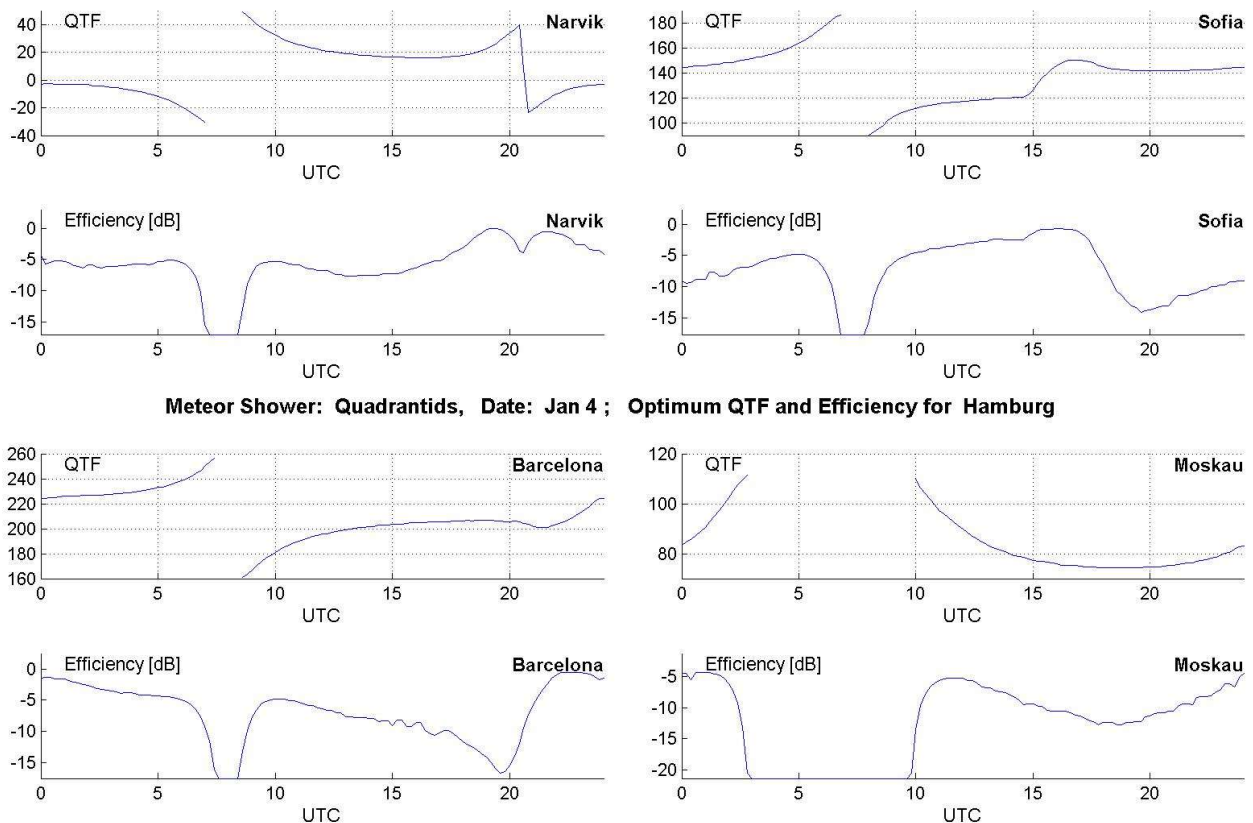


Bild 8

Die Qualität einer Verbindung über Meteorscatter hängt von der Tageszeit ab. Hier ist die Effizienz der Quadrantiden für vier Strecken angegeben sowie die optimale Antennenrichtung in JO53. Andere Schauer ergeben andere Bilder.

Bild 9 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für München anstelle von Hamburg als einen der beiden Standorte. Narvik wurde durch Trondheim ersetzt, weil Narvik von München aus mit der angenommenen Höhe der Reflexion von 102 km nicht erreichbar ist. Die grundsätzlichen Verläufe der Effizienz über der Tageszeit sind in beiden Bildern sehr ähnlich. Während aber z.B. Moskau von Hamburg bis 2:30 UTC offen ist, gibt man diese Richtung in München sinnvollerweise schon um 0:30 UTC auf.

## Zufällige Meteore außerhalb von Meteorschauern

Das Streugesetz lässt sich natürlich nur nutzbringend anwenden, wenn man die Richtung der Meteore, also den Radianten kennt. Das ist nur der Fall in ganz bestimmten jährlich wiederkehrenden, meist kurzen Perioden von allenfalls einigen Tagen. Zwischen diesen bekannten Schauern fällt aber genügend Meteorregen auf die Erde, um – dank FSK441 - täglich Meteorscatter fahren zu können. Diese Meteore fallen zufällig aus allen Richtungen ein. Über den einzelnen Meteor kann man deshalb keine Aussage machen. Wir versuchen nachfolgend einen statistischen Ansatz.

