

# 100 Jahre Chemische Kampfstoffe als Mittel der Kriegsführung – Rückblick und aktueller Stand der Erkenntnisse zu Toxikologie und Forensik des Schwefel-Lost

Holger Schulz, Martin Weber

Zentrales Institut des Sanitätsdienstes der Bundeswehr München, Außenstelle Munster,  
Laborgruppe Chemie der Gifte/ Kampfstoffanalytik, Humboldtstr. 100, D-29633 Munster, e-  
Mail: martinlweber@bundeswehr.org

---

## 1. Einführung

Im Jahr 2014 jährte sich der Ausbruch des 1. Weltkrieges zum 100. Mal. Der von vielen Historikern als „Urkatastrophe des 20. Jahrhunderts“ bezeichnete Krieg gilt als tiefer Einschnitt in die Geschichte der Menschheit. Diese Bedeutung erhielt er nicht nur auf Grund der bis dato nie dagewesen Anzahl an Opfern und dem weltweiten Ausmaß der Kampfhandlungen, sondern auch durch die veränderte Art der Kriegsführung. Untrennbar damit verknüpft ist die erstmalige Anwendung von chemischen Waffen im großen Maßstab. An Hand des Kampfstoffes S-Lost soll die unheilvolle Geschichte der chemischen Kampfstoffe bis heute nachvollzogen werden.

## 2. Historie (vgl. [1])

Der Einsatz giftiger Substanzen in kriegerischen Auseinandersetzungen ist kein Phänomen der Neuzeit, sondern lässt sich bis in die Antike zurückverfolgen. So finden sich bei dem römischen Schriftsteller und Militär Sextus Julius Frontius Berichte über die Anwendung hypnotisch wirkender Stoffe durch die Karthager in Nordafrika im 3. Jahrhundert v. Chr. Bei den dort genannten Mitteln handelt es sich ausnahmslos um Pflanzen, vor allem aus der Familie der Nachtschattengewächse. Im Besonderen sind genannt Mandragora (*Mandragora officinalis*), Schwarze Tollkirsche (*Atropa belladonna*), Schwarzes Bilsenkraut (*Hyoscyamus niger*) und Gemeiner Stechapfel (*Datura stramonium*). Sie wurden genutzt zur Vergiftung von Lebensmitteln und Trinkwasser und zur Präparation von Pfeil- und Speerspitzen.

Eine weitere Taktik lag in der Ausnutzung giftiger und reizender Gase die bei Verbrennungsprozessen entstehen. Am bekanntesten dürfte das so genannte „Griechische Feuer“ sein, eine Mischung aus Schwefel, Baumharz, Pech, Kochsalz, Erdöl und gebranntem Kalk, dessen Erfindung dem griechischen Architekten Kallinikos von Heliopolis zugeschrieben wird. Diese Brandwaffe spielte eine besondere Bedeutung bei der erfolgreichen Abwehr von Angriffen der Araber auf das Byzantinische Reich im 7. Jahrhundert, so auch während der Belagerung Konstantinopels (674-678). Noch bis weit ins Mittelalter war es ein bewährtes und zugleich gefürchtetes Kampfmittel. Wie wir heute wissen beruht die toxische Wirkung auf der Bildung von Schwefeloxiden, Kohlenstoffmonoxid und anderen Pyrolysegasen. Später versuchte man die Giftigkeit durch Zugabe von Arsenik und Quecksilbersublimat weiter zu steigern.

Mit dem Aufkommen von Feuerwaffen im 14. Jahrhundert geriet die Anwendung von giftigen Gasen etwas in den Hintergrund. Dennoch finden sich bis in das Spätmittelalter zahlreiche Schriften, die sich mit militärchemischen Themen befassen. So im vom Chemiker Rudolf Glauber (1604-1668) verfassten Werk „Des Teutschlands Wohlfahrt“, wo eine Art chemische Granate beschrieben wird, die mit Salz- und Salpetersäure zum Ausräuchern des Gegners gefüllt wurde (sogenannte „nasse Feuer“).

Eine andere bemerkenswerte Quelle ist das 1650 erstmals erschienene Werk „Artis Magnae Artilleriae Pars Prima“ (Die große Kunst der Artillerie) von Casimir Simienovicz (gestorben 1651), Generalleutnant der Artillerie des Königreiches Polen. Simienovicz beschreibt darin das Giftgasschießen einschließlich taktischer Überlegungen unter Einbeziehung meteorologischer Verhältnisse.



Abb. 1. Zeitgenössische Darstellung eines Griechischen Feuers aus dem 12. Jh. (Quelle: Codex Skylitzes Matritensis, Biblioteca Nacional de Madrid).

