

INEF

Report

Institut für Entwicklung und Frieden der
Universität -GH- Duisburg
zur wissenschaftlichen Begleitung der Stiftung
Entwicklung und Frieden

Verifikation von Konversionsvereinbarungen mittels Vor-Ort-Sensoren

Einrichtungen für Land- und
Luftfahrzeuge, Schießplätze,
Tiefflug- und Testgelände

Jürgen Altmann

Heft 7 / 1994

Universität
Duisburg
Gesamthochschule

Universitätsbibliothek Duisburg



50MPM2555+1\$

50 MPM 2555+1



Inhalt

<i>Summary</i>	iv
<i>Zusammenfassung</i>	v
<i>Vorwort</i>	vi
1. Einleitung	1
1.1 Zum Verhältnis von Abrüstung und Verifikation	1
1.2 Abrüstung und Konversion	3
1.3 Verifikation mit Vor-Ort-Sensoren	4
1.4 Übersicht über die Studie	5
2. Vorüberlegungen	6
2.1 Einige zentrale Begriffe	6
2.2 Ziele und Gegenstandsbereich der Studie	6
2.3 Konversions-Szenarien	7
2.4 Vor-Ort-Sensoren in der kooperativen Verifikation bisheriger Rüstungsbegrenzung	8
3. Sensorarten und ihre Eigenschaften	12
3.1 Klassifikation von Sensoren	12
3.2 Übersicht über mechanisch-akustische Sensoren	15
3.3 Übersicht über elektrisch-magnetisch-optische Sensoren	19
4. Weitere Systemkomponenten	29
4.1 Scheinwerfer	29
4.2 Energieversorgung	29
4.3 Datenspeicher, Datenkompression	31
4.4 Verarbeitung, Klassifizierung	33
4.5 Kommunikation	34
4.6 Schutz und Sicherheit	35
4.7 Andere Systemaspekte	37
5. Überwachung kleiner Bereiche	39
5.1 Tor	39
5.2 Zaun/Mauer	42
5.3 Umfriedetes Gelände	44
5.4 Flugplatz	44
5.5 Hafen	47
5.6 Kontroll-Linie im freien Gelände	47
6. Überwachung großer Gebiete	49
6.1 Übungsplatz, Schießplatz, Schußwaffen-Testgelände	49
6.2 Tieffluggebiet	51
6.3 Testgebiet für Flugkörper und ballistische Raketen	52
7. Ausblick, Empfehlungen	55
<i>Literaturhinweise</i>	59

Summary

Sensor systems deployed on site have been proposed for the verification of disarmament since some time. Future treaties should additionally include conversion of e.g. tank factories or military air bases. The present study analyses whether and to what degree on-site sensors are suitable for the verification of such conversion obligations. It focuses on installations for land and air vehicles as well as on shooting grounds, low-level flight zones and testing areas. The perspective is mainly technical, incorporating practical and cost considerations.

There is a great number of sensor types which can be used to determine that certain - military - vehicles can no longer be found in specific areas or that there is no shooting any more. These sensor types register mechanical-acoustical or electrical-magnetical-optical quantities. Sensors for direct contact or short distance are suited for portal controls, others with intermediate ranges can monitor boundary lines or air bases, and some can cover large areas.

The other system components such as energy supplies, data memories, computers and communication systems have to function with high reliability and have to be protected against interference to some extent. An independent communication network is needed linking the local sensor systems, the network nodes and the international verification centre. Failures as well as treaty violations and attempts to deceive have to be documented and must trigger an immediate alarm in the centre.

For the small-area applications portal, fence, enclosed area, air base, seaport and monitored line appropriate combinations of different sensors are proposed. Concerning large areas, former shooting grounds, low-level flight zones and missile testing grounds are discussed.

Whereas some applications are ruled out because of too high costs, one can estimate that the expenses can remain limited in most cases. In particular, the small-area installations cost about as much as one single heavy vehicle or markedly less than one combat aircraft. A sensor verification system in the CSCE area for conversion and other disarmament obligations costs much less than the armament savings which it makes possible. The personnel effort of a few hundred people can be similar to that of existing international inspectorates.

States are recommended to give contracts for development and testing of sensor verification systems. By a programme of 10 million DM per year, the Federal Republic of Germany could gain valuable knowledge on the basis of which first installations could be agreed upon already after five years.

The author: Jürgen Altmann is a physicist and works since 1985 in scientific-technical disarmament research. After studies on preventive arms limitation for laser weapons and on European ballistic missile defence, he works since 1988 in the Bochum Verification Project which carries out and evaluates experiments for acoustic, seismic and magnetic vehicle detection. He is co-author of several articles and books dealing with verification of disarmament.

Zusammenfassung

Vor Ort stationierte Sensorsysteme werden seit einiger Zeit für die Verifikation von Abrüstung diskutiert. Zukünftige Verträge sollten auch die Konversion etwa von Panzerfabriken oder Militärflugplätzen einbeziehen. Die vorliegende Studie untersucht, ob und inwieweit Vor-Ort-Sensoren für die Verifikation solcher Konversionsverpflichtungen in Frage kommen. Sie konzentriert sich auf Einrichtungen für Land- und Luftfahrzeuge sowie auf Schießplätze, Tiefflug- und Testgelände. Die Sichtweise ist vorrangig technisch unter Einbeziehung von praktischen und Kosten-Überlegungen.

Es gibt eine Reihe von Sensorarten, mit denen man feststellen kann, daß bestimmte - militärische - Fahrzeuge in definierten Gebieten nicht mehr vorkommen oder daß nicht mehr geschossen wird. Diese Sensorarten erfassen mechanisch-akustische oder elektrisch-magnetisch-optische Größen. Sensoren für unmittelbaren Kontakt oder kurze Abstände sind für Torkontrollen geeignet, solche mit mittleren Reichweiten können Begrenzungslinien oder Flugplätze überwachen, und einige können große Flächen abdecken.

Die weiteren Systemkomponenten wie Energieversorgung, Datenspeicher, Rechner und Kommunikationssysteme müssen besonders zuverlässig arbeiten und in gewissem Maße vor Eingriffen geschützt werden. Ein unabhängiges Kommunikationsnetz muß die örtlichen Sensorsysteme, Netzknoten und die internationale Verifikationszentrale miteinander verbinden. Fehlfunktionen sowie Vertragsverletzungen und Täuschungsversuche müssen dokumentiert werden und einen sofortigen Alarm in der Zentrale auslösen.

Für die kleinräumigen Anwendungsfälle Tor, Zaun, umfriedetes Gelände, Flugplatz, Hafen und Kontroll-Linie werden geeignete Kombinationen verschiedener Sensoren vorgeschlagen. In bezug auf große Flächen werden ehemalige Schießplätze, Tieffluggebiete und Flugkörper-Testgelände diskutiert.

Während einige wenige Anwendungen wegen zu hoher Kosten ausscheiden, läßt sich abschätzen, daß der Aufwand in den meisten Fällen begrenzt bleibt. Insbesondere kosten die kleinräumigen Installationen etwa so viel wie ein einzelnes schweres Fahrzeug oder erheblich weniger als ein Kampfflugzeug. Ein Sensor-Verifikationssystem im KSZE-Raum für Konversions- und andere Abrüstungsverpflichtungen kostet weit weniger als die Rüstungseinsparungen, die aufgrund dessen möglich werden. Der Personalaufwand kann mit wenigen hundert Personen ähnlich groß sein wie bei existierenden internationalen Inspektoraten.

Den Staaten wird empfohlen, Entwicklung und Erprobung von Sensor-Verifikationssysteme in Auftrag zu geben. Die Bundesrepublik Deutschland könnte mit einem Programm von 10 Mio. DM pro Jahr wertvolle Erkenntnisse gewinnen, aufgrund derer man schon nach fünf Jahren erste Installationen international vereinbaren könnte.

Der Autor: Jürgen Altmann ist Physiker und seit 1985 in der naturwissenschaftlich-technischen Abrüstungsforschung tätig. Nach Studien zur vorbeugenden Rüstungsbegrenzung bei Laserwaffen und über europäische Raketenabwehrsysteme arbeitet er seit 1988 im Bochumer Verifikationsprojekt, das Experimente zum akustischen, seismischen und magnetischen Nachweis militärischer Fahrzeuge durchführt und auswertet. Er ist Mitautor bzw. Mitherausgeber einer Reihe von Artikeln und Büchern über Verifikation von Abrüstung.

Vorwort

Diese Studie entstand in einem neunmonatigen Projekt, das ich 1993 am Institut für Entwicklung und Frieden (INEF) der Universität - Gesamthochschule - Duisburg durchgeführt habe. Das Projekt wurde durch das Ministerium für Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen finanziert. Ich danke dem Ministerium für die Finanzierung; dem INEF danke ich dafür, daß es dieses Projekt aufgenommen und mich in der Ausführung unterstützt hat.

Das Projekt baut auf den Ergebnissen des Bochumer Verifikations-Projekts auf, das seit 1988 im Institut für Experimentalphysik III der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt wird und in dem ich bis Anfang 1993 beschäftigt war. Dieses durch die Volkswagen-Stiftung geförderte Projekt macht angewandt-physikalische Forschung zum Einsatz automatischer Sensorsysteme bei der Überprüfung von Abrüstung. Insbesondere wird untersucht, wie man Land- und Luftfahrzeuge mittels akustischer, seismischer und magnetischer Signale über kurze bis mittlere Entfernungen nachweisen kann.¹ Da über diese Signale von Militärfahrzeugen in der offen zugänglichen Literatur nicht viel zu finden ist, hat das Projekt seit 1989 eine Reihe von Experimenten mit Militärgerät (Panzern, Lkw, Kampfflugzeugen) durchgeführt. Diese Experimente waren als eigener Beitrag zu Offenheit und Vertrauensbildung angelegt; sie fanden bisher in der (damaligen) Tschechoslowakei (1989, 1991), in der Bundesrepublik (1989, 1990, 1991) und in den Niederlanden (1992) statt. Partner/innen aus acht Ländern beteiligten sich daran, u.a. Wissenschaftler aus Staaten der früheren Warschauer Vertrags-Organisation.² Die Ergebnisse werden veröffentlicht.³

Die im Bochumer Verifikationsprojekt zunächst für den Kontext der Verifikation von Abrüstung gewonnenen Daten und Erkenntnisse sind in die vorliegende Studie eingegangen.

-
- 1 Das Projekt wird beschrieben in: J. Altmann u.a., "Panzer gehorchen zivilen Befehlen" - Projekt neue technische Mittel für kooperative Verifikation von Abrüstung in Europa, sowie in: W. Baus, Integrierte Forschung und Lehre auf dem Gebiet Abrüstung an der Ruhr-Universität, beides in: U. Kronfeld, W. Baus, B. Ebbesen, M. Jathe (Hg.), Naturwissenschaft und Abrüstung - Forschungsprojekte an deutschen Hochschulen, Münster/Hamburg: Lit, 1993
 - 2 Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Niederlande, Rußland, Tschechien, USA. Weitere Länder der ehemaligen UdSSR werden einbezogen.
 - 3 Zunächst als Experiment-Berichte in der Serie "Verification - Research Reports", Bochum: Brockmeyer.

1. Einleitung

Unter Konversion militärischer Objekte versteht man ihre Umwandlung zu zivilen Zwecken. Aus Kasernen werden beispielsweise Wohn- oder Geschäftsräume, Panzer werden für die Waldbrandbekämpfung umgebaut, Fabriken stellen Umwelttechnik anstelle von Lenk- waffen her, ehemalige Militärflugplätze werden nur noch für zivilen Luftverkehr genutzt. Konversion wird bisher fast durchweg als innerstaatliches und vor allem ökonomisches Problem behandelt. Diskutiert wird über die (regionale) Wirtschaft und die militärabhängigen Arbeitsplätze oder über die Nutzung bisher geheimer Forschungs- und Entwicklungskapazitäten für gesellschaftliche Bedürfnisse.

Insofern die Existenz von Waffen, ihre Produktion sowie Forschung und Entwicklung für neue Arten potentielle Bedrohungen für andere Länder darstellen oder schaffen, hat Konversion aber auch internationale Dimensionen. Das wird heute an den UdSSR-Nachfolge- staaten besonders deutlich: Ökonomische Hilfe aus westlichen Ländern soll Konversion erleichtern, Nuklearwaffen-Experten im Land halten und mit anderen Aufgaben betrauen, Motive für Waffenexport verringern. Generell sollte Konversion als Bestandteil eines umfassenden internationalen Abrüstungsprozesses gesehen und gestaltet werden; dort, wo es Motive zur Umgehung geben kann, sollte sie ebenfalls in internationalen Verträgen festge- legt und deren Einhaltung wirksam überprüft werden.

1.1 Zum Verhältnis von Abrüstung und Verifikation

Potentielle militärische Bedrohungen zu vermindern, ist das klassische Ziel von Rüstungs- begrenzung und Abrüstung. Waffen und Soldaten, die nicht vorhanden sind, können nicht in einem möglichen Angriff benutzt werden, folglich sind auch weniger Rüstung und Perso- nal für Abwehr und Verteidigung nötig. Abrüstung kann eine wichtige Rolle spielen in einem allgemeinen politischen Prozeß, der Vertrauen bildet, die Furcht vor Angriffen abbaut und ein konstruktives Beziehungsgeflecht entwickelt, das schließlich Krieg als unsin- nig und undenkbar erscheinen läßt.

Das Vorhandensein von Streitkräfte ist Beweis dafür, daß Staaten - wenn auch eventuell nur diffus und zukünftig - mit Angriff und Krieg rechnen. Ihre bare Existenz schafft aber poten- tielle Bedrohungen für die jeweils anderen Länder. Diesem Sicherheitsdilemma kann man z.T. durch defensive Strukturen entgehen, die offensive Kriegsführungsoptionen weitgehend ausschließen. Ein anderer Weg ist Rüstungsbegrenzung und Abrüstung. Würden nur ein- zelne Staaten ihre Rüstung verringern, würden für die anderen (bzw. eine Koalition) die Erfolgsaussichten bei einem Angriff wachsen. Daher wird nur dann abgerüstet werden, wenn sich (fast) alle relevanten Staaten daran beteiligen, der Vorgang also durch internatio- nale Verträge definiert und verbindlich gemacht wird.

Auch bei Verträgen besteht grundsätzlich das Problem, daß sie verletzt werden können. Durch Nicht-Einhaltung könnte sich ein Vertragsstaat die Angriffsmöglichkeiten verbessern, umsomehr, als die ehrlichen Partner ja ihre Rüstung verringert hätten. Diese Möglichkeit würde sogar für die eigentlich gutwilligen Vertragsstaaten ein Motiv zur heimlichen Vorbe- reitung auf diesen Fall, also zur eigenen Umgehung des Vertrags, schaffen. Der Ausweg daraus ist die verlässliche Überprüfung (Verifikation) der Einhaltung der Vertragsbestim- mungen. Kann jeder Staat sich selbst überzeugen, daß die vereinbarte Abrüstung überall durchgeführt wird, entfällt das Motiv, sich gegen heimliche Verletzung durch einen anderen

selbst zu wappnen. Muß jeder Staat erwarten, daß eigene Umgehungen nicht geheim bleiben können, verringert das den Anreiz dazu beträchtlich.

Verifikation muß so gründlich durchgeführt werden, daß mögliche Verletzungen rechtzeitig erkannt werden. Bei kleinen Umgehungen kann man dann in Gesprächen versuchen, Korrekturen zu erreichen. Bei langanhaltenden oder umfangreichen Verstößen kann man schlimmstenfalls den Vertrag kündigen und durch erneute eigene Aufrüstung Angriffsvorbereitungen vereiteln.

Hier ergibt sich jedoch ein Dilemma: Solange Staaten mit der Möglichkeit von Krieg rechnen und sich Streitkräfte halten, werden sie wollen, daß diese im Kriegsfall effektiv kämpfen. Das erfordert, daß ein potentieller Gegner möglichst wenig über die eigenen Kräfte (Technik, Pläne, Strategie, Stationierung usw.) weiß und spricht gegen intensive Verifikation. Die Geschichte der Verhandlungen über Verifikationsregelungen zeigt, daß das Herstellen eines angemessenen, alle Seiten gleich behandelnden Kompromisses zwischen dem Bedürfnis nach Offenheit bei den anderen und dem nach Geheimhaltung bei sich selbst nie leicht war. Ob akzeptable und wirksame Überprüfungsverfahren gefunden werden konnten, war oft der Schlüssel für das Zustandekommen oder Scheitern von Rüstungsbegrenzungs- und Abrüstungsverträgen.⁴

Die Intensität von Verifikation ist in komplizierter Weise vom Mißtrauen und den militärischen Potentialen abhängig. Zwischen Staaten kann einerseits ein so gutes politisches Verhältnis, so viel Vertrauen herrschen, daß Krieg nicht mehr vorstellbar ist, trotz vorhandener Streitkräfte und ohne jede Überprüfung. Als Beispiel wird oft das deutsch-französische Verhältnis angeführt. Auch der bisherige Verzicht der NATO-Länder auf Inspektionen in NATO-Partnerstaaten wird sehr prinzipiell mit der Bündnis-Mitgliedschaft begründet.⁵

Hierzu ist jedoch mehrerlei zu sagen: Zunächst sollte man ein ebenso gutes Verhältnis zu allen den Staaten anstreben, gegen die man die Streitkräfte noch als notwendig erachtet. Dabei wird überprüfte Abrüstung eine wichtige Rolle spielen. Weiterhin unterliegen die befreundeten Länder vergleichbaren Reduzierungen, da sie denselben Abrüstungsverträgen angehören, nur daß man die Einhaltung nicht selbst überprüft. Schließlich kann es Argumente geben, vom Verzicht auf Verifikation in befreundeten Ländern abzurücken. Das ist vorstellbar bei tiefergehender Abrüstung, die Rüstungsproduktion und -export einbezieht. Auch im Falle eines gegenseitig belasteten Verhältnisses (z.B. Griechenland - Türkei) kann Verifikation grundsätzlich helfen, Mißtrauen abzubauen. Schließlich ist anzumerken, daß es auch im innerstaatlichen Leben - trotz der grundsätzlichen Annahme der Gesetzestreue - eine Reihe von Überprüfungs- und Sanktionsmechanismen gibt, da immer wieder persönliche, ökonomische oder andere Motive existieren können, aufgrund derer Bürger/innen, juristische Personen oder staatliche Organisationen Gesetze und andere Regeln verletzen.