Bekannt ist, dass in den Morgenstunden wesentlich mehr zufällige Meteore fallen als am Abend. Das liegt daran, dass auf der sich drehenden Erde gerade die Orte mit 6 Uhr Ortszeit in Richtung der Erbahn um die Sonne liegen. Auf der Rückseite (12 – 0 Ortszeit) fallen nur Meteore, die schneller als die Erde sind und somit die Erde auf ihrer Bahn einholen können. Statistisch gibt es also einen

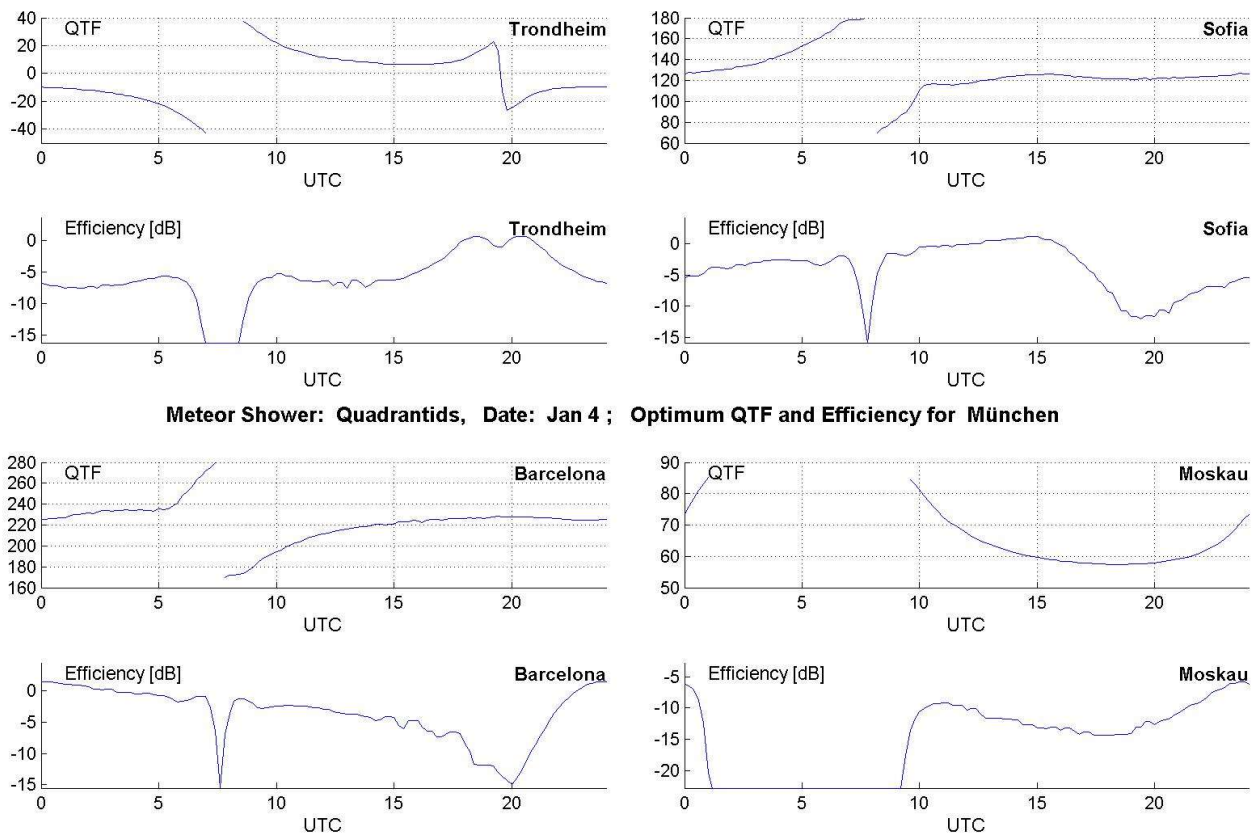


Bild 9

Trotz der relativ kleinen Entfernung zwischen Hamburg und München können sich im Zeitplan der Verbindungen deutliche Verschiebungen ergeben. Hier z.B. München-Moskau gegenüber Bild 8 Hamburg-Moskau

Radianten in Richtung der Erbahn. Dieser Punkt liegt auf der Ekliptik (das ist die Linie, die die Sonne im Lauf eines Jahres am Himmel zieht) und zwar  $90^\circ$  rechts der Sonne (gesehen auf der Nordhalbkugel, andernfalls links). Dieser statistische Radiant steht morgens um 6 Uhr Ortszeit im Süden dort, wo drei Monate vorher die Sonne mittags stand. Der Radiant steht damit am Frühlingsanfang am tiefsten. Deshalb ist die Rate der zufälligen Meteore auf der Norhalbkugel von Februar bis April viel geringer als um den Herbstanfang.