Im 19. Jahrhundert entwickelten sich, dem Stand der chemischen Wissenschaft entsprechend, neue Ideen zur Anwendung giftiger Kampfmittel. So gab es während der Napoleonischen Kriege (1807-1813) Überlegungen auf englischer Seite, Artilleriegeschosse mit Blausäure zu füllen. Dies wurde jedoch auf Grund fehlender technischer Voraussetzungen nicht umgesetzt. Andere Entwicklungen beschäftigten sich mit arsenorganischen Verbindungen wie dem im Jahr 1760 vom Franzosen Louis Claude Cadet de Gassicourt (1731-1799) entdeckten Kakodyloxid oder dem von Robert Bunsen (1811-1899) in größeren Mengen gewonnenen Kakodyl (Tetramethyldiarsin). Der Einsatz von mit Kakodyl gefüllten Granaten während des Krim-Krieges (1853-1856) wurde allerdings vom britischen Kriegsministerium abgelehnt.

### 3. Erste Bemühungen zur Ächtung von Giftwaffen

Von Anbeginn im Altertum erfolgte die Anwendung von Giften als Waffe nicht vollkommen kritiklos. Gerade von Seiten der Militärs wurde ihr Einsatz häufig als feige und unehrenhaft betrachtet. Ethisch-moralische Vorstellungen wurden dem Zeitgeist entsprechend dahin gehend interpretiert, dass zum Beispiel ein Einsatz gegenüber Christen als verwerflich, eine Anwendung gegenüber Anders- und Ungläubigen aber als legitim angesehen wurde. Dennoch gab es immer wieder Bekundungen zur Ächtung dieser Waffen. Erste Ansätze finden sich in dem am 27. August 1675 geschlossenen Friedensvertrag zwischen Frankreich und dem Heiligen Römischen Reich, der unter anderem die Verwendung von „giftigen Kugeln“ zukünftig untersagte. Das Wachstum der chemischen Industrie in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts und der damit einhergehenden Möglichkeit der großtechnischen Produktion von chemi-

schen Waffen war ein bedeutender Anstoß für internationale Überlegungen zur Reglementierung der Kriegsführung. Sehr allgemein kam dies in der Petersburger Deklaration von 1868 und der Brüsseler Landkriegsdeklaration von 1874 zum Ausdruck, wo es heißt: „Das Kriegrecht erkennt den Kriegsführenden nicht eine unbegrenzte Wahl der Mittel zu, den Feind zu schlagen.“

Mit der Verabschiedung der Haager Landkriegsordnung als Anlage des Haager Abkommens im Zuge der Friedenskonferenzen von Den Haag 1899 und 1907 erfolgte schließlich eine Konkretisierung des Verbots giftiger Waffen. Dazu heißt es: *Abgesehen von den durch Sonderverträgen aufgestellten Verboten ist namentlich untersagt: a) die Verwendung von Gift oder vergifteten Waffen, b) der Gebrauch von Waffen, Geschossen oder Stoffen, die geeignet sind, unnötig Leiden zu verursachen, c) die Verwendung von Geschossen, deren einziger Zweck ist, giftige oder erstickende Gase zu verbreiten. Die Splitterwirkung muss immer die Giftwirkung übertreffen.*“

Mit 25 Unterzeichnerstaaten und 53 Vertragsstaaten insgesamt bilden die Haager Abkommen die historische Grundlage des gegenwärtigen humanitären Völkerrechts, obgleich beide Weltkriege zahlreiche Unzulänglichkeiten offenbarten, die erst mit weiteren Abkommen beseitigt wurden.

#### 4. Der Erste Weltkrieg (vgl. [2])

Zu Beginn des Ersten Weltkrieges wurde der Einsatz von Giftstoffen zunächst von keiner der beteiligten Kriegsparteien in Erwägung gezogen. Lediglich die französische Armee besaß gut 30.000 Gasgewehrgranaten mit einer augen- und schleimhautreizenden Bromessigsäureethylester-Füllung aus Beständen der Polizei.

Erst mit dem Übergang vom Bewegungs- zum Stellungskrieg im November 1914 wurde ein Einsatz diskutiert und Anfang 1915 schließlich mit geringem Erfolg umgesetzt. Auch auf deutscher Seite suchte man nach neuen Möglichkeiten, die Front in Bewegung zu bringen. Der preußische Kriegsminister und Chef des Generalstabes, Generalleutnant Erich von Falkenhayn, unterhielt dazu über Verbindungsleute enge Kontakte zur Rüstungsindustrie und zur Wissenschaft, insbesondere zu Walther Hermann Nernst, dem Direktor des Institutes für Physikalische Chemie und Elektrochemie der Berliner Universität, zu Fritz Haber, Direktor des Institutes für Physikalische Chemie und Elektrochemie der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft in Berlin-Dahlem und zu Carl Friedrich Duisberg, Direktor bei Bayer und später Aufsichtsratsvorsitzender der I.G. Farben.