4 Allerdings wurde das Verifikationsargument auch oft vorgeschoben. Zur politischen Bedeutung der Verifikation bei Rüstungsbegrenzungsverhandlungen s. z.B.: M. Krepon, *The Political Dynamics of Verification and Compliance Debates*, und: M. M. Lowenthal, J. S. Wit, *The Politics of Verification*, beide in: W. C. Potter (ed.), *Verification and Arms Control*, Lexington: Heath, 1985.

5 Im Vertrag über konventionelle Streitkräfte in Europa von 1990 (KSE-Vertrag) ist ausdrücklich vorgesehen, daß Staaten Inspektionen innerhalb ihrer eigenen Staatengruppe machen können. Das war für Inspektionen z.B. Ungarns oder Polens in der UdSSR gedacht. Die NATO hat sich politisch geeinigt, von dieser Regel keinen Gebrauch zu machen. Der Vertragstext findet sich z.B. in: *Der Vertrag über konventionelle Streitkräfte in Europa - Mehr Sicherheit mit weniger Waffen*, Reihe Berichte und Dokumentationen, Bonn: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, o.J.

Auch wenn man an zukünftige Überprüfungsverfahren für internationale Umweltabkommen denkt, scheint ein Verzicht auf Kontrolle bei befreundeten Staaten kontraproduktiv.⁶

Anders ist es nach jahrzehntelanger Gegnerschaft. Bei sehr starkem Mißtrauen wird man Überprüfung generell ablehnen und Abrüstung kann nicht zustandekommen.⁷ Bei vermindertem Mißtrauen werden Verifikation und damit Verringerung von Rüstung möglich. Im anschließenden Prozeß kann Mißtrauen weiter abgebaut werden, was intensivere Überprüfung und schnellere Abrüstung erlaubt. In diesem Szenario wird die Verifikation ausgeweitet, während die Rüstung bis auf Null abgebaut wird. In der Diskussion über eine Welt ohne Nuklearwaffen wird äußerst intensive Überprüfung, einschließlich gesellschaftlicher Verifikation, vorgeschlagen, um sicherzustellen, daß trotz weiter vorhandenen Wissens Kernwaffen nicht neu produziert werden.⁸

1.2 Abrüstung und Konversion

Für die weitere Abrüstung in Europa, aber auch weltweit, scheint die Einbeziehung von Konversionsverpflichtungen sinnvoll und notwendig. Das gilt insbesondere, wenn man an Begrenzungen der Waffenproduktion und strenge Einschränkungen des Waffenexports denkt. Aber auch bei Stützpunkten, die für überraschende Angriffe nötig wären (z.B. Flugplätze), ist eine Schließung oder Umwidmung für zivile Zwecke ein wichtiges Mittel des Bedrohungsabbaus. Diese Verpflichtungen müssen dann wie die originäre Abrüstung (die Obergrenzen und Zerstörung beinhaltet) durch internationale Verträge verbindlich abgesichert werden, und deren Durchführung ist ebenso verlässlich zu überprüfen. Ob man getrennte Konversionsverträge schließt oder diese Verpflichtungen - ggf. mit eigenen Protokollen - in neue Abrüstungsverträge einschließt, ist eher zweitrangig.

In einem rudimentären Sinn sprechen schon einige gegenwärtige Abrüstungsverträge von Konversion. Im Vertrag über Konventionelle Streitkräfte in Europa von 1990 geht es um Umwandlung von Panzern oder gepanzerten Kampffahrzeugen in zivil nutzbare Fahrzeuge.⁹ Gemäß dem START-I-Vertrag von 1991 können schwere Nuklear-Bomber für andere (nukleare und nicht-nukleare) militärische Aufgaben "konvertiert" werden, START II spricht von der Umwandlung von Raketen mit Mehrfach-Sprengköpfen zu solchen mit einem Gefechtskopf - wobei dieses natürlich keine Konversion für zivile Zwecke ist.¹⁰ Die

6 Zur Überprüfung von Umweltabkommen s. z.B.: J. C. di Primio, G. Stein (eds.), *A Regime to Control Greenhouse Gases - Proceedings of a Workshop*, Bad Neuenahr, June 12-14, 1991, Jülich: Forschungszentrum Jülich, 1992; eine Reihe von Artikeln in den *Verification Reports 1991-93* des Londoner VERTIC (s. Literaturliste); J. Lanchbery, *Verification of Environmental Agreements*, in: J. Altmann, T. Stock, J.-P. Stroot (eds.), *Verification After the Cold War - Broadening the Process*, Amsterdam: VU Press, 1994.

7 Das Aufkommen der Satelliten in den sechziger Jahren, wodurch die Beobachtung von außen nun nicht mehr zu verhindern war, verschaffte USA und UdSSR einen Umweg um dieses Problem.

8 Gesellschaftliche Verifikation kann durch engagierte Bürger/innen, besonders Wissenschaftler/innen und Techniker/innen, durchgeführt werden, die eventuelle Verstöße einer internationalen Behörde melden und dafür nicht bestraft werden dürfen. S.: J. Rotblat, *Verification of a Nuclear-Weapon-Free World Treaty*, in: Altmann, Stock, Stroot (Fn. 6). S. auch: P. M. Lewis, *Verification of nuclear weapon elimination*, in: R. Cowen Karp, *Security Without Nuclear Weapons? Different Perspectives on Non-Nuclear Security*, Stockholm/Oxford etc.: SIPRI/Oxford University Press, 1992.

9 Vertrag über konventionelle Streitkräfte in Europa, 19. Nov. 1990, s. Fn. 5.

10 Z.B. in: *Arms Control and Disarmament Agreements - START: Treaty between the United States of America and the Union of Soviet Socialist Republics on the Reduction and Limitation of Strategic Offensive Arms*, Washington DC: U.S. Arms Control and Disarmament Agency, 1991; *Official Text, Treaty between the United States of America and the Russian Federation on Further Reduction and Limitation of Strategic Offensive Arms*, Washington DC: U.S. Arms Control and Disarmament Agency, Febr. 1, 1993.

Chemiewaffen-Konvention von 1993 sieht die Konversion von Chemiewaffen-Fabriken zu Chemiewaffen-Vernichtungseinrichtungen für maximal 10 Jahre vor; in Ausnahmefällen ist auch Konversion zu anderen (zivilen) Zwecken möglich.¹¹ Diese vertraglich erwähnten Umwandlungen werden - wie andere Reduzierungsverfahren - vor allem durch Vor-Ort-Inspektion überprüft.

Während im Mittelstrecken-¹² und im START-I-Vertrag Raketenfabriken speziellen Tor- und Umfriedungskontrollen unterliegen sowie die Chemiewaffen-Konvention besondere Beschränkungen und Verifikationsregeln für Chemiewaffen-Fabriken sowie andere chemische Werke enthält, finden sich im KSE-Vertrag keinerlei Einschränkungen und keine Überprüfungsregeln für die Produktion sowie den Export der vertraglich begrenzten Hauptkampfsysteme.

Konsequente Fortführung des Abrüstungsprozesses in Europa sowie weltweit wird aber erfordern, daß auch bei Panzern, gepanzerten Kampffahrzeugen, Artillerie, Kampfflugzeugen und -hubschraubern Begrenzungen bei Herstellung und Ausfuhr eingeführt werden und daß deren Einhaltung überprüft wird. In diesem Zusammenhang kann die vertraglich vereinbarte Konversion nicht nur von Waffensystemen, sondern von gesamten Einrichtungen wie Fabriken, Depots, Flugplätzen oder Testgeländen eine große Rolle spielen, einschließlich der zugehörigen Verifikationsmaßnahmen. Die müßten feststellen, daß z.B. nur noch Lkw und Traktoren, aber keine Panzer mehr das Fabriktor verlassen oder daß ein früherer militärischer Flugplatz stillgelegt ist bzw. nur noch zivil genutzt wird.

1.3 Verifikation mit Vor-Ort-Sensoren

Solche allgemeineren Konversionsverpflichtungen könnten prinzipiell durch Vor-Ort-Inspektionen überprüft werden. Diese müßten für umfassende Kontrolle ständig stattfinden. Gegenüber der permanenten Stationierung von Inspektionsgruppen gibt es aber - u.a. aus Kostengründen - Zurückhaltung. Im Fall des INF- und des START-Vertrags handelt es sich nur um zwei Raketenfabriken je Seite; bei Panzern und Flugzeugen wären möglicherweise hunderte von Einrichtungen pro Land zu überwachen.

Wenn es um permanente und kontinuierliche Überwachung vieler Einrichtungen geht, stellen automatische Sensorsysteme eine Alternative zur permanenten Stationierung von Personal dar. Die Kosten können geringer ausfallen, Probleme durch Langeweile und Unaufmerksamkeit entstehen nicht, und die Systeme können - für alle Seiten transparent - so ausgelegt werden, daß sie nur vertraglich vereinbarte Information aufnehmen, speichern und weitergeben. Für Abrüstungsvereinbarungen bei konventionellen Waffen wird das Konzept der Vor-Ort-Sensoren seit einigen Jahren diskutiert.¹³

11 Convention on the Prohibition of the Development, Production, Stockpiling and Use of Chemical Weapons and on Their Destruction, Conference on Disarmament, CD/1170, Appendix (incl. Verification Annex) (deutsch: Bulletin, Nr. 44, S. 417-479, Bonn: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 26. Mai 1993).

12 Z.B. in: 100th Congress, 2d Session, Senate, Treaty Doc. 100-11, Treaty between the United States of America and the Union of Soviet Socialist Republics on the Elimination of Their Intermediate-Range and Shorter-Range Missiles, Washington DC: U.S. Government Printing Office, 1988.

13 Während die Grundidee schon älter ist, wurden Sensoren für den Verifikationseinsatz in Europa z.B. vorgeschlagen in: I. Oelrich, V. Utgoff, Confidence Building with Unmanned Sensors in Central Europe, in B. M. Blechman (ed.), Technology and the Limitation of International Conflict, Lanham MD: University Press of America, 1989; J. Altmann, B. Gonsior, Nahsensoren für die kooperative Verifikation der Abrüstung konventioneller Waffen, Sicherheit und Frieden, Jg. 7, Nr. 2, S. 77-82, 1989.

Auch im Bereich der Chemie- und Nuklearwaffen können Vor-Ort-Sensorsysteme sinnvoll eingesetzt werden, die z.B. bestimmte Substanzen oder Kernstrahlung nachweisen. Die Chemiewaffen-Konvention von 1993 enthält Bestimmungen in diese Richtung (s. 2.4); Details müssen noch in der Vorbereitungskommission in Den Haag ausgearbeitet werden. Als Grundlage stehen eine Reihe von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Verfügung.¹⁴ Im Falle von Kernwaffen werden Strahlungs-Sensoren (z.B. an den Ausgängen einer Sprengkopf-Abrüstungseinrichtung) notwendig werden, wenn ein Stopp der Produktion spaltbaren Materials vereinbart wird. Auch hier gibt es auf internationaler Ebene begrenzte Forschungsaktivitäten;¹⁵ der Nachholbedarf an internationaler Forschung und Entwicklung scheint größer als im chemischen Bereich.

Beschränkungen bei U-Booten könnten mit Unterwasserschall-Sensoren überprüft werden. Wegen der zentralen strategischen Bedeutung und der großen Geheimhaltung sind Verifikationsforschung und -entwicklung hier besonders kompliziert.

Inwieweit Vor-Ort-Sensoren für den Nachweis biologischer Waffen eine Rolle spielen können, muß heute als völlig offen gelten (s. 2.4).

1.4 Übersicht über die Studie

Die vorliegende Studie untersucht, ob und inwieweit vor Ort stationierte automatische Sensorsysteme für die Verifikation von Konversionsvereinbarungen in Bezug auf Einrichtungen für Land- und Luftfahrzeuge sowie Schießplätze, Tiefflug- und Testgelände in Frage kommen. Das geschieht vorrangig unter einer technischen Perspektive, wobei praktische und Kosten-Gesichtspunkte mit einfließen.

Kap. 2 gibt den Rahmen für die Studie an und stellt dar, wo Vor-Ort-Sensoren in der bisherigen Rüstungsbegrenzung schon vorkommen. In Kap. 3 werden die in Frage kommenden Sensorarten - getrennt für mechanisch-akustische sowie elektrisch-magnetisch-optische Größen - mit ihren wichtigen Eigenschaften beschrieben. Kap. 4 diskutiert weitere Systemkomponenten z.B. für Energieversorgung, Kommunikation, Schutz und Sicherheit. Mögliche Sensorkombinationen für die Überwachung kleiner Bereiche (z.B. umfriedete Gelände, Flugplätze) werden in Kap. 5 vorgestellt. Kap. 6 behandelt Systeme für großflächige Überwachungsaufgaben (Schießplätze, Tieffluggebiete, Testgelände). Aufbauend auf Abschätzungen für Kosten und Personalaufwand gibt Kap. 7 einen Ausblick und schließt mit einigen Empfehlungen für weitere Forschung sowie Entwicklung und Erprobung. Am Ende folgen noch einige Literaturhinweise.

14 S. die Serie der SIPRI Chemical & Biological Warfare Studies, die "blauen Bücher" des finnischen Chemiewaffen-Verifikationsprojekts (von Finnland der Abrüstungskonferenz CD in Genf vorgelegt) und verschiedene Berichte einzelner Staaten an die CD.

15 Vor allem sind die Abschätzungen und Nachweisexperimente zu nennen, die von der Federation of American Scientists mit dem damaligen Committee of Soviet Scientists for Peace and Against the Nuclear Threat durchgeführt wurden, s.: F. v. Hippel, R. Sagdeev (eds.), *Reversing the Arms Race - How to Achieve and Verify Deep Reductions in the Nuclear Arsenals*, New York etc.: Gordon & Breach, 1990.

2. Vorüberlegungen

Nach der Definition einiger zentraler Begriffe in 2.1 werden die Ziele und der Gegenstandsbereich dieser Studie genauer eingegrenzt (2.2). Mögliche Konversions-Szenarien werden in 2.3 dargestellt, und 2.4 beschreibt, welche Rolle Vor-Ort-Sensoren in der bisherigen Rüstungsbegrenzung spielen.

2.1 Einige zentrale Begriffe

Konversion meint die Umwandlung von militärischer zu ziviler Nutzung. Das kann Rüstungsbetriebe, militärische Liegenschaften, militärische Land- und Luftfahrzeuge sowie andere Objekte betreffen.¹⁶

Verifikation bedeutet die Überprüfung, ob Vertragspartner ihre eingegangenen Verpflichtungen einhalten.¹⁷ *Kooperative Verifikation* findet im Territorium der überprüften Seite, also mit ihrer expliziten Zustimmung und Unterstützung, statt. Die dazu verwendeten Geräte nennt man - in Abgrenzung von den "nationalen technischen Mitteln" (v.a. Satelliten), die von außen überwachen - *kooperative technische Mittel* der Verifikation.¹⁸

Als *Sensor* bezeichnet man ein Element, das eine Größe, die nicht direkt als Signal geeignet ist, in ein weiterverarbeitbares Signal umwandelt.¹⁹ In der Technik wird in der Regel eine physikalische oder chemische Größe in ein elektrisches Signal umgewandelt, das von einer nachfolgenden Elektronik verarbeitet werden kann. (Im weiteren geht es nur um technische Sensoren.) Eine Kombination aus Sensor mit zugehöriger Betriebseinheit (zur Energieversorgung, zur Vorverarbeitung) bezeichnet man auch als Sensorsystem.

Diese Definition eines Sensorsystems ist unabhängig davon, ob die Bedienung Menschen erfordert oder ob es autonom arbeiten kann. Sensoren sind jedenfalls erforderlich, wenn man die permanente Anwesenheit von Personen überflüssig machen will. Im Rahmen dieser Arbeit bezeichne ich als *Vor-Ort-Sensor* einen solchen, der im Inneren eines Landes fest angebracht ist und seine Informationen an eine internationale Verifikationszentrale übermitteln kann. Viele von Inspektionsgruppen vorübergehend mitgebrachten Geräte sind Sensoren, die vor Ort benutzt werden. Da sie aber das Land mit der Inspektionsgruppe wieder verlassen, fallen sie nicht unter die Definition eines Vor-Ort-Sensors und werden hier nicht behandelt.

2.2 Ziele und Gegenstandsbereich der Studie

Das Hauptziel dieser Studie ist, auf naturwissenschaftlich-technischer Basis Informationen über den möglichen Einsatz von Vor-Ort-Sensoren bei der Überprüfung von

16 Zum Begriff Konversion und zu seiner Herkunft s.: U. Albrecht, *Rüstungskonversionsforschung - eine Literaturstudie mit Forschungsempfehlungen*, Baden-Baden: Nomos, 1979. Einen Eindruck von der Breite der gegenwärtigen Konversionsdiskussion gibt: A. Brunn, L. Baehr, H. J. Karpe (eds), *Conversion - Opportunities for Development and Environment*, Berlin etc.: Springer, 1992.

17 Für eine Diskussion mit Schwerpunkt auf bilateraler Rüstungsbegrenzung s. z.B.: Potter (Fn. 4); K. Tsipis, D. Hafemeister, P. Janeway (eds.), *Arms Control Verification - The Technologies That Make It Possible*, Washington etc.: Pergamon-Brassey's, 1986. Alle Aspekte werden erfaßt in: Canada, *Bibliography on Arms Control Verification: 1962 - 1991*, Ottawa: External Affairs and International Trade Canada, 1991 (plus Update, 1992, Second Update, 1993).