Aus der Tatsache, dass der statistische Radiant nie höher als die Sonne steht, folgt für nicht-tropische Gebiete: Die zufälligen Meteore fallen im Mittel mehr von Süden ein als von Norden (auf der Nordhalbkugel). Obwohl wir über die Richtung der einzelnen Meteore nichts wissen, können wir daraus immerhin schließen, dass bei west-östlichen Meteorscatterverbindungen nördlich der direkten Verbindungslinie mehr Meteore das Streugesetz erfüllen als südlich dieser Linie. Für Nord-Süd-Verbindungen gilt: vor 6 Uhr Ortszeit liegen im Westen mehr Streuzentren, danach im Osten. Wie weit die Antennen von der direkten Richtung abweichen sollten, hängt von der Entfernung der beiden Stationen ab. Da diese Betrachtung nur auf Statistik basiert, ist die tatsächliche Verdrehung der Antennen unkritisch. Die Missweisungen der Antennen beider Partner müssen aber auch hier zueinander passen. J. Richardson [2] empfiehlt folgende Werte:

QRB	1000	1250	1500	2000	km
Missweisung der Antenne	13	11	10	10	Grad

Bei CQ-Rufen sollte man das berücksichtigen. Wird man angerufen, so heißt es aber auch hier: die Antenne sollte nicht gedreht werden – es sei denn, es ist völlig klar, dass eine Drehung nur Besserung bringen kann.

## Bursts

Das Streugesetz gilt für die Streuung an schwach ionisierten Meteorbahnen. Größere Meteore erzeugen hohe Ionisation in zylinderförmigen Gebieten. Modelliert man stark ionisierte Meteorbahnen durch entsprechend dicke Metallzylinder, so ergibt sich in Bezug auf die Geometrie ein ähnliches Gesetz für die Reflexion. Inhomogenitäten und vor allem der örtlich unterschiedliche zeitliche Verlauf des Abklingens der Ionisation, Wind in der Ionosphäre und das magnetische Feld der Erde sorgen aber zunehmend für chaotische Verhältnisse, so dass mehrere Ausbreitungswege zwischen den Stationen entstehen mit schnellem QSB als Folge. Dennoch ist das einfache Modell nicht grundsätzlich falsch, in der ersten Zehntelsekunde ist es sogar korrekt. Die Anwendung der hier gezeigten Bilder auch auf Meteorscatter durch Bursts ist daher durchaus sinnvoll. Wird das Streugesetz von einem Burst eingehalten, so erhält man ein sehr starkes Signal. Brauchbare Reflexionen bekommt man von Meteorbahnen hoher Ionisation aber auch bei größeren Abweichungen vom Streugesetz, und zwar mit zunehmender Degradierung der ursprünglich linearen Meteorbahn. Ein Burst erreicht deshalb seine maximale Stärke u.U. erst nach vielen Sekunden.

Auch für Auroraverbindungen gilt das beschriebene Streugesetz. Anstelle der Richtung des Radianten sind dann die magnetischen Feldlinien der Erde zu nehmen, die nicht mit den Sternen über den Himmel wandern, dafür aber von Ort zu Ort verschieden verlaufen. Diesen Fall wird der Autor in der CQ DL behandeln (angenommen, aber Erscheinungstermin noch nicht bekannt).

## Literatur

[1] D.W.R. McKinley: „Meteor Science and Engineering“, McGraw-Hill, 1961

[2] J. Richardson: „Some Notes and Equations for Forward Scatter“. Diese kurze Zusammenstellung der wichtigsten Zusammenhänge und Formeln basierend auf [1] findet sich im Internet an mehreren Stellen.

Auch weitere Literatur zu diesem Thema findet man im Internet. Z.B. enthält die aktuelle Seite von DK5YA [www.vhfdx.de](http://www.vhfdx.de) gute Verweise, darunter auf deadband.htm von Palle, OZ1RH. Lesenswert ist auch D. E. Warren & R. Desourdis: „Meteor Burst Communications The Gap Filler“. Die Arbeit findet man als [metburdu.html](#). Ein weiteres geeignetes Suchwort ist „IMO“, das Akronym für International Meteor Organization.

Die Programme sind vom Autor als MATLAB-Quellen erhältlich. Sie laufen unter Matlab ab Version 6.0. Für Version 5.3 sind nur kleine Änderungen nötig. Octave ist nicht geeignet, da dies die Handle-Graphik mit den GUI-Möglichkeiten leider nicht unterstützt.

Der Autor hat für ausgewählte Städte Europas den Bildern 8 und 9 entsprechende Diagramme für jeweils ausgewählte Ziele und für alle wesentlichen Meteorschauer berechnet. Sie stehen zum Download bereit ([www.qsl.net/dj5hg](http://www.qsl.net/dj5hg)).

Der Autor ist erreichbar per Mail unter [v.d.heide@on-line.de](mailto:v.d.heide@on-line.de)