Versuche mit Reizstoffen wie o-Dianisidinchlorsulfonat, Xylylbromid (T-Stoff) und Bromacetone (B-Stoff), die in der Absicht verschossen wurden, den Gegner nicht zu töten, sondern aus seiner Stellung in den Feuerbereich zu locken, erschütterten den Feind kaum und zeigten keinen Ausweg aus dem Stellungskrieg.

Auf Anregung Fritz Habers entschied das deutsche Oberkommando im Frühjahr 1915 erstmals gasförmiges Chlor in größeren Mengen gegen feindliche Stellungen an der Westfront einzusetzen. Als wichtiges Produkt bzw. Abfallprodukt der chemischen Industrie stand Chlor in ausreichenden Mengen zur Verfügung und konnte im verflüssigten Zustand gefahrlos gelagert und transportiert werden. Da auf Grund des begrenzten Fassungsvermögens der damaligen Geschosse ein Verschuss durch Artillerie nicht in Frage kam, schlug Haber vor, das Gas direkt aus den Flaschen abzublasen - ein Vorgehen das später als das „Habersche Blasverfahren“ bekannt wurde. Bei einem praktischen Feldversuch auf dem Truppenübungsplatz Beverloo in Belgien kostete ein leichtsinniger Selbstversuch Fritz Haber fast das Leben als er

auf einem Pferd durch die Chlorgaswolke reitet. Bei den anwesenden Offizieren des Generalstabs räumt dies letzte Zweifel über eine erfolgreiche Anwendung aus. Für das neu aufgestellte „Gasregiment Peterson“ (benannt nach dessen Kommandeur Otto Peterson) gelang es Haber, zahlreiche Naturwissenschaftlicher zu gewinnen, darunter spätere Nobelpreisträger wie Otto Hahn, Gustav Hertz und James Franck.

## 5. Der Gaskrieg

In Vorbereitung des ersten Chlorgasangriffs wurden in der Zeit vom 5. bis 11. April 1915 1600 große und 4130 kleine Gasflaschen von deutschen Pionieren entlang der Front bei Langemarck eingebaut. Daraufhin begann das Warten auf günstige Windverhältnisse. Am 22. April stellte sich schließlich der erwartete Nord-Nord-Ost-Wind ein, so dass um 17:24 Uhr der endgültige Abblasbefehl gegeben wurde. Punkt 18:00 Uhr öffneten mit Dräger-Sauerstoffgeräten geschützte Soldaten die Chlorgasflaschen. Innerhalb von fünf Minuten strömten insgesamt ca. 150 Tonnen Chlorgas aus und bildeten auf einer Breite von sechs Kilometern eine Wolke, die auf die französischen Stellungen zutrieb.



Abb. 2. Deutsche Infanterie während eines Gasangriffs in Flandern 1916 (Quelle: Bundesarchiv).

Der Angriff traf die Franzosen völlig unerwartet. Ein Offizier beschreibt die Situation wie folgt: *„In der anbrechenden Dunkelheit dieser schrecklichen Nacht kämpften sie mit ihrer Angst, rannten blind in die Gaswolke und stürzten, mit im Todeskampf keuchender Brust [...] Hunderte von ihnen fielen hin und starben; andere lagen hilflos da, Schaum vor den sterbenden Lippen, ihre gemarterten Körper in kurzen Abständen von heftigen Brechkrämpfen geschüttelt, Tränen der Anstrengung in den Augen. Auch sie würden später sterben, einen langsamen sicheren Tod von unbeschreiblicher Qual.“*

Nach französischen Angaben hinterlässt der Angriff 15.000 Gasvergiftete, davon 5000 Tote. Den deutschen Truppen gelingt die Einnahme von Langemarck. Die Chemie hat ihre Kriegstauglichkeit bewiesen.

Fritz Haber wird daraufhin zum Hauptmann befördert. *„Im Frieden der Menschheit, im Krieg dem Vaterland“* lautete sein Motto, beide Vorgaben erfüllte er im Übermaß. Im folgenden