18 J. Altmann, *On-Site Verification Technologies - An Overview*, in: J. Altmann, H. van der Graaf, P. Lewis, P. Markl (eds.), *Verification at Vienna - Monitoring Reductions of Conventional Armed Forces*, New York etc.: Gordon & Breach, 1992.

19 S. z.B.: C. Reuber (Hg.), *Handbuch der Informationstechnik und Elektronik*, Bd. 8, Sensoren und Wandlerbauelemente, Heidelberg: Hüthig, 1989.

Konversionsvereinbarungen zusammenzutragen. Dabei werde ich mich auf die Erfassung von Land- und Luftfahrzeugen konzentrieren. Das Schwergewicht liegt aus einer Reihe von Gründen bei großem und schwerem militärischem Gerät: Es ist wegen seiner Größe, Schallabstrahlung usw. leichter zu entdecken. Objekte vergleichbarer Größe und Art kommen im zivilen Leben nicht oder nicht häufig vor, was die Erkennung/Unterscheidung erleichtert und die Anzahlen klein hält. Großes Gerät kann nicht als ganzes innerhalb von Containern, Lkw o.ä. untergebracht werden. Falls es nicht selbst fährt/fliegt, sind Sonderfahrzeuge für den Transport nötig. Pkw, Flugkörper und Drohnen, Munition, Handfeuerwaffen scheiden daher aus den Betrachtungen zunächst aus. Wo die diskutierten Sensoren aber eine Fähigkeit zum Erfassen auch kleinerer Objekte bzw. spezifischer Ereignisse (wie Schüsse) bieten, wird das mit einbezogen.

Sensoren für kleinere oder andere Objekte oder für nukleare, chemische oder biologische Materialien sollten in gesonderten Studien untersucht werden.²⁰

Ein weiteres Ziel ist, für die behandelten Sensorarten relevante Literaturquellen zusammenzustellen und für die weniger gängigen Arten Lieferanten anzugeben. Für die diskutierten Komponenten und Systeme sollen grobe Kostenabschätzungen gemacht werden.²¹ Schließlich soll mit dieser Arbeit - im Sinne einer Vorstudie - die Basis für fundierte Entscheidungen gelegt werden darüber, ob weitere Studien über Teilaspekte oder ggf. sogar Entwicklung und Erprobung bestimmter Systeme in Auftrag gegeben werden sollten.

2.3 Konversions-Szenarien

Als Grundlage für die Untersuchung nehme ich an, daß die Vertragsstaaten sich nicht gegenseitig vollständig vertrauen, sondern daß sie von der prinzipiellen Möglichkeit von Vertragsverletzungen ausgehen, weswegen sie eine Überprüfung mit zuverlässigen Methoden anstreben. Die kooperativen technischen Verifikationsmittel sollen daher so ausgelegt werden, daß sie eventuelle Verstöße sicher erkennen können, einschließlich möglicher Versuche, die Systeme zu beschädigen oder zu täuschen. Wo das durch technisches Gerät allein nicht erreichbar ist, kann geeignete Gestaltung der Vertragsregelungen oder der Verifikationsprozeduren helfen.

Will man die Verifikationsmöglichkeiten bei vereinbarter Konversion untersuchen, sind zwei Grundscenarien möglich. Das erste - wohl seltenere - ist die vollständige Schließung einer Einrichtung, d.h. die Beendigung aller militärischen und vergleichbaren zivilen Aktivitäten. Das liegt z.B. vor, wenn ein Depot, ein Militärflugplatz oder ein Übungsgelände stillgelegt werden. In diesem Fall ist die Aufgabe der Sensor-Überwachung einfacher: Es ist zu überprüfen, ob ständig das "Null-Signal" vorliegt. Ein Alarm ist praktisch bei jedem erfaßten Fahrzeug auszulösen (ggf. mit bestimmten Ausnahmen, z.B. für den kleinen Pkw des Försters, Nachtwächters oder den Schlepper des Bauern).

20 Für Sensoren in der nuklearen Abrüstung s.: v. Hippel, Sagdeev (Fn. 15). Für die anderen Bereiche s. z.B.: F. Oehme, Chemische Sensoren - Funktion, Bauformen, Anwendungen, Wiesbaden: Vieweg, 1991. Für chemische und Biosensoren (z.B. enzymatische und immunochemische Sensoren) s.: W. Göpel, T. A. Jones, I. Lundström, T. Seiyama (eds.), Chemical and Biochemical Sensors, Part I, Weinheim: Verlag Chemie, 1991; W. Göpel, T. A. Jones, M. Kleitz, I. Lundström (eds.), Chemical and Biochemical Sensors, Part II, Weinheim: Verlag Chemie, 1992. S. auch die Eurosensors-Konferenzen, die in Sensors and Actuators veröffentlicht werden.

21 Die angegebenen Kosten basieren auf Erhebungen, die ich 1988 begonnen und 1993/4 aktualisiert habe. S. auch: J. Altmann, Grobe Kostenabschätzung für Sensor-Verifikation bei Abrüstung konventioneller Streitkräfte, in: O. Bubke, J. Kraus, A. Stumpp, Verifikation Rüstungskontrolle, Bergisch-Gladbach, Amt für Studien und Übungen der Bundeswehr, 1990.

Im zweiten - häufigeren - Szenario wird die militärische Aktivität eingestellt, aber die Einrichtung wird weiterhin zivil genutzt. An einer bisherigen Panzerfabrik werden etwa nun Traktoren oder schwere Lkw hergestellt, auf einem früheren Militärflugplatz landen nun Sport- und Verkehrsmaschinen. In diesem Fall hat die Sensor-Verifikation eine schwerere Aufgabe: Alle Fahrzeuge müssen erfaßt und zuverlässig klassifiziert werden; ein Alarm muß ausgelöst werden, wenn ein militärisches Fahrzeug erkannt wird. Diese Unterscheidung ist um so einfacher, je stärker sich die verbotenen militärischen Fahrzeuge von den erlaubten zivilen unterscheiden. Daher ist es sinnvoll, die Verbotskriterien so zu gestalten, daß sich deutliche Unterschiede ergeben (z.B. mit Hilfe der Kriterien Kettenantrieb ja/nein, Länge, Gewicht, Zahl der Achsen).

2.4 Vor-Ort-Sensoren in der kooperativen Verifikation bisheriger Rüstungsbegrenzung

Einige der bisherigen Rüstungsbegrenzungsverträge enthalten in ihren Verifikationsregelungen schon Vor-Ort-Sensoren, wenn auch erst in geringem Umfang oder in Vorformen.

Der *Nichtverbreitungsvertrag* von 1968 hat zum Ziel, die Entstehung weiterer Kernwaffenstaaten zu verhindern. Dazu führt die Internationale Atomenergie-Organisation Sicherungsmaßnahmen ("safeguards") in Nukleareinrichtungen durch, die ein Abzweigen von Nuklearmaterial verhindern oder dokumentieren würden. Dazu gehören im Bereich "Containment and Surveillance" u.a. versiegelte Überwachungskameras, die in regelmäßigen Zeitabständen Aufnahmen machen.²²

Der *Mittelstrecken-Vertrag* (INF-Vertrag) von 1987 zwischen den USA und der UdSSR/Rußland verbietet landgestützte Raketen und Marschflugkörper mit Reichweiten zwischen 500 und 5.500 km. Hier wurde das Konzept der vor Ort stationierten Sensoren erstmalig in einen echten Rüstungsbegrenzungsvertrag eingeführt. Nach dem Verifikationsprotokoll zum Vertrag dürfen beide Parteien an den Toren je einer Raketenfabrik folgende Sensorsysteme installieren:²³ Geräte für die Messung von Länge und Durchmesser von Raketenstufen in Behältern, Gerät zur Durchleuchtung von Behälterinhalten. An den Nebenausfahrten sind erlaubt: Waagen, Fahrzeug-Sensoren, Überwachungssysteme und Gerät zum Messen von Fahrzeugdimensionen. Zusätzlich dürfen Kommunikationssysteme benutzt werden.²⁴ Diese Systeme werden durch eine ständig stationierte Inspektionsgruppe betrieben, wobei die Nebenausfahrten normalerweise von der am Haupttor befindlichen Zentrale aus fernüberwacht werden.²⁵

1990 wurden von den USA und der UdSSR Verifikations-Protokolle zum *Testschwellenvertrag* von 1974 und zum *Vertrag über friedliche Kernexplosionen* von 1976 vereinbart.

22 The Agency's Safeguards System, International Atomic Energy Agency, INFCIRC/66/Rev. 2, 1968; The Structure and Content of Agreements between the Agency and States Required in Connection with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons, International Atomic Energy Agency, INFCIRC/153, 1972. S. auch: F. Mautner-Markhof, The International Safeguards System of the IAEA and its Relevance to Future Verification Regimes, in: Altmann, van der Graaf, Lewis, Markl (Fn. 18). Für technische Einzelheiten s. z.B. die Annual Meetings of the Institute of Nuclear Materials Management.

23 Die Mittelstreckenraketen SS-20 und Pershing 2 wurden nur in je einer Fabrik hergestellt.

24 Protocol Regarding Inspections Relating to the Treaty between the United States of America and the Union of Soviet Socialist Republics on the Elimination of Their Intermediate-Range and Shorter-Range Missiles, 8 Dec. 1987 (s. Fn. 12); Memorandum of Agreement Regarding the Implementation of the Verification Provisions of the Treaty between the United States of America and the Union of Soviet Socialist Republics on the Elimination of Their Intermediate-Range and Shorter-Range Missiles, 21 Dec. 1989.

Der erste verbietet unterirdische Kernexplosionen mit einer Sprengenergie von über 150 Kilotonnen TNT, der zweite regelt das Verfahren bei den sog. friedlichen Kernexplosionen. Diese Protokolle erlauben - neben Geologen-Werkzeug, Funkgeräten, geophysikalischen Meßgeräten, Computern usw. - u.a. Fernsehkameras. Zur Bestimmung der Explosionsenergie dienen drei teleseismische Stationen im Land oder ein lokales Netzwerk seismischer Sensoren sowie eine Meßmethode mit einem Kabel direkt neben der Explosion. Diese Systeme sollen zur jeweiligen Explosion aufgebaut, vom Inspektionsteam betrieben und anschließend wieder demontiert werden.²⁶

Der *START-I-Vertrag* von 1991 zwischen USA und UdSSR/Rußland beinhaltet die Abrüstung ihrer strategischen Atomwaffen auf nominell je 6000 Sprengköpfe, mit einer Vielzahl zusätzlicher Bestimmungen. Die kontinuierliche Überwachung des INF-Vertrags wird demnach auf je zwei Raketenfabriken erweitert. Dort können Torkontakte, Lichtschranken, Fernsehkameras, Induktionsschleifen, Magnetsensoren, Waagen u.a. installiert werden. Am Fabrikzaun sind Fernsehkameras und Zaunsensoren erlaubt. Als Kommunikationssysteme sind zusätzlich Satellitentelefon und -telefax vorgesehen.²⁷ Der *START-II-Vertrag* von 1993, der u.a. die weitere Abrüstung auf je etwa 4.000 Sprengköpfe vorsieht, führt keine neuen Verifikationsregelungen ein.²⁸

Die *Chemiewaffen-Konvention von 1992* verbietet Entwicklung, Herstellung, Lagerung und Einsatz chemischer Waffen und schreibt ihre Vernichtung vor. Sie erlaubt Inspektionsgerät (etwa zur Probennahme und Analyse, Kennzeichen und Siegel) sowie Instrumente zur kontinuierlichen Überwachung, die z.B. zwischen Inspektionen überprüfen, daß eine Chemiewaffen-Produktionsanlage stillgelegt bleibt.²⁹ Konkretere Regelungen (u.a. Richtlinien, Liste der zugelassenen Ausrüstung, Mustervereinbarungen und Vereinbarungen für konkrete Einrichtungen) müssen allerdings noch ausgearbeitet werden.³⁰

Die *Biologische-Waffen-Konvention* von 1972, die Entwicklung, Herstellung und Lagerung biologischer Waffen verbietet sowie deren Vernichtung vorschreibt, enthält bisher keine Verifikationsregelungen. In der Expertengruppe für mögliche Verifikationsmaßnahmen (VEREX), die 1992 und 1993 getagt hat, wurden Bodensensoren für die Überwachung einer Einrichtung von außen sowie Geräte zur kontinuierlichen Überwachung im Innern diskutiert, aber deren Tauglichkeit für den Nachweis biologischer Substanzen eher skeptisch beurteilt.³¹

25 Ein Foto der Prototyp-Anlage für die Nebenausfahrten, wie sie das Sandia National Laboratory in den USA aufgebaut hatte, findet sich in: S. N. Graybeal, P. Bliss McFate, Strategische Abrüstung - Verifikation als START-Hindernis?, Spektrum der Wissenschaft, Nr. 2, S. 42-50, Febr. 1990.

26 Protocol to the Treaty between the United States of America and the Union of Soviet Socialist Republics on the Limitation of Underground Nuclear Weapons Tests, 1 June 1990 (Conference on Disarmament, CD/1066); Protocol to the Treaty between the United States of America and the Union of Soviet Socialist Republics on Underground Nuclear Explosions for Peaceful Purposes, 1 June 1990 (Conference on Disarmament, CD/1067).

27 Protocol on Inspections and Continuous Monitoring Activities Relating to the Treaty between the United States of America and the Union of Soviet Socialist Republics on the Reduction and Limitation of Strategic Offensive Arms, 31 July 1991 (plus Annexes) (s. Fn. 10).

28 S. Fn. 10.

29 S. Fn. 11.

30 S. z.B.: J. Gee, Verification of the Chemical Weapons Convention, in: Altmann, Stock, Stroot (Fn. 6) (sowie eine Reihe weiterer Kapitel darin).

31 Ad hoc Group of Governmental Experts to Identify and Examine Potential Verification Measures from a Scientific and Technical Standpoint, Report, BWC/CONF.III/VEREX/9, Geneva, 1993.

Bezüglich Abrüstung und Vertrauensbildung in Europa ist anzumerken, daß hier noch keine Vor-Ort-Sensoren vorgesehen sind. Das gilt sowohl für den *Vertrag über konventionelle Streitkräfte in Europa* (KSE) von 1990, der für Panzer, gepanzerte Kampffahrzeuge, Artilleriewaffen, Kampfflugzeuge und Angriffshubschrauber Obergrenzen einführt, wie auch für die Vertrauens- und Sicherheitsbildenden Maßnahmen (*Wiener Dokument von 1990, 1992*), wo es um militärische Informationen, Kontakte und Manöverbeobachtung geht.³² Vor-Ort-Sensoren könnten in die Verifikation des KSE-Vertrags eingeführt werden bei der Überwachung der sog. gesicherten Lagerstätten, die im Detail noch nicht festgelegt ist. Die Bundesrepublik Deutschland hat zu diesem Bereich einige wenige Studien in Auftrag gegeben; aktuell läuft ein kleines Projekt zum automatischen Lesen elektronischer Kennzeichen an Toren und auf Flugplätzen.³³

Die im Rahmen der Konferenz für Sicherheit und Zusammenarbeit (KSZE) in Europa nunmehr zusammengelegten Verhandlungen in Wien (Forum für Sicherheitszusammenarbeit) befassen sich zunächst vordringlich mit der Harmonisierung der Begrenzungs- und Überwachungsbestimmungen für die nicht dem KSE-Vertrag angehörigen (d.h. die bisher neutralen und nicht-paktgebundenen) Staaten der KSZE. Weitere Themen sind Informationsübermittlung (über Streitkräfte, Militärausgaben, Einführung neuer Waffentypen), Nicht-Verbreitung und Waffenexport, Militärkontakte usw.

Die Bereitschaft zu einer Vertiefung und Erweiterung der Beschränkungen, etwa auf die Bereiche Seestreitkräfte, Waffenproduktion, Rüstungsexport, militärische Forschung und Entwicklung, ist bei den Staaten unterschiedlich und im Lichte der neuen Unklarheiten in Europa sowie mancher Bemühungen um verstärkte Interventionsfähigkeit gegenwärtig eher gering.

Vorschläge aus der Wissenschaft für die Untersuchung neuer Verifikationstechniken wurden bisher kaum aufgenommen. Staatliche Forschung und Entwicklung findet in größerem Maßstab nur in den USA statt.³⁴ Die deutschen Aktivitäten sind dagegen bescheiden.

Gerade die gewachsene Unsicherheit - und der ökonomische Zwang zur Sparsamkeit auch bei Militärausgaben - könnten die Staaten eigentlich veranlassen, für intensivere, umfassen-

32 Vertrag über konventionelle Streitkräfte in Europa, 19. Nov. 1990 (s. Fn. 5); Verhandlungen über Vertrauens- und Sicherheitsbildende Maßnahmen, Wiener Dokument 1990, 17. Nov. 1990, z.B. in: S. Palmisano, KSZE/VVSBM - Das Wiener Dokument 1990 - Chronik, Wien: Landesverteidigungsakademie, April 1991; Wiener Dokument 1992, 4. März 1992, z.B. in: Vienna Document 1992 of the Negotiations on Confidence- and Security-Building Measures Convened in Accordance with the Relevant Provisions of the Concluding Document of the Vienna Meeting of the Conference on Security and Co-operation in Europe, Vienna, 1992.