Kriegsverlauf ergänzen weitere Verbindungen wie Phosgen, Chlorpikrin, Blausäure und Chlorcyan die Arsenale an Kampfstoffen auf beiden Seiten. Parallel arbeiteten alle Kriegsparteien an der Verbesserung der Abwehrmaßnahmen, vor allem dem Individualschutz der Soldaten durch Schutzmasken. Sowohl die Maskenkörper aber vor allem die Filter, die hauptsächlich mit Aktivkohle und Hexamethylentetramin gefüllt waren, wurden stetig verbessert. Dies mündete in die Einführung der deutschen Blaukreuzkampfstoffe, arsenorganische Verbindungen wie dem 1880 von Wilhelm La Coste und Karl Arnold Michaelis entdeckten Diphenylarsinchlorid (Clark I). Sehr fein zerstäubt ausgebracht durchdrang es die Schutzfilter der Masken und zwang die Soldaten durch Auslösen heftiger Nasen- und Rachenreizungen zum Abnehmen der Maske. Die Soldaten waren nun einem weiteren Beschuss, zum Beispiel mit Diphosgen (Grünkreuz), schutzlos ausgeliefert. Diese von Fritz Haber und Oberstleutnant Georg Bruchmüller ersonnene Taktik wurde als „Buntschießen“ bekannt, abgeleitet von den verschiedenen farbigen Kennzeichnungen der Kampfstoffgranaten.

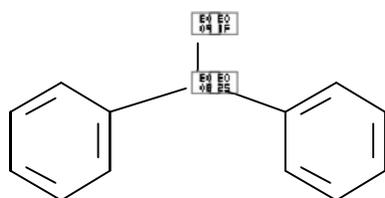


Abb.3. Strukturformel des Diphenylarsinchlorid (Clark I).

Die weitere Entwicklung führt uns zu einer ganz neuen Klasse chemischer Kampfstoffe, dessen bekanntester Vertreter, das S-Lost, auch heute, gut 100 Jahre später, an Aktualität nicht verloren hat.

## 6. Der Hautkampfstoff S-Lost

Bei S-Lost (Bis(2-chlorethyl)-sulfid; Gelbkreuz) handelt es sich um einen flüssigen, hauttoxischen Kampfstoff mit hoher Sesshaftigkeit. Nach dem Ausbringen bleibt es an geschützten Stellen im Gelände wochenlang wirksam und eignet sich damit hervorragend zum Sperren von Gelände. Die Maske allein bot keinen Schutz vor der Wirkung der Substanz, die als Aerosol leicht durch Uniform und Stiefel drang und schmerzhafte Wunden am ganzen Körper verursachte.

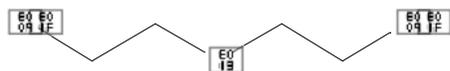


Abb. 4. Strukturformel des Bis(2-chlorethyl)-sulfid (S-Lost).

Die Verbindung wurde erstmals 1822 von dem französischen Physiker César Mansuète Despretz aus Ethylen und Dischwefeldichlorid hergestellt. Der deutsche Chemiker Albert Niemann beschreibt ihre charakteristischen Eigenschaften in den „Annalen der Chemie und Pharmazie“ von 1860 wie folgt: „*Sie besteht darin, dass selbst die geringste Spur, die zufällig auf irgendeine Stelle der Haut kommt, anfangs zwar keine Schmerzen hervorruft, nach Verlauf einiger Stunden aber eine Rötung derselben bewirkt und bis zum folgenden Tage eine Brandblase hervorbringt, die sehr lange eitert und außerordentlich schwer heilt, unter Hinterlassung schwerer Narben ...*“. 1886 erfolgten durch den Deutschen Victor Meyer weitergehende Untersuchungen und die Entwicklung eines neuen Syntheseweges bei dem Thiodiglykol mit Phosphortrichlorid umgesetzt wird, wobei ein deutlich reineres und stabileres Produkt entsteht.

Die Bezeichnung „Lost“ wurde von Haber geprägt und geht auf den Chemiker Dr. W. Lommel und den Chemieprofessor Wilhelm Steinkopf zurück, die das genannte Syntheseverfahren anwendeten und sich vor allem mit den Kampfstoffeigenschaften der Verbindung befassten. Die Engländer bezeichneten den Stoff als „mustard gas“ veranlasst durch den Geruch des technischen Produktes nach Senföl. Bei den Franzosen dagegen trug er den Namen „Yperite“ nach dem Ort des Ersteinsatzes, Ypern.

Dort kam es in der Nacht vom 12. auf den 13. Juli 1917 zum ersten Lost-Angriff von deutscher Seite gegen britische Soldaten während der Flandernschlacht. Da die Bildung von Kampfstoffwolken nach dem Granatbeschuss ausblieb, besetzten die vorrückenden britischen Soldaten das beschossene Gebiet ohne Schutzmaßnahmen, mit verhängnisvollem Ergebnis. Zweitausend vergiftete Soldaten fielen aus, 50 kamen zu Tode. Wenn gleich die Sterblichkeit deutlich geringer als bei anderen Kampfstoffen war, führten die schwerwiegenden Verletzungen zu langwierigen Ausfällen.