33 Aktivitäten bei der Firma MBB/DASA, Ottobrunn, beschreibt: G. Barthel, H.-G. Harbig, H. Köhler, Verifikation als Funktion der Rüstungskontrolle - Konzeption und technische Lösungsansätze, Soldat und Technik, Nr. 5, S. 312-320, 1991. Für die Firma Dornier, Friedrichshafen, s.: H. Schütte, Case Study: Monitoring of Arms Stores Using Sensors, in: Altmann, Stock, Stroot (Fn. 6). Zum Ablesen von Kennzeichen an Fahrzeugen läuft eine Erprobung, an der die Firmen AEG (Ulm), DASA (Ottobrunn), Diehl (Röthenbach/Pegnitz), Texas Instruments (Freising) und Technologie-Zentrum Nord (Unterlüß) beteiligt sind (Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Ref. FG IV 8, Herr Jordy, pers. Mitteilung).

34 1988 wurde die Defense Nuclear Agency (DNA) als hauptverantwortliche Agentur für Forschung, Entwicklung, Erprobung und Auswertung in den Bereichen Verifikation und Vertragseinhaltung benannt, woraufhin die DNA das Center for Verification Research gründete, s.: R. N. Davie Jr., CFE Verification Research in the United States, in: Altmann, van der Graaf, Lewis, Markl (Fn. 18). Das Argonne National Laboratory forscht und entwickelt auf vielen verschiedenen Gebieten, s.: A. DeVolpi, Verification Research in the USA: Argonne National Laboratory, in: J. B. Poole (ed.), Verification Report 1991 - Yearbook on Arms Control and Environmental Agreements, London/New York: VERTIC/Apex, 1991. Auch die drei Waffenlabors Los Alamos National Laboratory, Lawrence Livermore National Laboratory und Sandia National Laboratory haben Verifikations-Abteilungen gegründet. Die Torkontrollen für den INF-Vertrag wurden z.B. bei Sandia entwickelt und erprobt, s. Fn. 25.

dere Abrüstung, einschließlich verlässlicher Verifikation, einzutreten. Diese Studie zeigt einige Bereiche auf, wo staatliche Forschung und Entwicklung im Verifikationsbereich verstärkt werden sollten.

3. Sensorarten und ihre Eigenschaften

In diesem Kapitel werden - nach einer Diskussion der Klassifikationsmöglichkeiten für Sensoren in 3.1 - die für den Fahrzeug-Nachweis potentiell nutzbaren Sensorarten mit ihren wesentlichen Eigenschaften vorgestellt. 3.2 beschreibt die Sensoren für mechanische, einschließlich akustischer, Größen, in 3.3 werden solche für magnetische und elektro-magnetische, einschließlich optischer, Größen dargestellt. Tabelle 3.1 auf S. 14 gibt eine Gesamtübersicht über die Sensorarten.

Die diskutierten Sensor-Ausführungen sind nach dem Verwendungszweck gewählt, in der Regel sind es die Standardformen. Die in vielen Fällen möglichen Sonderformen mit erheblich höheren Leistungen, die mit viel höherem Aufwand, etwa als Einzel-Labormuster, hergestellt werden, werden nicht berücksichtigt.³⁵ Die jeweils angegebenen Listen von Lieferanten sind nicht vollständig und in der Regel auf Firmen/Vertretungen in Deutschland beschränkt.

Für die hier untersuchte Aufgabe der automatischen Erfassung und Unterscheidung von Land- und Luftfahrzeugen kann man in begrenztem Maß auf vorhandene Sensorsysteme und vorhandene Literatur zurückgreifen. Das gilt für die Bereiche Straßenverkehrsüberwachung, Fluglärm oder Objektschutz - hier sind jedoch die Erkennungsaufgaben allgemeiner (Fahrzeugzählung, Grenzwertüberwachung), die zu erkennenden Objekte sind andere (z.B. eindringende Personen), und die Überwachung erfolgt mit Personal vor Ort (Alarmzentrale einer bewachten Einrichtung).³⁶

3.1 Klassifikation von Sensoren

Sensoren lassen sich auf viele verschiedene Arten klassifizieren. Bezogen auf die *Entfernung* zum erfaßten Objekt ergibt sich eine Abstufung in Sensoren, die unmittelbaren *Kontakt* brauchen (z.B. eine Waage, ein chemischer Sensor in einem Reaktionsgefäß), sowie in Sensoren für den *Nahbereich* (einige Meter Abstand, z.B. eine Lichtschranke), für *mittlere* (einige Meter bis einige hundert Meter, z.B. ein Mikrofon) und für *große Entfernungen* (Kilometer bis zehntausende von Kilometern, z.B. ein Radar, eine Kamera).

Je nach Art der *Wechselwirkung mit dem Objekt* spricht man von *passiven Sensoren*, wenn sie vom Objekt ausgehende Wirkungen nachweisen. *Aktive Sensoren* müssen dagegen eine Energieform aussenden, um deren am Objekt reflektierten Anteil zu erfassen (z.B. Radar, Kamera mit Scheinwerfer). Sollte das Objekt eigene Erfassungssysteme für diese Energieform haben und selbst mit der Aussendung einer spezifischen Nachricht antworten, kann man von *interaktiven Sensoren* sprechen (z.B. Radar-Transponder auf Flugzeugen, induktiv gelesene elektronische Kennzeichen).

35 Für allgemeine Literatur über Sensoren s. z.B.: W. Göpel, J. Hesse, J. N. Zemel (eds.), *Sensors - A Comprehensive Survey* (8 Bände), Weinheim: Verlag Chemie, 1989 - 1993.

36 Einige beispielhafte Quellen in den angesprochenen Bereichen sind: Verkehrsüberwachung: M. Cremer, *Der Verkehrsfluß auf Schnellstraßen - Modelle, Überwachung, Regelung*, Berlin usw.: Springer, 1979; R. Lapierre, G. Steierwals, *Verkehrsleittechnik für den Straßenverkehr*, Band I, Grundlagen und Technologien der Verkehrsleittechnik, Berlin usw.: Springer, 1987; *Sensors in highway and civil engineering - Proceedings of the conference organized by the Institute of Civil Engineers*, London, 5 Febr. 1981, London: Thomas Telford, 1981. Straßen- und Fluglärm: P. M. Nelson (ed.), *Transportation Noise Reference Handbook*, London etc.: Butterworths, 1987. Objektschutz: C. Schnabolk, *Physical Security: Practices and Technology*, Boston etc.: Butterworth's, 1983; *Annual Meetings of the Institute of Nuclear Materials Management; Carnahan Conferences on Security Technology*.

Die *Umgebung* des Sensors kann das Innere eines Gebäudes sein - hier könnte man noch zwischen Überwachung von Räumen und von Anlagen (Schränken, Rohren usw.) unterscheiden -, oder sie können für die Anwendung außen konzipiert werden. Im letzteren Fall sind zwei Aspekte wichtig. Beim ersten geht es darum, ob die Sensoren unabhängig von der Tageszeit funktionieren oder ob sie auf Tageslicht angewiesen sind. Der zweite - vor allem bei Sensoren für mittlere und große Entfernungen wichtige - Gesichtspunkt ist die Frage, ob sie unter allen Wetterbedingungen arbeiten oder ob z.B. Nebel, Wolken oder Regen das Erfassen verhindern können. Mit der Umgebung in gewissem Zusammenhang steht die Erreichbarkeit für Wartung oder bei Alarm - an einem Tor ist Straßenverbindung gegeben, in freiem Gelände oft nicht.

Eine andere Klassifikation betrifft den *naturwissenschaftlichen Effekt*, auf dem ein Sensor basiert. Man kann hier zunächst Sensoren für physikalische, chemische und biologische Größen unterscheiden, die z.B. Kraft oder Magnetfeld, pH-Wert oder Stoffklasse, Enzyme oder Erreger bestimmen. Bei den in dieser Arbeit diskutierten physikalischen Sensoren kann man weiter unterteilen in solche, die mechanische (auch akustische, seismische), elektromagnetische (auch magnetische, optische) oder kernphysikalische (Nuklearstrahlung) Wirkungen nutzen.

Die *Anbringungsart* kann ortsfest oder mobil (handgetragen, an Bord von Kraftfahrzeugen, Schiffen oder Flugzeugen) sein. Unter den hier vor allem diskutierten ortsfesten Sensoren kann man zunächst unterscheiden zwischen den innerhalb von Gebäuden angebrachten, die im Zusammenhang der Fahrzeug-Überwachung nur in Ausnahmefällen eine Rolle spielen (innerhalb von Fahrzeughallen und Flugzeug-Hangars können im wesentlichen dieselben Sensorsysteme wie zur Torkontrolle verwendet werden). Unter den außen zu verwendenden Sensoren kann man dann weiter unterteilen in die, die an einem Tor, und die, die vollständig im Freien aufgestellt werden. Die Anforderungen an Wetter- und Temperatur-Festigkeit bzw. an den entsprechenden Schutz sind bei letzteren am höchsten. Sensoren für den Außenbereich können in verschiedener Höhe montiert sein: unterirdisch, in der (Fahrbahn-) Oberfläche, an Gestellen oder auf Masten.

Die *Signalart* eines Sensors kann *binär* sein (Ja-Nein-Aussage, z.B. bei einer Lichtschranke) oder *analog*, d.h. der Signalwert kann auf einer ganzen Skala variieren.

Die *räumliche Dimensionalität* eines Sensor-Signals kann geringer sein als die des erfaßten Bereichs. So tastet eine Lichtschranke etwa eine ganze Linie ab, das Signal enthält aber keine Information darüber, an welcher Stelle die Linie unterbrochen wurde (die räumliche Dimension ist Null). Ein Kamerabild der dreidimensionalen Umgebung enthält nur zwei Dimensionen. Dagegen liefert ein Radarsystem aus der Laufzeit des Echos auch die Entfernung, ergibt also - mit der Strahlrichtung in zwei Dimensionen - dreidimensionale Rauminformationen. Durch einen passiven Sensor mit Richtwirkung und ein- oder zwei-dimensionaler Schwenkmöglichkeit kann eine ein- oder zweidimensionale Rauminformation gewonnen werden. Durch Benutzung mehrerer Sensoren an verschiedenen Orten kann insgesamt eine Information mit höherer räumlicher Dimension erzeugt werden (ein Lichtschrankenfeld kann zwei Dimensionen liefern, zwei versetzte Kameras drei usw.). Auch ist es möglich, mit Vorwissen und geeigneter Verarbeitung mehrdimensionale Auswertungen zu machen (in einem Bild können z.B. Perspektive und Verdeckung Tiefen-Informationen liefern).

Tab. 3.1 Übersicht über mögliche Sensorarten, die für automatische Verifikation von Konversionsvereinbarungen in bezug auf Land- und Luftfahrzeuge sowie Schießplätze, Tiefflug- und Testgelände in Frage kommen.

Sensorart	Wechselwirkung	Reichweite	Signalart ¹	räuml. Dimensionen ² einzeln / mit MSA	Kosten in DM	mögliche Anwendung hier
Mechanisch-akustische Sensoren						
Kontaktschwelle	passiv	0	binär	0	einige 100	Achserfassung, Geschwindigkeit, Achsabstand
Piezoelektrischer Drucksensor	passiv	0	analog	0	500-5.000 bzw. 100.000/km	Wägung, Achserfassung, Geschwindigkeit, Achsabstand, Zaunüberwachung
Straßenfahrzeugwaage	passiv	0	analog	0	10.000-100.000	Wägung
Eisenbahnwaage	passiv	0	analog	0	wenige 100.000	Wägung
Geofon	passiv	einige 100 m bis einige km	analog	0 / 2-3	200-10.000	Fahrzeugnachweis, -typerkennung, Knallerfassung
Mikrofon	passiv	einige 100 m bis einige 10 km	analog	0 / 2-3	50-5.000	Fahrzeugnachweis, -typerkennung, Knallerfassung
Hydrofon	passiv/aktiv	einige 100 m bis viele 1000 km	analog	0 / 2-3	5.000-10.000	-
Ultraschall-Sensor	aktiv	einige 10 m	analog	1	einige 100 - einige 1.000	Fahrzeugnachweis, -höhenprofil
Elektrisch-magnetisch-optische Sensoren						
Magnetfeld-Sensor	passiv	einige 10 m (SQUID: einige 100 m)	analog	0 / 2-3	100-5.000	Fahrzeugnachweis
Induktionsschleife	aktiv	1 m	analog	0	10.000-30.000	Fahrzeugnachweis, -geschwindigkeit, -länge
Induktiver Kennzeichenleser	aktiv	einige m	digitale Info.	0	einige 1.000	Fahrzeug-Typ, -identität u. a.
Elektromagnetischer Kennzeichenleser	aktiv	einige 100 m	digitale Info.	0	einige 1.000	Fahrzeugtyp, -identität u. a.
Optischer Kennzeichenleser	aktiv	einige 10 m	digitale Info.	0	einige 1.000	Fahrzeugtyp, -identität u. a.
Halboffenes Mikrowellen-Kabel	aktiv	einige m	analog	0 / 1	bis 100.000/km	-
Infrarot-Sensor	passiv	einige 10 m	analog	0 / 2	100-5.000	-
Fotokamera	passiv/aktiv	einige m - einige km	(analog)	2 / 3	500-5.000	Fahrzeugtyp, -identität
Fernsehkamera	passiv/aktiv	einige m - einige km	analog	2 / 3	1.000-10.000	Fahrzeugtyp, -identität, -bewegung
Lichtschranke	aktiv	einige m - einige 100 m	binär	0 / 2	100-500	Fahrzeugnachweis, -geschwindigkeit, -form
Radar	aktiv	einige m - einige 100 km	analog	1-3	10.000 - viele Mio.	Objekterfassung, -ort, -bewegung, Fahrzeugform
Laser-Radar	aktiv	einige m - einige km	analog	3	einige 1.000-1 Mio.	Fahrzeugerfassung, -bewegung, -form
Röntgengerät	aktiv	einige cm - einige m	analog	2	100.000-20 Mio.	-

1 Durch Schwellwerterschaltungen kann man aus Analogsignalen binäre Signale erzeugen. Die von Kennzeichen abgelesene digitale Information kann sehr komplex sein.

2 Bei Sensoren, die Kontakt oder sehr kurzen Abstand brauchen, ist als räumliche Dimension Null angegeben, da sie keine Objekte an verschiedenen Positionen orten können. Mehr-Sensor-Anordnungen (MSA) erlauben oft, die Richtung zu einer Quelle (d.h. zwei räumliche Dimensionen) zu bestimmen; mit mehreren solchen Anordnungen oder mit Zusatzinformation kann der genaue Ort bestimmt werden (drei räumliche Dimensionen).

Es sind eine Reihe weiterer Unterscheidungskriterien möglich, etwa die Genauigkeitsklasse oder der Preis. Hier soll noch die Kategorie der integrierten Mikrosensoren erwähnt werden, die auf modernen Methoden der Halbleiterbearbeitung basieren und z.T. durch Massenfertigung niedrige Preise ermöglichen.³⁷ Für die in dieser Studie diskutierten Vor-Ort-Anwendungen ist es aber zunächst nicht wichtig, daß die Sensoren sehr klein oder sehr billig sind. In vielen Fällen sind herkömmliche Sensoren genauer und zu akzeptablen Preisen erhältlich.

3.2 Übersicht über mechanisch-akustische Sensoren

Hier geht es um die mechanischen Größen Kraft, Druck, Vibrationsgeschwindigkeit. Der akustische Schalldruck kann ebenfalls als mechanische Größe aufgefaßt werden.

Kontaktschwelle³⁸

Ein quer zur Fahrbahn verlegter Schlauch von etwa 1 cm Durchmesser wird beim Überfahren durch die Räder eines Kraftfahrzeugs zusammengedrückt. Die früher verwendeten Kontakt-Kabel haben sich als zuwenig dauerhaft erwiesen, so daß heute vor allem das pneumatische Prinzip verwendet wird: die Luft im Schlauch wird zusammengedrückt, und ein Druckschalter am Schlauchende neben der Straße schließt den Kontakt. (Ein piezoelektrisches Druckmeßkabel kann ähnlich genutzt werden, s.u.)

Die Kontaktschwelle erzeugt ein binäres Signal für jede Achse, so daß Achsen gezählt werden können. Zwei in kurzem Abstand verlegte Schwellen können zur Messung der Geschwindigkeit und daraus auch der Achsabstände verwendet werden. Damit ist eine grobe Klassifizierung der Fahrzeuge möglich.

Probleme gibt es bei der Trennung mehrerer nebeneinander verlaufender Fahrspuren. Bei Kettenfahrzeugen kann es vorkommen, daß der Schlauch zwischen einzelnen Kettenelementen liegt und somit nicht zusammengedrückt wird. Weil der Schlauch laufend stark deformiert wird, ist der Sensor nicht über lange Zeit stabil.

Eine Kontaktschwelle mit Auswertelektronik kostet einige 100 bis 1.000 DM.

In der Eisenbahn-Sicherungstechnik werden verschiedene Arten von Kontakten zur Erfassung und Zählung von Rädern bzw. Achsen, zur Richtungs- und Geschwindigkeitsbestimmung verwendet: Stromkreise zwischen beiden Schienen, die durch die Achsen geschlossen werden; pneumatische, magnetische und elektronische Kontakte.³⁹

37 S. z.B.: S. Middelhoek, S. A. Audet, Silicon Sensors, London etc.: Academic Press, 1989. Neuere Arbeiten finden sich v.a. in den Zeitschriften Sensors and Actuators A (Physikalische Sensoren) und B (Chemische Sensoren).

38 Z.B.: Cremer (Fn. 36), Sensors in highway and civil engineering (Fn. 36).
Hersteller/Vertrieb z.B.: Geisthardt, Peine; Impact, Köln.

39 S. z.B.: H.-J. Arnold u.a., Eisenbahnsicherungstechnik - ein Leitfaden für Betriebseisenbahner (2. Aufl.), Berlin: transpress, 1968; J. Fiedler, Grundlagen der Bahntechnik - Eisenbahnen, S-, U- und Straßenbahnen (2. Aufl.), Düsseldorf: Werner, 1980.