Abb. 5. Angehörige der britischen 55. Division geblendet von Tränengas, 10. April 1918 (Quelle: Imperial War Museums).

Die britische Armee erwiderte den Angriff im November 1917 mit erbeuteten Gelbkreuzgranaten und ab September 1918 mit eigenen Yperit-Geschossen, ebenso wie die Franzosen. Insgesamt sollen im Verlauf des Krieges bis zu 15.000 Tonnen S-Lost zum Einsatz gekommen sein, wodurch etwa 400.000 Soldaten außer Gefecht gesetzt wurden. Der Kampfstoff stellte die letzte Etappe in der chemischen Kriegsführung des Ersten Weltkriegs dar. Spätere Entwicklungen wie das ebenfalls hautschädigende 2-Chlorvinylarsindichlorid (Lewisit) oder der maskenbrechende Reizstoff Phenarsazinchlorid (Adamsit) gelangten nicht mehr zum Einsatz.

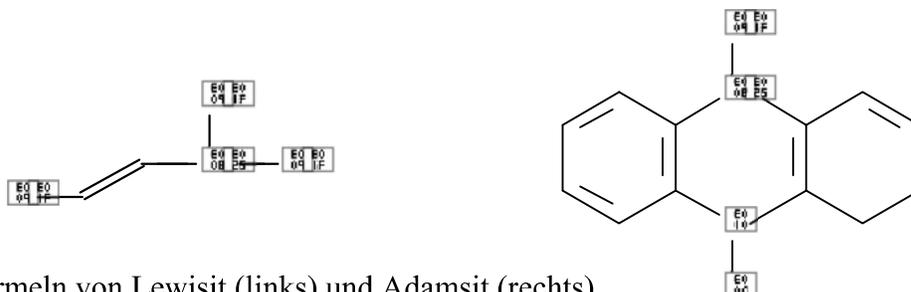


Abb. 6. Strukturformeln von Lewisit (links) und Adamsit (rechts).

## 7. Bilanz des Krieges

Die Zahlen zum Kampfstoffeinsatz während des Ersten Weltkriegs schwanken stark. Augustin M. Prentiss [3] vom amerikanischen Chemical Warfare Service nannte 1937 eine Produktionsmenge aller kriegführenden Staaten von 150.000 Tonnen wovon 124.200 Tonnen eingesetzt wurden. Ludwig F. Haber [4], der Sohn Fritz Habers, geht von einer Gesamtproduktionsmenge von 176.200 Tonnen aus. Dabei bildet Chlor mit 93.800 Tonnen den größten Anteil, gefolgt von Phosgen mit 36.600 Tonnen, Chlorpikrin 15.100 Tonnen, Diphosgen 11.600 Tonnen, S-Lost 11.000 Tonnen und Blausäure 8.100 Tonnen.

Noch deutlich ungenauer sind die Zahlen zu den durch chemische Kampfstoffe Getöteten und Verletzten. So kann man aber von mindestens 1.000.000 Verwundeten und 70.000 bis 90.000 Toten ausgehen (vgl. [3]).

## 8. Zwischen den Weltkriegen

Trotz des verheerenden Ausmaßes des Ersten Weltkriegs, auch bezüglich der chemischen Kriegsführung, kam es nach Kriegsende nicht zu einer Abrüstung der Chemiewaffen. Selbst in Deutschland, dem auf Grund des Versailler Vertrags die Herstellung, Entwicklung und Einführung chemischer Waffen verboten wurde, arbeitete man im Geheimen weiter an der „Erhaltung der Wehrfähigkeit auf dem Gaskampfgebiet“. Besonders hervorzuheben ist hierbei das zweifelhafte Engagement des Chemikers Dr. Hugo Stoltzenberg, der unter Fritz Haber bereits im Ersten Weltkrieg für die Errichtung einer Füll- und Erprobungsanlage für Gasmunition in Munsterlager-Breloh und danach für die Kampfstoffverwertung zuständig war.

Auch das Genfer Protokoll über das Verbot der Verwendung von erstickenden, giftigen oder ähnlichen Gasen sowie von bakteriologischen Mitteln im Kriege, das am 17. Juni 1925 in der Schweizer Stadt Genf unterzeichnet wurde, konnte nur wenig zur Entspannung beitragen, da es keine Vorgaben zu Entwicklung, Herstellung und Lagerung solcher Waffen enthält.

So kam es immer wieder zu Anwendungen von chemischen Kampfstoffen bei lokalen Konflikten. Auffällig dabei ist der häufige Einsatz des Hautkampfstoffes S-Lost. So zum Beispiel durch spanische Truppen gegen aufständische Rif-Kabylen in Marokko 1923-1927. Ein Großteil der dafür notwendigen Expertise stammte dabei aus Deutschland, u.a. von Stoltzenberg. Die Unterstützung ging so weit, dass größere Mengen Thiodiglykol (Oxol) für die Synthese von S-Lost an Spanien geliefert wurden.