Piezoelektrischer Drucksensor⁴⁰

Hierbei handelt es sich um eine dünne Kunststoff-Folie, die beim Zusammendrücken elektrische Ladungen erzeugt.⁴¹ Die Ladung ist ein Maß für den Druck bzw. die Kraft. Diese Folie kann in fast beliebiger Form geschnitten werden, etwa als längliches Kabel oder als quadratische "Fliese". Zum Schutz wird sie z.B. mit Gummi umhüllt. Ein Kabelsensor ist entweder rund (ca. 0,5 cm Durchmesser) oder rechteckig flach (ca. 0,5 cm hoch, ca. 3 cm breit). Als Fliese sind Größen um 1,2 mal 1,2 m² verwendet worden.⁴² Druckmeßkabel kann entweder flach auf die Straße geklebt oder in eine Nut mit Metallrahmen eingebaut werden. Mehrere Kabel können direkt nebeneinander verlegt werden, so daß auch Kettenfahrzeuge zuverlässig erfaßt werden; eine Fliese wird von vornherein immer getroffen.

Der beim Überrollen gemessene Druck kann entweder - mit einem Schwellwert-Detektor - nur zum Zählen von Achsen sowie in einer Paar-Anordnung zum Messen von Geschwindigkeiten und Achsabständen verwendet werden (wie bei Kontaktschwellen). Durch mehrere Schwellwerte ist auch eine grobe Unterscheidung zwischen Pkw, leichten und schweren Lkw, Kettenfahrzeugen möglich. Wird aber - durch Fliesen oder Vielfach-Kabel - die gesamte Reifen- oder Ketten-Aufstandsfläche erfaßt, kann man auch die Achslasten und das Gesamtgewicht messen. Dabei sind - bei sehr langsamer Fahrt - Genauigkeiten um 1 bis 2% möglich, bei normaler Geschwindigkeit verschlechtert sich das durch die dynamischen Kräfte auf 10 bis 20%.

Typische Kosten sind einige hundert bis wenige 1.000 DM für einen Sensor mit Ladungsverstärker; eine Mehrfach-Anordnung mit Datenverarbeitung für Gesamtgewicht usw. liegt im Bereich von wenigen 10.000 bis 100.000 DM.

Piezo-Kabel können auch zur Zaunüberwachung eingesetzt werden. In den Zaun eingeflochten, signalisieren sie Biegung und Vibration; mit geeigneten Schwellwerten kann z.B. Überklettern oder Durchschneiden festgestellt werden. Für 1 km Zaunlänge sind einschließlich Elektronik etwa 100.000 DM anzusetzen.

Straßenfahrzeugwaage⁴³

Hier wird meist die elastische Verformung von Metallkörpern gemessen, in der Regel mittels Dehnungsmeßstreifen. Es gibt unterschiedliche Ausführungsformen. Tragbare Wägelplatten sind etwa 2 cm stark und 0,4 mal 0,6 m² groß; sie werden vor die Reifen gelegt, und das Fahrzeug fährt dann darauf. Die Platte liegt auf zwei Seiten auf einem Rahmen auf, und ihre Durchbiegung ist ein Maß für die jeweilige Radlast. Die Genauigkeit ist besser als 1%, und eine Platte kostet 5.000 - 10.000 DM. Solche Platten gibt es auch für die dynamische Messung bei der Überfahrt, bei Genauigkeiten um einige Prozent. Größere Platten können bündig in die Fahrbahn eingearbeitet werden, sie liefern dann bei der Überfahrt etwas ungenauere Meßwerte für die Achslasten als im Stand - diese werden etwa zum Vor-

40 Z.B.: J. Krautkrämer, H. Krautkrämer, Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Berlin usw.: Springer, 1986, S. 127-132.

Hersteller/Vertrieb: Piezo Film Sensors Europe - AMP, Stanmore, Middlesex, Großbritannien (früher Atochem); Focas, Swindon, Wiltshire, Großbritannien; Impact, Köln; Multanova, Düsseldorf.

41 Der Name kommt vom griechischen Wort für Druck.

42 Dabei enthielt jede Fliese drei 0,4 m breite Sensorelemente, s.: D. Cebon, Interaction Between Heavy Vehicles and Roads, The Thirty-Ninth L. Ray Buckendale Lecture, Warrendale PA: Society of Automotive Engineers, 1993, S. 32 f.

43 Z.B.: Cremer (Fn. 36); Sensors in highway and civil engineering (Fn. 36).

Hersteller/Vertrieb z.B.: Neusser Waagenfabrik, Neuss; Pietzsch Automatisierungstechnik, Ettlingen; Carl Schenck, Darmstadt.

sortieren bei der Lkw-Gewichtskontrolle verwendet. Eine solche Anlage kann 50.000 - 100.000 DM kosten.

Aufwendiger und in der Regel fest eingebaut sind Waagen mit Brücken, auf denen das ganze Fahrzeug steht. Die Brücke ruht auf vier Kraftmeßdosen, deren Verformung gemessen wird. Typische Genauigkeiten sind einige Zehntel Prozent; diese Waagen werden oft zum Messen der Lkw-Beladung verwendet. Die Kosten liegen um 80.000 DM. Für den Verifikationszweck ist die hohe Genauigkeit jedoch nicht erforderlich, und der Zwang zum Stillstand würde den Fahrzeugfluß behindern.

Eisenbahnwaage⁴⁴

Hier werden Rad-, Achslasten oder ganze Wagen gewogen. Verschiedene Prinzipien werden benutzt: Kraftmeßdosen zwischen Schienen und Schwellen wiegen die Achslasten über ihre Verformung. Dehnungsmeßstreifen an den Schienen messen die Deformation der Schienen zwischen den Schwellen, wobei die Dehnungsmeßstreifen entweder längs auf der Schienenunterseite oder diagonal seitlich angebracht werden können. Diese Verfahren können die Achslasten auch während der Fahrt bestimmen; zur Kompensation von dynamischen Kräften werden die Kräfte an vielen Stellen (auf 10 bis 20 m Länge) gemessen und gemittelt. Bisher werden solche Systeme im Rangierbetrieb verwendet, so daß Geschwindigkeiten unter 20 km/h gehandhabt werden müssen. Es ist aber möglich, die Systeme auf bis zu 100 km/h zu erweitern. Je nach Meßprinzip sind so Wägungen mit Genauigkeiten zwischen 0,5 und 2% möglich. Ein Wägesystem mit Auswerte-Einheit kostet wenige 100.000 DM.

Für sehr genaue Messungen gibt es auch hier Brückenwaagen, die jeweils einen Eisenbahn-Wagen im Stand wiegen. Dabei sind Genauigkeiten von Zehntel Prozent üblich; mit ihrer Hilfe wird z.B. die Befüllung von Tankwagen gemessen. Der Preis liegt bei 100.000 - 200.000 DM. Wie bei Straßenfahrzeugwaagen ist für die Verifikation keine so hohe Genauigkeit nötig, und die Notwendigkeit, jeden Wagen einzeln im Stehen zu messen, bedingt zu große Behinderungen.

Geofon⁴⁵

Ein Geofon nimmt die Bodenvibration (seismische Wellen) auf. In der Regel wird elektrodynamisch die Bodengeschwindigkeit gemessen. Bodenvibration durch Fahrzeuge entsteht zum einen direkt durch zeitlich veränderliche Kräfte auf den Boden (Reifenprofil, Ketten-glieder, Fahrwerks- u.a. Vibration, Straßenrauhigkeit), zum anderen indirekt durch Einkopplung von Schall in den Boden. Schwere Fahrzeuge können noch in einigen hundert Meter Entfernung nachgewiesen werden, wenn der Motor läuft oder wenn sie fahren.⁴⁶ Flugzeuge werden etwa so weit erfaßt, wie ihr Schall zu hören ist (hunderte Meter bis

44 Hersteller/Vertrieb z.B.: Carl Schenck, Darmstadt; Siemens Verkehrstechnik, Braunschweig.

45 Z.B.: B. S. Evenden, D. R. Stone, N. A. Anstey, *Seismic Prospecting Instruments*, vol. 2, *Instrument Performance and Testing*, Berlin usw.: Gebr. Borntraeger, 1971; G. Braun, *Das Geophon - Wesentliche Eigenschaften und ihre Überprüfung*, Prakla-Seismos, Report 3/1976 (auch: *Prakla-Seismos Digest*, vol. 3).

Hersteller/Vertrieb z.B.: Lennartz electronic, Tübingen; Geosource/Sensor Nederland, Voorschoten, Niederlande; Teledyne/Geotech, Dallas TX, USA.

46 R. Alfier et al., *Ground Vibration and Acoustic Waves Produced by Land Vehicles of the Warsaw Treaty Organization - Results of the Measurements at Doksy, CSFR, Verification - Research Reports*, no. 1, Bochum: Brockmeyer, 1991; J. Altmann et al., *Ground Vibration, Acoustic Waves and Magnetic Disturbance Produced by Land Vehicles of the North-Atlantic Treaty Organization - Results of the 1989 Measurements at Baumholder, FRG, Verification - Research Reports*, no. 3, Bochum: Brockmeyer, 1993.

einige km). Falls in der Umgebung zusätzlicher Lärm und Vibration vorhanden sind, verringern sich die Reichweiten entsprechend. Zum Schutz vor Beschädigung werden Geofone häufig 0,5 bis 1 m tief vergraben. Ein Geofon ist 0,1 bis 0,3 m groß; je nach Empfindlichkeit, Frequenzbereich und Anzahl der gemessenen Geschwindigkeitsdimensionen kostet es zwischen 200 und 10.000 DM. Mit einem Schwellwertdetektor kann man Land- und Luftfahrzeuge feststellen; die gemessenen Signalformen lassen aber auch sehr weitgehende Schlüsse auf die Art des Fahrzeugs zu. Mit mehreren Geofonen kann die Richtung zu einer Signalquelle bestimmt werden.

Montiert man ein Geofon an eine Eisenbahnschiene oder -schwelle, kann man Zugüberfahrten mit hoher Empfindlichkeit feststellen.⁴⁷

Mikrofon⁴⁸

Ein Mikrofon mißt die schnellen Veränderungen des Luftdrucks (bzw. der Teilchengeschwindigkeit), wie sie bei Schallwellen auftreten. Die Umwandlung in elektrische Signale geschieht auf verschiedene Arten, bei den besseren Mikrofonen auf kapazitivem Weg (die Luft bewegt eine metallische Membran vor einer Metallplatte, so daß sich die Kapazität dieses Kondensators ändert). Land- und Luftfahrzeuge sowie Schiffe erzeugen charakteristischen Schall, der vor allem vom Antriebsaggregat, aber auch von anderen Teilen (Reifen, Rumpf, Nebenaggregaten usw.) herrührt und bei geringem Umgebungsgläusch in mehreren hundert Meter bis zu einigen Kilometer Abstand nachgewiesen werden kann. Mikrofone können direkt über dem Boden, auf Masten oder an Gebäuden angebracht werden.

Die Auswertung der Signalform kann viele Informationen über die Art der Schallquelle ergeben. Mittels eines Reflektors läßt sich eine räumliche Richtwirkung erzielen. Mit einer dreidimensionalen Anordnung aus mehreren Mikrofonen kann man aus den Laufzeitunterschieden die Orientierung zu einer Schallquelle bestimmen. Ein Mikrofon - ggf. mit Spannungsversorgung und Vorverstärker - kostet je nach Genauigkeit und Frequenzbereich zwischen 50 und 5.000 DM.

Hydrofon (Unterwasserschall-Sensor, Sonar)⁴⁹

Unterwasser-Schall kann mittels Hydrofonen (z.B. piezoelektrischer Wandler) in elektrische Signale umgewandelt werden. Überwasserschiffe und Unterseeboote erzeugen - vor allem durch die Maschine und die Schraube - typische Geräusche. Ein Hydrofon ist etwa 0,1 m groß. Es kann am Grund, am Ufer oder an einer Boje verankert werden; ein Schiff kann es an der Außenwand tragen oder nachschleppen. Im Ozean liegen die Reichweiten für passives Hören bei einigen zehn Kilometern, unter speziellen Bedingungen können sich aber auch mehrere tausend Kilometer ergeben. In Häfen und Binnengewässern sind es - je nach Umgebungsgläusch - einige 100 Meter bis einige Kilometer. Durch Verarbeitung der

47 Für einen Vorversuch zur Zug-erzeugten Schienenvibration s.: M. Ibs-von Seht, Gutachten über seismische Messungen zur Realisierung eines Frühwarnsystems für Gleisarbeiten, in: P. Zec (Hg.), Designpreis des Landes Nordrhein-Westfalen '93, Essen: Design-Zentrum Nordrhein-Westfalen, 1993.

48 Z.B.: C. M. Harris (ed.), Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control, New York etc.: McGraw-Hill, 1991.
Hersteller/Vertrieb z.B.: Brüel & Kjaer, Quickborn; Norsonic, Oelde-Stromberg; Sennheiser, Wedemark.

49 Z.B.: R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, New York etc: McGraw-Hill, 1983.
Hersteller/Vertrieb von Hydrofonen z.B.: Brüel & Kjaer, Quickborn.

Signale einer Anordnung aus mehreren Hydrofonen kann die Richtung zu einer Quelle bestimmt werden.

Man kann auch Unterwasserschall-Signale aktiv aussenden, um Objekte aufgrund ihrer Echos zu orten (aktives Sonar, vergleichbar dem Radar). Dann kann aus der Laufzeit zusätzlich die Entfernung gewonnen werden. Typische Reichweiten sind einige km. Bekannt sind auch die Anwendungen zur Tiefenmessung und zum Entdecken von Fischschwärmen (Echolot).

Ein (gutes) Hydrofon mit Ladungsverstärker kostet 7.000 DM, ein Echolot-System von 1.000 bis viele 10.000 DM. (Die praktisch nur militärisch genutzten Multi-Sensor-Anordnungen mit aufwendiger Signalverarbeitung zum Orten von Schiffen und Unterseebooten können viele Millionen DM kosten.)

Ultraschall-Sensor⁵⁰

Hier handelt es sich um einen aktiven Sensor. Ein Ultraschall-Puls wird gerichtet ausgesandt; die Laufzeit des Echos erlaubt, die Entfernung zu einem Objekt zu messen. Zusammen mit der Strahlrichtung wird somit eine (grobe) dreidimensionale Information gegeben. In der Regel sind Pulsgeber und -aufnehmer identisch (Piezokristall). Typische Reichweiten sind einige zehn Meter. Ultraschall-Sensoren werden zur Entfernungsmessung sowie auch im Verkehrswesen zum Fahrzeugnachweis und zur Geschwindigkeitsmessung verwendet. Bei kurzen Abständen (z.B. auf einer Brücke über einer Straße montiert) kann sogar der Höhenverlauf eines Fahrzeugs über seiner Länge, d.h. seine Form, grob erfaßt werden. Ein Ultraschall-Sensor ist ca. 0,1 m groß und kann einige 100 bis einige 1.000 DM kosten.

3.3 Übersicht über elektrisch-magnetisch-optische Sensoren

Hier werden das magnetische Feld oder elektromagnetische Wellen erfaßt. Als optische zählt man solche elektromagnetischen Größen, bei denen die Wellenlängen im Sichtbaren oder benachbart liegen. Rein elektrische Größen sind für die Erfassung von Fahrzeugen, Geschossen oder Flugkörpern nicht von Bedeutung.

Magnetfeld-Sensor⁵¹

Landfahrzeuge enthalten praktisch immer Komponenten aus Stahl, die entweder selbst permanent magnetisch sind oder im Erdmagnetfeld magnetisiert werden. Deren Magnetfelder überlagern sich dem Erdmagnetfeld und können in der Umgebung des Fahrzeugs als Abweichungen vom Normalwert gemessen werden. Weil das Magnetfeld stark mit der Entfernung abfällt (Dipol: mit der dritten Potenz), sind mit einfachen Sensoren (z.B. auf der Basis des Hall-Effekts) Reichweiten von Zentimetern bis zu einigen Dezimetern möglich; mit hochempfindlichen herkömmlichen Sensoren (z.B. magneto-resistiv) können größere Fahrzeuge auf 20 bis 40 m erfaßt werden.⁵² Damit sind herkömmliche Magnetsensoren vor allem für Fahrbahn-Installation (etwa an Toren) geeignet, für Umfriedungen oder andere Kontroll-

50 Z.B.: Cremer (Fn. 36); Lapiere/Steierwald (Fn. 36);

Für Verkehrsanwendungen wurden keine Bezugsquellen gefunden. Ein Hersteller von Ultraschall-Sensoren für die Innenraumüberwachung im Objektschutz ist: Alarmcom Leutron, Filderstadt.

51 Z.B.: R. Boll, K. J. Overshott (eds), *Sensors*, vol. 5: *Magnetic Sensors*, Weinheim: Verlag Chemie, 1989.

Hersteller/Vertrieb z.B.: AEG Sondertechnik, Wedel; Deutsche Systemtechnik, Bremen; MBB/DASA, Nabern.

52 J. Altmann u.a. (Fn. 46), ch. 6; W. W. Baus, V. Journé, *Magnetic Detection to Verify Movement of Heavy Military Land Vehicles*, in: Altmann, van der Graaf, Lewis, Markl (Fn. 18).

Linien müßte die Reichweite ca. zehnfach, die Empfindlichkeit also ca. tausendfach gesteigert werden. Das ist mit supraleitenden Sensoren (sog. SQUIDS) prinzipiell demonstriert worden.⁵³

Für Verkehrserfassung werden Magnetsensoren nur sehr selten benutzt, die meisten bisherigen Anwendungen empfindlicher Systeme sind militärisch (z.B. Minenzünder). Ein Magnetsensor ist einige Zentimeter groß. Je nach Empfindlichkeit und Anzahl der Feldkomponenten kosten Magnetsensoren von 100 bis 5.000 DM.