Um Mussolinis Kolonialisierungspläne in die Tat umzusetzen, drang die italienische Armee 1935 in Äthiopien ein. Auch hier setzte man nach spanischem Vorbild chemische Kampfstoffe gegen eine weitestgehend wehrlose Bevölkerung ein. Da Italien selbst Unterzeichnerstaat des Genfer Protokolls war, leugnet man lange Zeit offiziell den Chemiewaffeneinsatz.

Ein weiterer Schauplatz der chemischen Kriegsführung war der Japanisch-Chinesische Krieg von 1937 bis 1945. Auch hier spielte der Kampfstoff S-Lost, der von der japanischen Armee eingesetzt wurde, eine große Rolle. Bis heute finden sich auf chinesischem Staatsgebiet Altlasten chemischer Munition aus dieser Zeit.

## 9. Der Zweite Weltkrieg

Während des Zweiten Weltkrieges kam es auf den europäischen Schlachtfeldern nicht zum Einsatz chemischer Munition. Die Westmächte hatten große Bestände an Phosgen und S-Lost eingelagert, wollten diese aber nur im Falle eines Chemiewaffenangriffs durch Deutschland

einsetzen. Es war zwar bekannt, dass Deutschland Neuentwicklungen von chemischen Kampfstoffen hatte, man war sich aber nicht über die Existenz und Gefahr des Nervenkampfstoffs Tabun im Klaren. Adolf Hitler hatte vermutlich wegen seiner eigenen Erlebnisse im Ersten Weltkrieg Vorbehalte, chemische Kampfstoffe einzusetzen. Zusätzlich vermutete man auf deutscher Seite, dass auch die Westmächte über Nervenkampfstoffe verfügten, so dass man einen Einsatz aus Angst vor Vergeltung unterließ. Auf Alliierten Seite hatte man aber nur Vorversuche mit der Substanz Diisopropylfluorophosphat gemacht, welche nicht die Stabilität und Wirkung von Tabun erreichte. So gab es Kampfstoffeinsätze in dieser Zeit nur in Asien im andauernden Japanisch-Chinesischen Krieg.

## 10. Entwicklung nach dem Zweiten Weltkrieg

Die Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg bis hin zum Kalten Krieg stand im Zeichen der von den Deutschen vor dem Krieg entdeckten Gruppe der Nervenkampfstoffe. Zu den bereits bekannten Vertretern Tabun, Sarin und Soman traten die sogenannten V-Stoffe, VX Ende der 50er Jahre auf amerikanischer und VR in den 70er Jahren auf russischer Seite. Daneben wurden aber auch weiterhin große Mengen an Lewisit und S-Lost auf beiden Seiten bevorratet.

Die erste Anwendung von Nervenkampfstoffen erfolgte im Bürgerkrieg im Yemen (1967-1969). Dort griff die ägyptische Luftwaffe zugunsten der antimonarchistischen Kräfte ein. Ägypten war zu dieser Zeit ein enger Verbündeter der Sowjetunion. Diese hatte das Land mit VR- und Sarin-Munition ausgestattet. Ägypten setzte diese Munition in den Bergen des Yemen ein. Im Jom-Kippur-Krieg 1973 stand diese Munition auf ägyptischer und syrischer Seite bereit, wurde dann aber nach dem schnellen Sieg Israels doch nicht eingesetzt. Die Gefahr erkannte Israel erst nach Ende des Krieges, als es bei den besiegten Truppen umfangreiche Schutzvorbereitungen für einen chemischen Krieg entdeckte.



Ein Höhepunkt des Einsatzes chemischer Kampfstoffe in jüngerer Zeit stellte der Krieg zwischen Irak und Iran von 1980-1988 (1. Golfkrieg) dar. Beginnend im August 1983 erfolgten bis März 1984 zahlreiche Angriffe von irakischer Seite. Im Gegensatz zu früheren Konflikten zeigte die Weltöffentlichkeit großes Interesse an der Berichterstattung über die Vorfälle. Die Behandlung von durch Kampfstoff verwundeter iranischer Soldaten in Europa führte schließlich zu zweifelsfreien Beweisen über den Einsatz von S-Lost.

Abb. 7. Ein iranischer Soldat mit Gasmasken im Iran-Irak-Krieg (Quelle: Wikimedia Commons).

## 11. Toxikologie des S-Lost (vgl. [3])

Ein nicht unerheblicher Teil der wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Toxikologie der S-Lost-Vergiftung stammt aus der Untersuchung und Behandlung der geschädigten iranischen Soldaten des 1. Golfkriegs.

Im Allgemeinen sind Loste recht lipophile und reaktive Verbindungen, die zu ausgeprägten lokalen Schäden führen und eine hohe systemische Toxizität besitzen. Sie werden langsam vom Körper über den Urin ausgeschieden, meist in Form ihrer Glutathion- oder Cystein-

konjugate. Der Wirkmechanismus beruht auf einer intramolekularen Zyklisierung der 2-Chlorethylseitenkette unter Bildung eines Kations welches rasch mit Molekülen mit Elektronenüberschuss reagiert. So zum Beispiel mit Verbindungen die eine Phosphat-, Amino-, Sulfhydryl-, Hydroxyl-, Carboxyl- oder Imidazolgruppe aufweisen. An der DNA findet diese Alkylierung bevorzugt am Stickstoff N7 statt.

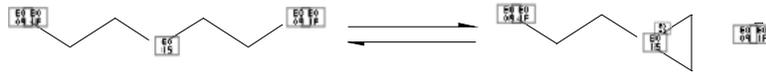


Abb. 8. Aktivierung von Lost-Verbindungen durch intramolekulare Zyklisierung.

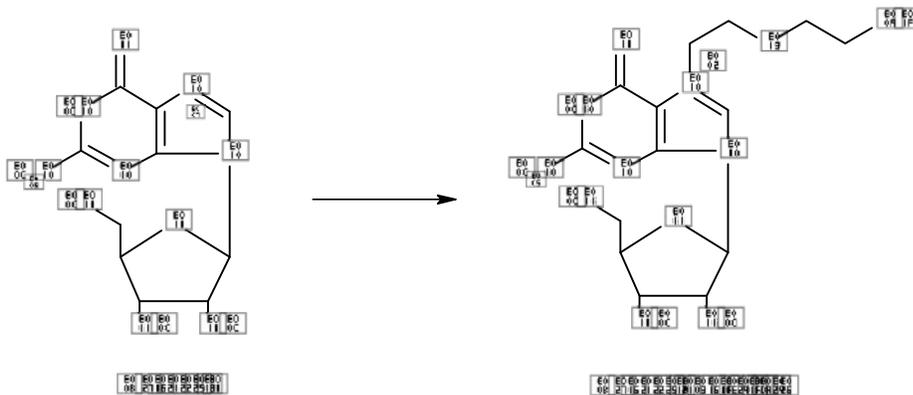


Abb. 9. Reaktion von S-Lost mit Guanosin.

Auf Grund von zwei reaktiven Chlorethylgruppen im Lost-Molekül kommt es daraufhin häufig zur Quervernetzung zwischen den DNA-Strängen. Gemäß der „Papiermeisterhypothese“ aktiviert die gesteigerte DNA-Reparatur das Enzym Poly(adenosindiphosphatribose)polymerase in dessen Folge die Zelle an NAD (Nicotinamidadenindinukleotid) verarmt und damit durch eine Hemmung der Glykolyse und des Energiestoffwechsels über weitere Schritte schließlich der Zelltod eintritt. Eine Verarmung der Zelle an Glutathion und in Folge dessen eine zunehmende Alkylierung der Calciumadenosintriphosphatase führt wegen der verminderten Calciumausschleusung aus der Zelle zu einer Schädigung der Zellmembran. Daneben kommt es durch eine zentrale cholinerge Stimulation zu Übelkeit und Erbrechen.

**Symptome einer Vergiftung:** Die ersten Symptome nach Exposition der Haut sind Juckreiz und Rötung mit nachfolgender Blasenbildung. Diese kann noch Wochen später auftreten, wobei die Flüssigkeit von frühen und späten Blasen frei von aktivem Gift ist. Besonders schmerzhaft sind offene Blasen und nicht abgedecktes nekrotisches Gewebe. Die Augen zeigen ungeschützt bereits bei Dampfexposition Symptome wie Fremdkörpergefühl, Photophobie, Erythem und Tränensekretion bis hin zu Konjunktivitis und Korneatrübung bei starker Exposition. Die Atemwege reagieren verzögert auf eine S-Lost-Aufnahme. So kommt es zu Niesanfällen, schmerzhaftem Husten, Ausfluss aus Nase und Rachen und Verlust des Geruch- und Geschmacksinns. Hohe S-Lost-Konzentrationen führen zu Pharyngitis, Laryngitis, Schluckbeschwerden und Bronchitis. Eine Verlegung der Atemwege durch Pseudomembranen und bronchiale Ausgüsse kann lebensbedrohlich werden. Die gastrointestinalen Symptome sind mit Übelkeit und Erbrechen in den ersten Stunden und Durchfall nach weiteren Tagen eher unspezifisch.