Induktionsschleife⁵⁴

Läßt man in einer Drahtschleife einen Wechselstrom fließen, bildet sich in der Umgebung ein magnetisches Wechselfeld aus. Kommt ein metallisches Objekt in die Nähe, werden in diesem Spannungen induziert und es fließen Ströme, die sich auf den Strom in der Schleife meßbar auswirken. Solche Induktionsschleifen sind aktive Sensoren. Sie sind in der Fahrbahn in Nuten verlegt, sie messen normalerweise ca. 2 mal 3 m². Typische Frequenzen sind einige 10 Kilohertz. Fährt ein Fahrzeug über die Schleife, ergibt sich ein Signal, dessen Stärke vor allem von der Höhe der Achsen und des Fahrzeug-Bodens abhängt, während die Dauer durch Geschwindigkeit und Fahrzeuglänge gegeben ist. Zwei hintereinander liegende Schleifen erlauben, die Geschwindigkeit und damit die ungefähre Länge zu messen. Mehrere Fahrbahnen können durch getrennte Schleifen einzeln erfaßt werden. Durch Verarbeitung der Signale ist eine grobe Klassifizierung nach Fahrzeugarten (Pkw mit/ohne Anhänger, Lkw, Bus usw.) möglich.⁵⁵ Würde man die Schleifen in Fahrtrichtung kürzer machen (z.B. 0,5 bis 1 m), ließen sich noch detailliertere Informationen gewinnen, die sogar einzelne Fahrzeugtypen erkennen lassen können. Eine oder zwei Schleifen mit Steuer- und Auswertegerät kosten zwischen 10.000 und 30.000 DM.

Induktiver Kennzeichenleser⁵⁶

Auch hier wird eine Spule von einem Wechselstrom durchflossen. In einer zweiten Spule, die in dem Kennzeichen auf dem zu erkennenden Objekt angebracht ist, wird eine Spannung induziert. Dadurch wird zunächst die elektronische Schaltung im Kennzeichen mit Strom versorgt. Dann wird der Strom in der zweiten Spule geeignet moduliert, was auf die erste Spule zurückwirkt und gemessen werden kann. Durch Modulation beider Ströme (in Amplitude, Frequenz usw.) können die Spulen bei diesem interaktiven Sensor also Informationen austauschen; Codes können die Echtheit des Objekts beweisen, und Zusatzinformationen über das Objekt können erfaßt werden. So kann das ortsfeste System z.B. Fahrzeuge identifizieren, klassifizieren, zählen usw. und z.B. Tore öffnen o.ä. In vielen Fällen sind die Kennzeichen scheckkartengroß oder gar kleiner.

53 Allerdings wurde hier die aufwendige Kühlung mit flüssigem Helium benutzt, s.: M. Wynn et al., *Advanced Superconducting Gradiometer/Magnetometer Arrays and a Novel Signal Processing Technique*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. MAG-11, no. 2, pp. 701-707, March 1975. In der Zukunft könnten Hochtemperatur-Supraleiter mit Stickstoffkühlung zu praktisch einsetzbaren SQUID-Sensoren führen, s. z.B.: Baus, *Journé* (Fn. 52).

54 Z.B.: Cremer (Fn. 36); Lapiere/Steierwald (Fn. 36).
Hersteller/Vertrieb z.B.: ave Verkehrs- und Informationstechnik, Aachen; biandi, Ahrensburg; Geisthardt, Peine; Impact, Köln; Prodata, Hamburg; Weiss electronic, Trier.

55 S. z.B.: P. Böhnke u.a., *Ein Verkehrsdatenerfassungssystem für das Straßennetz - Konzept und Realisierung*, Frequenz, Bd. 41, Nr. 4, S. 88-94, 1987.

56 Hersteller/Vertrieb z.B.: DASA/MBB, Ottobrunn; Disys, Cheltenham, Großbritannien; Indala, San Jose CA, USA; Mikron, Graz, Österreich; Pepperl+Fuchs, Mannheim; Scemtec, Marienheide; Siemens, Nürnberg; Texas Instruments, Freising.

Die Spulen können senkrecht (an Wänden, auf einem Rahmen) oder waagrecht (in den Boden) angebracht werden. Die Übertragungsfrequenzen liegen im Bereich von 100 bis einige 100 Kilohertz. Mit Spulengrößen von 0,5 mal 0,5 m² für das Abfragesystem und 10 mal 10 cm² für das Kennzeichen sind Reichweiten von Dezimetern bis ca. 1 Meter möglich.

Die Kosten für ein Kennzeichen richten sich nach der Leistungsfähigkeit der eingebauten Elektronik sowie nach Maßnahmen für die Robustheit; für Verifikationszwecke kann man zwischen 100 und einigen 100 DM ansetzen. Ein Lesegerät mit Antenne kostet - einschließlich Installation - einige 1.000 DM.

Elektromagnetischer Kennzeichenleser⁵⁷

Will man größere Abfragereichweiten für interaktive Kennzeichen erreichen, muß man mit elektromagnetischen Wellen arbeiten, also eine Funkverbindung aufbauen. Dabei werden Frequenzen von 0,5 bis 3 Gigahertz (selten auch 27 MHz) benutzt, teilweise auch eine zweite Frequenz von einigen 100 kHz für den Sender des Kennzeichens. Typische Antennengrößen sind 30 cm für die Abfrageeinheit und 10 cm für das Kennzeichen. Weil hier dem elektromagnetischen Feld nicht genug Energie entzogen werden kann, muß jedes Kennzeichen aus einer eigenen Batterie versorgt werden. Dabei sind Lebensdauern von fünf bis zehn Jahren möglich. Durch die Batterie und Sende- sowie Empfangselektronik ist ein solches Kennzeichen einige cm dick, Länge und Breite können z.B. 20 bzw. 10 cm betragen. Als Reichweite sind 5 bis 15 m typisch. Durch Modifikationen sind einige hundert Meter erreichbar; eine typische Anwendung wäre auf einem Flugplatz, wo jedes Flugzeug auf dem Flugfeld abgefragt werden könnte. Die Abfrageeinheit könnte fest installiert sein.⁵⁸

Als Kosten kann man 200 - 500 DM für ein fernabfragbares Kennzeichen und einige 1.000 DM für die Abfrageeinheit ansetzen.

Optischer Kennzeichen-/Balkenkodeleser⁵⁹

Während ein normales Fahrzeug-Kennzeichen (wie auch andere Aufschriften) mittels einer Fernsehkamera, ggf. mit Teleobjektiv, erfaßt werden kann, könnte man - ähnlich wie heute die Waren in vielen Supermärkten - Fahrzeuge mit leichter automatisch lesbaren Kennzeichen, z.B. Balkenkodes, versehen. Die Kennzeichen würden an einheitlicher Stelle aufgebracht und könnten mittels eines durch Spiegel umgelenkten schwachen Laserstrahls abgetastet werden. Im Unterschied zu einer Ladenkasse sind ein waagerechter Strahl und eine auf 1 - 2 m erhöhte Reichweite erforderlich. Ähnliche Reichweiten werden von in der Industrie schon eingesetzten Systemen erreicht, die z.B. Pakete auf Fließbändern identifizieren.

An Kosten sind für einen solchen optischen Kennzeichenleser sind einige 1.000 DM anzusetzen.

57 Hersteller/Vertrieb z.B.: DASA, Ottobrunn; Diehl, Röthenbach/Pegnitz; Disys, Cheltenham, Großbritannien; ISD (RF/ID) Ltd., Twickenham, Großbritannien; Pepperl+Fuchs, Mannheim; Redar, Griesheim.

58 Vom Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung wird gegenwärtig die Möglichkeit untersucht, die Abfrageeinheit von einem Inspektionsteam im Rahmen des KSE-Vertrags mitführen zu lassen. Damit könnten die Identifizierung und Zählung vorhandener Flugzeuge schneller gehen, und das Team müßte nicht an jedes Flugzeug herangehen. S. Fn. 33.

59 Hersteller/Lieferanten von Balkenkode-Lesern mit größerer Reichweite z.B.: Scanquest, San Diego CA, USA; Sick, Waldkirch; Visolux, Berlin.

Halboffenes Mikrowellen-Kabel⁶⁰

Schließt man ein Koaxialkabel (Durchmesser einige Millimeter bis ein Zentimeter), dessen Außenleiter nicht ganz geschlossen ist (also nicht als vollständige Abschirmung wirkt), an einen Mikrowellensender an, ergibt sich außerhalb des Kabels ein Mikrowellenfeld, das einige Meter weit reicht und in einem zweiten, benachbarten Kabel aufgefangen werden kann. Ändern sich im Raum zwischen den Kabeln die elektromagnetischen Eigenschaften, kann das am Empfangskabel festgestellt werden. So können Bewegungen von Personen oder auch Fahrzeugen erfaßt werden. In der Regel sind die Kabel in der Nähe eines Zauns vergraben und dienen der Alarmierung, sollte eine Person sich dem Zaun nähern. Durch Aufteilung in mehrere Kabelabschnitte und Pulsbetrieb läßt sich eine Lokalisierung erreichen. Eine Aufklärung über den Grund für den Alarm ist dann aber nur durch Nachsehen (ggf. mittels Fernsehkamera und Scheinwerfer, s. dort) möglich. Zur Fahrzeug-Detektion gibt es aber bessere Verfahren (z.B. Kontaktschwelle, Induktionsschleife, Geofon). Die Kosten für 1 km halboffenen Mikrowellen-Kabels einschließlich Sender und Signaldetektor dürften bis zu 100.000 DM betragen.

Infrarot-Sensor⁶¹

Unsichtbares Infrarot-Licht hat längere Wellenlängen als das sichtbare (0,8 bis 20 μm gegenüber 0,4 bis 0,8 μm); es wird von warmen Objekten gemäß ihrer Temperatur abgestrahlt. Auftreffende Infrarot-Strahlung wird aber auch reflektiert und gestreut, so daß man Objekte auch bei Infrarot-Beleuchtung durch Sonnenlicht oder Infrarot-Scheinwerfer erfassen kann. Mißt man die Strahlung bei mehr als einer Wellenlänge, läßt sich die Temperatur bestimmen. Mit einem vollständigen Spektrum läßt sich bei Gasen oft sogar die molekulare Zusammensetzung messen.

Infrarot-Sensoren gibt es in sehr vielen Ausführungen. Die empfindlichsten kommen, da sie sehr tief (unter $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$) gekühlt werden müssen, für Routine-Überwachung kaum in Frage. Aber auch mit Sensoren, die nicht oder nur auf etwa $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ elektrisch gekühlt werden, sind gute Leistungen erreichbar. Einfache Sensoren bestehen aus einem Stück des Infrarotempfindlichen Materials, dessen Gesichtsfeld durch eine Blende (z.B. ein Fenster) begrenzt wird. So wird ein Winkelbereich von typisch 45 bis 120° (in zwei Dimensionen) summarisch erfaßt, und alle Veränderungen der gesamten Infrarotstrahlung aus diesem Bereich lassen sich feststellen, sofern sie schneller als über einige Minuten erfolgen. So sind z.B. die Infrarot-Melder in Alarmanlagen aufgebaut, die um 100 DM kosten. Der Hauptnachteil ist, daß keine räumliche Differenzierung möglich ist. Will man mit hoher Richtungsauflösung messen, muß man zu einem bildgebenden Sensor, d.h. einer Kamera, übergehen (s. dort).

-
- 60 S. z.B.: D. Lindseth, R. W. Hansen, Leaky Cable Intrusion Detection Sensors, in: 1986 Carnahan Conference on Security Technology, Lexington KY: University of Kentucky, May 14-16, 1986; R. W. Hansen, Leaky Cable Intrusion Detection Systems, in: 27th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, New Orleans LA, June 22-25, 1986; R. K. Harman, C. M. Bell, Small Cable - The Latest in Leaky Cable Sensors, in: 1987 Carnahan Conference on Security Technology, Atlanta GA, July 15-17, 1987, und dort angegebene Quellen.
Hersteller/Lieferanten z.B.: Computing Devices, Ottawa, Ontario, Kanada; Senstar, Kanata, Ontario, Kanada; Stellar Systems, Santa Clara CA, USA.
- 61 S. z.B.: R. J. Keyes (ed.), Optical and Infrared Detectors, Berlin etc.: Springer, 1980; T. Ricolfi, J. Scholz (eds.), Thermal Sensors, Weinheim: Verlag Chemie, 1991; E. Wagner, R. Dandliker, K. Spennée (eds.), Optical Sensors, Weinheim: Verlag Chemie, 1992.
Hersteller/Vertrieb z.B.: Barnes, Stamford CT, USA; Hamamatsu, Herrsching; Judson Infrared, Montgomeryville PA, USA;
Fahrzeugauffassung z.B.: Weiss electronic, Trier;
Alarmsensoren z.B.: Alarmcom Leutron, Filderstadt; Hörotron, Elmshorn; Pieper, Schwerte.

Für bewegte Objekte mit nur leicht erhöhten Temperaturen (Personen, Fahrzeuge) sind Reichweiten von einigen Metern möglich, bei sehr heißen Objekten auch darüber.

Setzt man vor den Sensor eine Optik, läßt sich das Gesichtsfeld stark einengen (auf Öffnungswinkel von z.B. einigen Grad). Damit kann man z.B. Störobjekte (Bäume, Büsche o.ä.) ausblenden und größere Reichweiten erreichen. Ein Sensor mit Infraroptik kostet einige tausend DM, je nach Öffnungswinkel, Wellenlängenbereich und Empfindlichkeit.

(Infrarot-)Fotokamera⁶²

Eine Fotokamera erzeugt über eine Optik ein einmaliges Bild auf einem lichtempfindlichen Film, der anschließend entwickelt werden muß. Dabei kann man unterscheiden zwischen Schwarz-Weiß-Filmen, die das gesamte sichtbare Spektrum summarisch aufnehmen, und Farbfilmen, die gemäß dem menschlichen Sehsystem mittels drei Grundfarben alle Farben aufnehmen und darstellen können. Ähnlich ist es bei Infrarot-empfindlichem Film, wobei die farbige Variante dann die sichtbaren Farben verschiedenen Infrarot-Bereichen zuordnet (Falschfarbendarstellung). Durch Film ist nur das sehr nahe Infrarot zugänglich, etwa bis zu Wellenlängen von $0,9 \mu\text{m}$. Für das Sichtbare und das Infrarot können dieselben Kameragehäuse verwendet werden. Viele normale Objektive sind auch für das Infrarot geeignet, es gibt aber auch spezielle Infrarot-Objektive.

Das Gesichtsfeld ist durch die Bildgröße und die Objektiv-Brennweite definiert; üblich sind Öffnungswinkel zwischen 10 und 120° . Aus dem zweidimensionalen Bild sind die räumlichen Richtungen zu den abgebildeten Objekten rekonstruierbar, wenn die Ausrichtung der Kamera bekannt ist. Durch die perspektivische Verzerrung verkürzen sich die Abstände auf dem Bild mit dem Abstand von der Kamera, und Objekte werden nur in besonderen Fällen in einer "Normalansicht" (z.B. genau von der Seite) aufgenommen.

Als passiver Sensor braucht eine Fotokamera eine externe Beleuchtung. Wenn kein Tageslicht zur Verfügung steht, kann man entweder mit Scheinwerfern über längere Zeit leuchten oder mit Blitzlampen nur zum Zeitpunkt der Aufnahme. Für Infrarot-Kameras reicht aber oft die durch die nachzuweisenden Objekte (Fahrzeuge, Personen) ausgesandte Infrarot-Strahlung aufgrund der eigenen erhöhten Temperatur. Im Objektschutz werden jedoch häufig zusätzliche Infrarot-Scheinwerfer verwendet (die nicht so leicht zu bemerken sind).

Während ein normaler Kleinbildfilm etwa 40 Bilder enthält, sind auch Kameragehäuse mit 250 oder gar 800 Bildern Kapazität erhältlich. (Mit einer Filmkamera mit Einzelbildschaltung sind tausende von Bildern möglich.) Die mit Film erreichbare Auflösung ist unübertroffen, typisch sind 20-50 Linienpaare pro mm (bei Spezialfilmen über 100 Lp./mm). Wegen ihrer nicht-linearen Schwärzungskurve können Filme allerdings große Helligkeitskontraste und dabei kleine Helligkeitsunterschiede nicht zuverlässig wiedergeben.

Je nach Ausstattung kostet eine Fotokamera einige hundert bis einige tausend DM. (Spezielle Kameras, z.B. für Luftbilder, mit größeren Filmformaten, besonderer Aufhängung usw. können bis zu einigen hunderttausend DM kosten.)

Weil die Filme gewechselt und entwickelt werden müssen, sind Fotokameras für die automatische Verifikation nicht gut geeignet. Selbst dort, wo nur ab und zu ein Einzelbild erfaßt werden soll, wird man lieber die mit elektronischer Übertragung arbeitenden Fernsehkameras einsetzen.

62 S. z.B.: J. Stüper, Die photographische Kamera, Berlin etc.: Springer, 1962.

(Infrarot-)Fernsehkamera⁶³

In einer Fernsehkamera wird durch eine Optik ein Bild auf einer lichtempfindlichen Fläche erzeugt, die elektronisch ausgelesen werden kann. Waren es früher vor allem Bildaufnahmeröhren, wo die lichtempfindliche Fläche durch einen im Vakuum zeilenweise bewegten Elektronenstrahl abgetastet wurde, werden nunmehr hauptsächlich Halbleiter-Chips eingesetzt, die hunderttausende von lichtempfindlichen Einzelementen enthalten; die jeweilige Ladung wird zeilenweise weitergereicht und ausgelesen (CCD, charge-coupled device). Im nahen Infrarot (bis ca. 1 μm Wellenlänge) sind viele CCD-Chips ebenfalls empfindlich, so daß man - mit geeignetem Objektiv und Wetterschutzfenster, ohne Infrarot-Sperrfilter - viele handelsübliche CCD-Kameras auch in diesem Bereich einsetzen kann. Für das mittlere Infrarot müssen allerdings sehr teure (bis einige 100.000 DM), meist gekühlte Detektorfelder verwendet werden, die noch im Laborstadium sind bzw. einzeln gefertigt werden und den Routineeinsatz zur Verifikation praktisch ausschließen.⁶⁴

Bezüglich des Gesichtsfelds, der Gewinnung der Objekt-Richtungen bei bekannter Kamera-Ausrichtung sowie der perspektischen Verzerrung gilt dasselbe wie für Fotokameras. Die größten Vorteile gegenüber letzteren sind: Die erzeugte Ladung ist über viele Größenordnungen proportional zur aufgefallenen Lichtmenge, so daß kleine Helligkeitsunterschiede auch bei großen Kontrasten im Bild noch erfaßt werden, und das Bild wird voll elektronisch gewonnen und kann somit sofort elektrisch übertragen und gespeichert werden. Die Auflösung ist - mit typisch 100 Bildelementen pro Millimeter, also etwa 40 Linienpaaren pro mm - vergleichbar zu (normalem) Film, allerdings ist die empfindliche Fläche meist deutlich kleiner als bei Fotokameras (z.B. 1 cm^2 gegenüber 9 cm^2), so daß für dasselbe Sichtfeld entsprechend weniger Bildelemente zur Verfügung stehen. Will man denselben Grad an Detail erfassen, muß man näher an das Objekt herangehen und für dasselbe Sichtfeld ggf. mehrere Kameras einsetzen. Fernsehkameras können z.B. Fahrzeuge sehr genau erfassen, einschließlich von Aufschriften, Kfz.-Nummernschildern oder speziellen Kennzeichen.

Wegen der elektrischen Signalform kann das Bild einer Fernsehkamera - nach Digitalisierung der analogen Helligkeitssignale - gleich im Computer verarbeitet werden, damit die relevanten Informationen gewonnen werden. Dafür stehen viele Verfahren zur Verfügung, die z.B. die Helligkeits- oder Farbwerte manipulieren, Nachbarbeziehungen zwischen Bildelementen auswerten oder zeitliche Folgen analysieren. Auf höherer Ebene können dann z.B. Kanten detektiert, Bewegungen festgestellt, zusammengehörige Objekte erfaßt, Formen perspektivisch entzerrt, Objekte mit bekannten Mustern verglichen werden usw.⁶⁵

Einfache Fernsehkameras kosten etwa tausend DM. Soll die Kamera wetterfest sein, elektrisch geschwenkt sowie in der Brennweite verändert werden können, kann der Preis bis zu

-
- 63 S. z.B.: J. Webers, Handbuch der Film- und Videotechnik, München: Franzis, 1983.
Hersteller/Vertrieb: praktisch alle großen Optik- und Elektronik-Firmen. Für spezielle Aufgaben:
Objektschutz z.B.: Burle, Waesweiler; DASA/TST, Wedel; elbex, Regensburg; Geutebrueck, Windhagen; Grundig, Fürth; jaivision, Glostrup, Dänemark; Panasonic, Hamburg; Philips, Hamburg; Pieper, Schwerte; Sanyo, Ahrensburg; Siemens, München.
Fahrzeugdetektion z.B.: Weiss electronic, Trier;
Infrarot-Kameras für Zaunüberwachung z.B.: DASA/MBB, Ottobrunn; Dornier, Friedrichshafen.
- 64 S. z.B. die entsprechenden Artikel in: Special Issue on Solid-State Image Sensors, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. ED-38, no. 5, May 1991.
- 65 Die digitale Bildverarbeitung und Bild-Mustererkennung sind sehr weite Gebiete, auf denen aktiv geforscht wird. Für eine Übersicht s. z.B.: A. K. Jain, Fundamentals of Digital Image Processing, Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall, 1989; B. Radig, Verarbeiten und Verstehen von Bildern, München/Wien: Oldenbourg, 1993.

10.000 DM steigen. Auch bei Fernsehkameras mit Empfindlichkeit im nahen Infrarot sind etwa 5.000 DM anzusetzen.

Lichtschränke⁶⁶

Eine Anordnung aus Lichtquelle und -empfänger kann feststellen, ob die Linie zwischen beiden frei oder durch ein Objekt versperrt ist. Dabei sind Abstände von Millimetern bis zu etwa 100 Meter möglich. Die oft gewählte einfachere Anordnung von Lichtquelle und -empfänger im selben Gehäuse mit einem Retroreflektor ("Katzenauge") auf der gegenüberliegenden Seite (Zwei-Weg-Lichtschränke) kann im Zusammenhang der Verifikation nicht benutzt werden, da ein zusätzlicher Reflektor, den man kurz vor die Quelle-Empfänger-Anordnung halten würde, Dauerlicht erzeugen würde und somit dahinter befindliche Objekte unerkannt passieren könnten. Damit die Lichterfassung von Tages- und Kunstlicht unabhängig wird, wird der Strahl in der Regel zeitlich moduliert und nur das modulierte Licht nachgewiesen. Oft wird auch unsichtbares Infrarot-Licht verwendet.⁶⁷ Die Zeitauflösung beträgt typischerweise eine bis viele Millisekunden.

Im hier diskutierten Zusammenhang bieten sich Lichtschranken an, um festzustellen, ob sich auf Fahrbahnen, etwa an einem Tor, Fahrzeuge befinden. Auch eine Flugzeug-Startbahn kann so auf rollende Flugzeuge (oder andere Fahrzeuge) überwacht werden - bei starkem Regen oder Nebel kann eine solche Lichtschränke mit 80 oder 100 m Abstand aber ausfallen. Eine Anordnung aus zwei oder mehr Lichtschranken längs der Bahn kann Geschwindigkeiten messen und daraus dann auch Längen (des unterbrechenden Objektteils, zwischen zwei unterbrechenden Teilen) bestimmen. Mittels einer zusätzlichen vertikalen Anordnung aus mehreren horizontalen Lichtschranken kann man das grobe Höhen-Profil eines Objekts in Längsrichtung bestimmen, also eine grobe Seitenansicht (z.B. mit 30-cm-Raster) gewinnen. Zusätzlich erlaubt die Redundanz eine Reihe von Konsistenzprüfungen.

Im Vergleich mit einer Fernsehkamera liefert eine Lichtschrankenordnung erheblich weniger Daten, erfährt aber die Objektform - mit parallelen Strahlen - ohne perspektivische Verzerrung und Verkleinerung.

Eine Einweg-Lichtschränke kostet 100 bis 500 DM, eine typische Tor-Installation aus z.B. 40 längs und 2*10 übereinander angeordneten Lichtschranken mit Montagematerial und Auswertungseinheit kommt auf etwa 50.000 DM.

Radar⁶⁸

Trifft ein Puls elektromagnetischer Strahlung auf ein Objekt, wird ein Teil davon in alle Richtungen gestreut. Empfängt man den zurückgestreuten Anteil, kann man aus der Zeit seit dem Aussenden - über die Lichtgeschwindigkeit - die Entfernung des Objekts berechnen. Wurde der Puls in einem engen gerichteten Strahl ausgesandt, läßt sich somit aus Richtung und Abstand die Objektposition in drei Dimensionen bestimmen.

66 Hersteller/Vertrieb z.B.: Leuze, Owen/Teck; Pauly, Düsseldorf; Sick, Waldkirch; wenglor, Tettang.

67 Im Objektschutz werden Lichtschranken gelegentlich auch zur Zaunkontrolle verwendet; Hersteller z.B.: Alarmcom, Filderstadt.

68 Z.B.: M. I. Skolnik (ed.), Radar Handbook, New York etc.: McGraw-Hill, 1970; M. I. Skolnik, Introduction to Radar Systems, New York etc.: McGraw-Hill, 1980; E. Baur, Einführung in die Radartechnik, Stuttgart: Teubner, 1985.

Hersteller/Vertrieb z.B. (allgemeines Radar): Alcatel/SEL, Mannheim; DASA/TST, Ulm; Siemens, München.

Verkehrsüberwachungsradar z.B.: DASA, Wedel; feig electronic, Weilburg; Multanova, Düsseldorf; Traffipax, Düsseldorf; Weiss electronic, Trier.

Ist das Objekt in Bewegung, wird die Strahlung - gemäß der Geschwindigkeitskomponente in Richtung zum/vom Radar - durch den Doppler-Effekt in der Frequenz verschoben. Mißt man die Verschiebung, läßt sich diese Radialgeschwindigkeit ermitteln. Bei Doppler-Radars wird der Strahl oft nicht gepulst, sondern ständig ausgestrahlt. Den Abstand zum Objekt kann man dennoch messen, indem man die Strahlfrequenz mit der Zeit ändert und die Frequenz (bzw. Phase) des Reflexes bestimmt. Die Doppler-Verschiebung wird auch dazu benutzt, kleine bewegte Objekte vor einem großen, aber festen Hintergrund zu erkennen.

Radarsysteme gibt es in vielen verschiedenen Ausführungen. Hochhausgroße Anordnungen werden zur Weltraum-Ortung verwendet. Bei der Überwachung des Luftraums (über 100 bis 400 km, mit ca. 10 m breiten Antennen, die um eine senkrechte Achse rotieren) wird ein senkrecht fächerförmiger Strahl ausgesandt, ein Flugzeug zunächst also nur in zwei Dimensionen (Azimutwinkel und Abstand) geortet. Die Radar-Höhenmessung geschieht nur auf kürzere Distanzen (ca. 10 km) mittels eines im Höhenwinkel veränderlichen Strahls. (Auf größere Distanzen wird die Höhe vom Flugzeug aktiv übermittelt: ein Transponder im Flugzeug antwortet, wenn es vom Strahl des sog. Sekundär-Radars getroffen wird, mit einer Identifikations-Nummer und der momentanen Flughöhe.) Eine Station zur großräumigen Luftüberwachung, bestehend aus Primär- und Sekundärradar, kostet ca. 10 Millionen DM; ein Flugfeld-Überwachungssystem (mehrere Radars von 3 km Reichweite) kostet etwa 1 Mio. DM.

Radars mit gerichtetem Strahl können auch Flugkörper, ja sogar Artillerie-Granaten erfassen und so zur Überwachung von Testgeländen dienen.⁶⁹ Soll der Strahl schnell geschwenkt werden, kann man anstelle einer mechanisch bewegten Antenne eine feste Anordnung aus vielen kleinen Einzelantennen verwenden. Werden deren Impulse mit genau definierter zeitlicher Verzögerung ausgesandt und empfangen, ergibt sich eine Schwenkung des Summenstrahls (phasengesteuertes Radar). Ein solches Radar kann mehrere 10 Millionen DM kosten. Derartige Radars werden durch Personen bedient und sind für die automatische Verifikation viel zu aufwendig.

Im Straßenverkehr wird Radar üblicherweise zur Geschwindigkeitskontrolle eingesetzt: über Abstände von bis zu einigen hundert Meter wird mittels des Doppler-Effekts die Geschwindigkeit gemessen. Ein solches hochgenaues Radar mit Kalibrierung und PTB-Zulassung kostet ca. 60.000 DM.

Mit einem kurzreichweitigen Radar kann man aber auch die Anwesenheit von Straßenfahrzeugen feststellen; so kann man z.B. von oben die unter einer Brücke durchfahrenden Fahrzeuge erfassen, ihre Geschwindigkeit bestimmen, klassifizieren und zählen. Als Preis ist hier 8.000 - 15.000 DM anzusetzen.

69 Die Bundeswehr hatte z.B. für die Artillerie-Ortung das englische Radar (mit mechanisch geschwenkter Antenne) Green Archer erprobt, aber nicht eingeführt; das System COBRA mit elektrisch geschwenktem Strahl ist in Entwicklung, s. z.B.: E. Heckmann, Radar - die Allwetteraugen der Bundeswehr, Wehrtechnik, 12. Jg., Nr. 3, S. 66-72, März 1980; W. Müller, Das Artillerie-Führungs-, Informations- und Feuerleitsystem (ArtFüInFELSys), Wehrtechnik, 19. Jg., Nr. 4, S. 34-43, April 1987; L. Müller, COBRA (Counter Battery Radar), ein trilaterales Entwicklungsvorhaben für ein Artillerie-Ortungsradar, in: Jahrbuch der Wehrtechnik, Folge 20, Koblenz: Bernard & Graefe, 1991; H.-J. Fröhlich, Artillerie heute und morgen - Das System "Artillerie" in seiner Weiterentwicklung, Wehrtechnik, 25. Jg., Nr. 7, S. 17-20, Juli 1993. Davon zu unterscheiden ist ein Gefechtsfeldradar, daß von erhöhter Stelle die Explosionen von Granaten erfassen kann, wie etwa das System mit mechanisch bewegter Antenne RATAAC, s.: G. Herzog, Ein modernes Gefechtsfeldradar der neuen Generation RATAAC-S, Mikrowellen & HF Magazin, Vol. 14, no. 8, S. 727-731, 1988. Alle solchen Systeme sind mobil, für den Einsatz im Krieg ausgelegt und brauchen Bedienungspersonal. Daher ist es nicht sinnvoll, sie für kontinuierliche automatische Verifikation einzusetzen.

Prinzipiell ist es auch möglich, kleinere bewegte Objekte (wie Personen) zu orten, solche Anwendungen gibt es im Objektschutz.

Laser-Radar⁷⁰

Ähnlich wie beim normalen Radar kann man auch Pulse gerichteten Lichts (d.h. elektromagnetische Wellen im Bereich von 0,1 bis 20 Mikrometer Wellenlänge) aussenden und die an entfernten Objekten erzeugte Rückstreuung messen. Die notwendige Bündelung und Pulsung sind durch Laser erreichbar. Aus Laufzeit und Strahlrichtung kann man wie beim Radar den dreidimensionalen Ort des Objekts bestimmen. Je nach verwendetem Sende- und Empfangsgerät sind prinzipiell (z.B. im Weltraum) Reichweiten von tausenden von Kilometern möglich. In der Atmosphäre begrenzen die Erdkrümmung und vor allem Streuung und Absorption die Reichweite etwa auf die jeweilige Sichtweite (bei Nebel, Regen, Wolken also bis hinunter zu wenigen Metern). Für die Verkehrserfassung über kurze Distanzen werden erste Systeme gerade entwickelt. Für die Ortung von Objekten über mittlere und große Entfernungen ist das wetterunabhängige Radar besser geeignet; nur in Spezialfällen wird man dem Laser-Radar wegen der bei Lichtwellenlängen besseren Auflösung den Vorzug geben.

Eine spezielle Anwendung ergibt sich aber daraus, daß das Laserlicht schon in der normalen Atmosphäre rückgestreut wird. Daraus kann man atmosphärische Eigenschaften (etwa Temperatur, Dichte, Windgeschwindigkeit, aber auch Gehalt an bestimmten Stoffen) ortsaufgelöst fern-messen.⁷¹ Prinzipiell könnten so auch bestimmte Chemikalien in den Abgasen von Fabrikschornsteinen festgestellt werden.⁷²

Kleine Laser-Radars für die Verkehrserfassung können einige 1.000 DM kosten. (Für große Systeme zu Forschungs- und anderen Zwecken kann der Preis hunderttausende oder Millionen DM betragen.)

Röntgengerät⁷³

Elektromagnetische Strahlung genügend hoher Frequenz kann Stoffe durchdringen, wobei die unterschiedlichen Absorptionseigenschaften erlauben, Materialien im Inneren von Objekten nachzuweisen. In der klassischen, v.a. noch in der Medizin verbreiteten, Art wird ein Film geschwärzt; das zweidimensionale Filmnegativ zeigt eine Projektion der dreidimensionalen Realität. Mit Computer-Erfassung der durchgetretenen Strahlung kann einerseits aus mehreren Projektionen die dreidimensionale Struktur rekonstruiert werden, andererseits ist eine erheblich stärkere Differenzierung der Absorption möglich; auch die nachträgliche Bildverarbeitung (Kontrastverschärfung, Ausschnitte, Falschfarbendarstellung usw.) erlaubt, erheblich mehr Informationen zu gewinnen.

70 Z.B.: R. M. Measures, Laser Remote Sensing - Fundamentals and Applications, New York etc.: Wiley, 1984.

Ein Hersteller von Laser-Radar zur Verkehrsüberwachung ist DASA, Ottobrunn.

71 Für eine Übersicht siehe etwa: Measures (Fn. 70).

Eine spezielle Verifikationsanwendung ist die Messung der Strahlparameter von (militärischen) Lasern hoher Leistung aus gewissem Abstand. Dazu muß man die aktuellen Streueigenschaften der Atmosphäre durch einen eigenen kleinen Laser messen. S.: T. H. Braid et al., Laser Brightness Verification, Science and Global Security, vol. 2, no. 1, pp. 59-78, 1990.

72 Measures (Fn. 70), ch. 9.

73 S. z.B.: K. Vanselow, D. Poppe, Grundlagen der quantitativen Röntgen-Bildauswertung, Berlin usw.: Springer, 1984.

Hersteller von großen Anlagen zur Fahrzeugdurchstrahlung z.B.: Bechtel, San Francisco CA, USA; British Aerospace (Dynamics), Bristol, Großbritannien; Heimann, Wiesbaden.