**Spätfolgen:** Oberflächliche Hautschäden benötigen Wochen zur Heilung, tiefe Läsionen noch deutlich länger. Von 30.000 beobachteten Fällen des 1. Golfkrieges litten 55% der Patienten an Spätschäden. So traten bei 70% Komplikationen im Bereich der Atemwege auf (chroni-

sche Bronchitis), 41% litten an Hautveränderungen (abnorme Pigmentierung), 36% an Beschwerden der Augen (meist chronische Konjunktivitis) und 45% an neurotischen Störungen und Persönlichkeitsveränderungen.

**Therapie:** Bis heute ist kein wirksames Antidot zur Behandlung der Lost-Vergiftung bekannt. Natriumthiosulfat kann bei rechtzeitiger Gabe aktives Schwefellost binden. Daneben scheint eine lokale Gabe von Dimercaprol nützlich zu sein. Weitere Maßnahmen bestehen nach einer erfolgreichen Dekontamination vor allem aus symptomatischen Behandlungen. So erfolgt eine lokale Applikation von kühlenden Lotionen. Antihistaminika und Analgetika werden, falls erforderlich, systemisch verabreicht.

**Klinischer Nachweis** (vgl. [5]): Der Nachweis einer S-Lost-Vergiftung kann über verschiedene Wege erfolgen. Das Agens selber ist bis zu sieben Tage nach Exposition aus Plasma und Gewebe mittels GC-MS nachweisbar. Das Hydrolyseprodukt des S-Lost, das Thiodiglykol bzw. dessen Oxidationsprodukt lassen sich im Urin mittels LC-MS/MS erfassen, wobei die Bestimmung auf Grund des endogenen Vorkommens beider Verbindungen fehlerbehaftet ist. Deutlich spezifischer ist dagegen der Nachweis der  $\alpha$ -Lyase-Produkte (Metaboliten der Aktivierung durch Glutathion). Aus dem Vollblut lässt sich zusätzlich das S-Lost-Protein-Addukt mittels LC-MS/MS bestimmen mit einer Verfügbarkeit von 3 Wochen nach Exposition.

## 12. Zusammenfassung

Mit dem Inkrafttreten des Chemiewaffenübereinkommens am 29. April 1997 erzielte die Völkergemeinschaft durch die Schaffung eines klaren Abrüstungsgebotes und gleichzeitiger Schaffung eines Kontrollregimes einen entscheidenden Schritt Richtung vollkommener Ächtung chemischer Waffen. Dieser Hoffnung wurde auch dadurch Ausdruck verliehen, dass die Organisation für das Verbot chemischer Waffen (OPCW) im Dezember 2013 für ihre Arbeit mit dem Friedensnobelpreis geehrt wurde.

Doch auch gut 100 Jahre nach dem ersten gezielten Einsatz eines chemischen Kampfstoffes beschäftigt uns die Problematik dieser Massenvernichtungswaffen nach wie vor, wie die jüngsten Vorkommnisse im Syrischen Bürgerkrieg eindrucksvoll demonstrieren. Wenn in diesen Tagen in der Verbrennungsanlage der Gesellschaft zur Entsorgung chemischer Kampfstoffe und Rüstungsaltslasten im niedersächsischen Munster die letzten Abfallstoffe der syrischen S-Lost-Bestände vernichtet werden, wird das Kapitel der Kampfstoffe damit nicht beendet sein, aber die Welt dem Ziel der Abschaffung dieser Waffen wieder ein Stück näher.

## 13. Literatur

- [1] Martinetz D. Vom Giftpfeil zum Chemiewaffenverbot – Zur Geschichte der chemischen Kampfmittel. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, Thun, 1. Auflage, 1996
- [2] Franke S. Lehrbuch der Militärchemie. Band 1, Militärverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin, 2. Auflage, 1977
- [3] Prentiss AM. Chemicals in War. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1937
- [4] Haber LF. The Poisonous Cloud – Chemical Warfare in the First World War. Clarendon Press, Oxford, 1986
- [5] Koller M, Thiermann H, John H. Methoden zum Nachweis der Vergiftung mit chemischen Kampfstoffen: Zusammenarbeit mit der Organisation für das Verbot Chemischer Waffen (OVCW). In: Wehrmedizinische Monatsschrift, 58, 2014, S. 310-315
- [6] Szinicz L, Baskin SI. Chemische und Biologische Kampfstoffe. In: Marquardt, H.; Schäfer, S. (eds.): Lehrbuch der Toxikologie. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart, 2. Auflage, 2004
- [7] Lewin L. Die Gifte der Weltgeschichte. Springer-Verlag, 1920. Reprographischer Nachdruck: Gerstenberger Verlag, Hildesheim, 3. Auflage, 1984