Zum Durchstrahlen von z.B. Koffern und Kartons reichen tischgroße Geräte mit Teilchenenergien von 0,1 Megaelektronenvolt und Leistungen (des die Röntgenstrahlung erzeugenden Elektronenstrahls) von einigen zehn Watt, wie man sie von Flughäfen kennt - sie kosten 100.000 - 200.000 DM. Sollen dagegen ganze Fahrzeuge durchleuchtet werden, sind wegen der Metallwandungen und größeren Dimensionen höhere Teilchenenergien (einige Megaelektronenvolt) und hundertfach höhere Strahlleistungen nötig. Dafür braucht man dann auch besondere Abschirmwände usw. Für die Röntgenanlage Cargoscan der Fa. Bechtel, die die USA aufgrund des Mittelstrecken-Vertrags am Tor der Raketenfabrik Votkinsk (Rußland) stationiert haben, sind Kosten um 10 Millionen US-Dollar genannt worden.⁷⁴ Auch der Preis für eine vergleichbare Anlage der deutschen Firma Heimann liegt ähnlich; sollen nur die groben Umrisse der Ladung auf kleinen Lkw erfaßt werden, kann die Anlage erheblich einfacher ausfallen.⁷⁵

Für die Verifikation von Konversionsverpflichtungen wird man Durchstrahlungsanlagen nur in Ausnahmefällen in Erwägung ziehen. Im hier betrachteten Zusammenhang, wo nur große Fahrzeuge zu erfassen sind, sind sie nicht nötig. Sobald es jedoch um den Nachweis kleinerer Objekte geht (z.B. Maschinengewehre, Komponenten größerer Waffen), die in Kisten oder Containern verpackt sein können, sind Durchstrahlungssysteme eine sehr gute Möglichkeit für die Routinekontrolle.

74 Die Kostenangaben sind etwas inkonsistent. Der Sandia-Vizepräsident R. Hagengruber sprach von 10 Mio. \$ für die Installation der gesamten Tor-Kontrollen in Votkinsk: T. M. Foley, Los Alamos, Sandia Labs Fueling Growth in Verification Technology, Aviation Week & Space Technology, pp. 47-49, 16 May 1988; die Lieferfirma meldete eine Vertragssumme von 8 Mio. \$ für die Lieferung der Durchstrahlungsanlage an Sandia: News from Bechtel, San Francisco, 5 April 1989; die Rechnungsprüfungsbehörde des US-Kongresses schrieb, die Anlage habe einschließlich Forschung und Entwicklung 40 Mio. \$ gekostet: U.S. Costs of Verification and Compliance Under Pending Arms Treaties, Washington DC: Congressional Budget Office, p. 19, Sept. 1990. Die Anlage soll sicherstellen, daß keine verbotenen SS-20-Mittelstreckenraketen in den Kanistern der größeren, erlaubten SS-25-Interkontinentalraketen aus der Fabrik gebracht werden.

75 System Hi-CO-SCAN für genaue Auflösung von Container-Inhalten mit 5-10 Megaelektronenvolt (MeV); Silhouette-System für die grobe Umrißfassung der Ladung leichter Lkw mit 0,14 MeV, Fa. Heimann, Wiesbaden.

4. Weitere Systemkomponenten

Zur automatischen Verifikation von Konversionsvereinbarungen braucht man mehr als nur die Sensoren. Kap. 4 behandelt die zusätzlich erforderlichen Systemkomponenten. In 4.1 geht es um Scheinwerfer für Kameras. 4.2 diskutiert die Energieversorgung. Dann folgen Informationsgesichtspunkte: Datenspeicherung (4.3), Datenverarbeitung (4.4) und Kommunikation (4.5). Schutz und Sicherheit werden in 4.6 betrachtet, und 4.7 erwähnt einige andere Systemaspekte.

4.1 Scheinwerfer

Aktive und interaktive Sensoren senden eine Energieform aus, um die durch das Nachweisobjekt veränderte Reaktion der Umgebung zu erfassen. In den Fällen, wo das aussendende Element identisch mit dem empfangenden ist oder wo der Sensor nur aktiv betrieben werden kann, sind die Erzeugung und Abstrahlung der Sende-Energie integraler Bestandteil des Sensor(system)s, und getrennte Komponenten dafür müssen nicht betrachtet werden. Das gilt in der Regel für folgende Sensorarten: aktives Sonar, Ultraschall-Sensor, Induktionsschleife, induktiver, elektromagnetischer oder optischer Kennzeichen-Leser, halboffenes Mikrowellen-Kabel, Lichtschranke, Radar, Laser-Radar, Röntgengerät. Anders ist es bei optischen bilderzeugenden Systemen, wie (Infrarot-)Fotokameras und (Infrarot-)Fernsehkameras. Beide können bei Tag und nicht zu schlechter Sicht passiv benutzt werden. In der Dunkelheit und bei leichtem Dunst sind jedoch Scheinwerfer für sichtbares oder Infrarot-Licht nötig, um die aktive Beleuchtung der Umgebung einschließlich der nachzuweisenden Objekte zu erzeugen. Dabei kann man entweder die zu überwachende Region mit vielen an verschiedenen Stellen montierten Scheinwerfern großflächig ausleuchten - etwa an Toren - oder jede Kamera mit einem in dieselbe Richtung leuchtenden Scheinwerfer versehen - in der Regel an Zäunen und anderen Kontroll-Linien (bei schwenkbarer Kamera wird dann der Scheinwerfer mitgeschwenkt). Die Scheinwerfer sind 0,1 bis 0,3 m groß, typische elektrische Leistungen sind einige hundert Watt (im Sichtbaren) bzw. einige zehn Watt (im Infrarot), bei vergleichbarer Lichtleistung. Damit sind Reichweiten bis zu 50 m möglich. Die Kosten liegen bei einigen hundert DM für normale und 2.000 DM für Infrarot-Scheinwerfer.⁷⁶

Blitzgeräte für Fotokameras reichen bis zu einigen zehn Metern weit und kosten einige hundert DM.

4.2 Energieversorgung

Sensorsysteme brauchen Energie, in der Regel elektrische. Dieser Bedarf ergibt sich bei aktiven und interaktiven Sensoren schon deshalb, weil Energie ausgesandt werden muß. Aber auch manche passiven Sensoren benötigen Energie: Ein Kondensator-Mikrofon muß auf eine bestimmte elektrische Spannung geladen werden,⁷⁷ ein Strom muß durch ein magnetoresistives Sensor-Element fließen, die Helligkeits-Information in den einzelnen Zellen eines Kamera-CCD-Bausteins muß elektrisch ausgelesen werden. Fast immer muß zusätzliche Elektronik betrieben werden, um schwache Signale zu verstärken, das Nutz-

⁷⁶ Im Infrarot kann man mit Anordnungen aus Leuchtdioden arbeiten, die nur in einem engen Wellenlängenbereich ($0,9 \mu\text{m}$) emittieren und einen erheblich höheren Wirkungsgrad haben als z.B. Glühdrähte. Hersteller solcher Scheinwerfer für Zaun-Überwachung sind z.B.: DASA/MBB, Ottobrunn; Dornier, Friedrichshafen. Hersteller/Lieferant von Infrarot-Scheinwerfern mit Halogen-Lampen und einigen 100 W Leistungsaufnahme z.B.: Pieper, Schwerte.

Signal abzutrennen, Überschreitung einer Schwelle festzustellen usw. Schließlich sind auch die unten behandelten Komponenten zur Datenspeicherung, -verarbeitung und -übertragung mit Energie zu versorgen.

Die notwendige elektrische Leistung hängt von der Sensorart und der Größe des zu erfassenden Bereichs sowie der Auslegung der Verarbeitungselektronik und der Kommunikationsverbindung ab. Mit passiven Sensoren wie Geofonen oder Mikrofonen sowie energiesparender Elektronik kann die für die Verarbeitung nötige Leistung auf wenige Watt oder gar unter 1 Watt begrenzt werden. Aktive Nahsensoren wie Induktionsschleifen oder halboffene Mikrowellen-Kabel brauchen Leistungen um 10 Watt. Ähnliche Werte gelten für induktive, optische oder elektromagnetische Kennzeichen-Leser. Fernseh-(Video)kameras selbst können mit wenigen Watt betrieben werden, die zugehörigen Scheinwerfer brauchen aber bis zu einigen hundert Watt. Radars mit kurzer Reichweite benötigen einige 100 Watt bis einige Kilowatt, während eine Station zur großflächigen Luftraum-Überwachung mit einigen zehn Kilowatt zu Buche schlagen kann.

Typische Leistungen von Rechnern zur Datenverarbeitung, -speicherung und -übertragung sind einige zehn bis evtl. 500 Watt. In spezieller Ausführung (CMOS-Elemente, nur Halbleiterspeicher, keine Festplatte) sind einige Watt oder gar unter 1 Watt erreichbar.⁷⁸ Die Übertragung selbst kann lokal um 1 Watt erfordern (Modem). Im Falle einer festen eigenen Leitung ist für je etwa 30 km eine Verstärkereinheit mit einigen zehn Watt nötig.⁷⁹ Eine Richtfunkstrecke über 10 - 70 km braucht 50 bis einige hundert Watt auf jeder Seite.⁸⁰ Für eine Satellitenverbindung mit 1-m-Antenne und 64 Kilobit/s bis 2 Megabit/s Datenrate sind einige bis einige zehn Watt nötig.⁸¹

Vor Ort stationierte Sensorsysteme zur Verifikation von vertraglichen Konversionsvereinbarungen müssen mit extrem hoher Zuverlässigkeit arbeiten; Ausfälle müssen so weit wie irgend möglich vermieden werden. Zur Energieversorgung wird man daher mehrere Schichten vorsehen: in der Regel wird der normale Betrieb über das örtliche Stromnetz erfolgen. Allerdings kann dort, wo nur geringe Leistung nötig ist und/oder Stromanschluß nur zu hohen Kosten herzustellen wäre, von vornherein auf eine autarke Versorgung, z.B. aus Solarzellen mit Akkumulatoren, gesetzt werden. Bei Ausfall der Primärquelle muß dann auf eine schnell verfügbare zweite Quelle umgeschaltet werden. Solche - in der Regel mit Akkumulatoren bestückten - sog. unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) liefern dann z.B. für 10 Minuten einige hundert bis einige tausend Watt (die Anschaffungskosten liegen zwischen 1.000 und 3.000 DM). Für den Fall längerer Primär-Unterbrechungen kann man entweder die Akkumulator-Kapazität der USV vergrößern oder einen mit einem

77 Bei den sog. Elektret-Mikrofonen ist die notwendige Ladung schon in der Kondensator-Membran aus Kunststoff vorhanden.

78 So wird für einen für die Erfassung und Übertragung von Wetterdaten ausgelegten Rechner (CPU 80C188, 24 MHz, statischer und Flash-Speicher, A-D-Wandler, Modem, Betriebstemperatur -50 bis +70 °C) ein typischer Leistungsverbrauch von 0,5 Watt angegeben (MILOS 500, Vaisala, Hamburg). Ein Gerät zur Analog-Digital-Wandlung und Zwischenspeicherung von 34 Kamerabildern (schwarz-weiß, Auflösung kleiner als Fernsehen) mit 4,2 Megabyte statischem CMOS-Speicher für die IAEO-Überwachung wurde 1989 mit 6 Watt Verbrauch angegeben: B. Richter u.a., Improvements for Optical Surveillance Systems in International Safeguards: Video Storage and Authentication, pp. 902-907, Proc. 29th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, 27-29 June 1988. Mit heutigen Bausteinen ist vier- bis 16-fache Kapazität bei verringertem Leistungsbedarf möglich.

79 S. auch: U. Gierz u.a., Geschichtliche Entwicklung der Fernsprech-Übertragungstechnik über Kabel und Richtfunk, Der Fernmelde-Ingenieur, 44. Jg., Heft 11/12, S. 3-75, Nov./Dez. 1990.

80 Hersteller/Vertrieb z.B.: ANT/Bosch, Backnang; SEL/Alcatel, Pforzheim; Siemens, München.

81 Hersteller/Vertrieb z.B.: ANT/Bosch, Backnang; SEL/Alcatel, Pforzheim; Siemens, München.

Verbrennungsmotor betriebenen Generator beschaffen, der dann mit einem entsprechenden Brennstoffvorrat einige Stunden bis mehrere Tage arbeiten kann (Kaufpreis 1.000 - 5.000 DM). Die Notstromquellen sollten für den maximalen Zeitraum bis zum Eintreffen von Inspektions- und Reparaturpersonal ausgelegt werden (z.B. 3 bis 7 Tage). Selbstverständlich müssen die Ausfälle der Primärquelle und die Einsätze der Hilfsquellen - sowie die Probleme damit - protokolliert und sofort an die Zentrale übermittelt werden. Da bei mechanisch bewegten Geräten die Ausfallgefahr i.A. größer ist (und auch mehr Wartungsaufwand anfällt), sollte versucht werden, so weit wie möglich auf Generatoren zu verzichten. Das sollte immer dann möglich sein, wenn man den Leistungsbedarf auf 10 - 50 Watt beschränken kann.

4.3 Datenspeicher, Datenkompression

Um den Übertragungsbedarf und den zentral notwendigen Rechnerbedarf gering zu halten, wird man vorsehen, die lokal anfallenden Daten weitgehend auch lokal zu verarbeiten - d.h. z.B. Signale verschiedener Sensoren auf Konsistenz zu prüfen, Objekte zu klassifizieren und zu lokalisieren (s. 4.4). Im Normalfall werden dann nur summarische Ergebnisse an die höheren Zentren gemeldet (etwa der Art: "in den letzten 6 Stunden verließen 4 Traktoren vom Typ X und 2 Tieflader des Typs Y die Fabrik, 3 Lkw des Typs Z fuhren hinein sowie 4 hinaus; keine Kettenfahrzeuge, keine anderen militärischen schweren Fahrzeuge passierten das Tor; die Umfriedung wurde nicht durchfahren"). Für Rückfragen und zur Klärung von Problemen werden diese Daten - eher noch genauer, d.h. als einzelne klassifizierte Ereignisse mit den Uhrzeiten - auch lokal gespeichert werden (wobei zu entscheiden ist, ob elektronische/magnetische Speicherung reicht oder zusätzlich ein gedrucktes Papier-Protokoll erstellt werden soll). Hierbei handelt es sich um sehr geringe Datenmengen, die ohne Probleme in Halbleiterspeicher festgehalten werden können (der batteriegepuffert, nur zum einmaligen Schreiben und herausnehmbar ausgelegt werden kann). Nimmt man z.B. an, eine Durchfahrt würde mit 100 Bytes vermerkt (5 - 10 Bytes für Datum und Uhrzeit, der Rest für Fahrzeug-Art, Fahrtrichtung, zusätzliche Anmerkungen und Kontroll-Informationen), wäre z.B. eine scheckkartengroße Speicherkarte mit 20 Megabyte Kapazität bei durchschnittlich 100 täglichen Bewegungen erst nach sechs Jahren gefüllt.

Problematisch sind dagegen solche Ereignisse, die sich nicht sofort in die bekannten Kategorien einordnen lassen oder die als Verletzung erkannt werden. In einem solchen Fall würde man anstreben, alle zugehörigen Sensorsignale zwischenspeichern und sie - nach einer Alarmmeldung - auf Abruf der Zentrale zur längerfristigen Speicherung und zur Analyse zu übermitteln. Die folgenden Abschätzungen sollen einen Eindruck von den dabei potentiell anfallenden Datenmengen geben:⁸² Ein Lichtschrankenfeld liefert um 100 Byte/s, eine Induktionsschleife um 1 Kilobyte/s, eine Geofon-Mikrofon-Anordnung einige zehn bis einige hundert Kilobyte/s und eine Schwarzweiß-Fernsehkamera ca. 10 Megabyte/s. Man sieht, daß die zweidimensionalen Bilddaten die höchste Rate haben, daß aber auch Geofon- und Mikrofondaten mit beträchtlicher Rate anfallen. Würde man die Rohdaten abspeichern wollen, würde selbst eine große Festplatte von 500 Megabyte die Bilder von zwei Fernseh-

82 Dabei nehme ich an, daß ein Signalwert eines eindimensionalen Analogensors mit zwei Byte, die Helligkeitsinformation einer Schwarzweiß-Fernsehkamera mit einem Byte kodiert werden. Als Abstraten werden benutzt: 300 Hertz für Lichtschranken und Induktionsschleifen, einige Kilohertz für Geofone und Mikrofone. Die Kamera-Bildwechselfrequenz ist zu 25 Hertz angenommen; mit einer Auflösung von 700 * 500 Bildelementen wird die Abstrategie 9 Megahertz; bei Farbkameras ist das doppelte anzusetzen. S. auch: H. Amor u.a., Ein Lösungsweg zur Übertragung von Bewegtbildern im Schmalband-ISDN, Frequenz, 43. Jg., Nr. 3, S. 70-78, 1989.

kameras nur 25 Sekunden lang speichern können. Die Übertragung dieser Sequenzen zur Zentrale würde - über eine 64-Kilobit/s-Verbindung, entsprechend einem digitalen Telefonkanal - etwa 22 Stunden dauern. Hier zeigt sich also die Notwendigkeit, Daten vor dem Speichern und Übertragen zu komprimieren. Bei den Kamerabildern wird z.B. der größte Teil durch den unveränderlichen Hintergrund gebildet, den man nicht immer neu übertragen muß, für bewegte Objekte muß nur die Bewegung übermittelt werden. Bei Bilddaten sollte - reversibel - Kompression um einen Faktor 3 - 10 möglich sein. Läßt man Informationen weg, die das menschliche Sehsystem in der Bildsequenz nicht aufnehmen kann, sind Faktoren von 40 - 100 denkbar. Das schränkt allerdings die Möglichkeiten zur rechnerunterstützten Bildanalyse ein, was die Untersuchung unklarer Ereignisse erschweren kann. Auch bei eindimensionalen Signalen kann man mit einer verlustlosen Kompression um einen Faktor 3 - 10 rechnen.⁸³

Selbst unter Einschluß von Datenkompression stellt die Speicherung von Originalwerten ein beträchtliches Problem dar - um z.B. drei Minuten zu speichern, wäre bei zwei Kameras und einigen weiteren Sensoren, d.h. komprimierter Gesamtdatenrate von etwa 2 Megabyte/s, ca. 400 Megabyte Speicherplatz erforderlich. Die Übertragung zur Zentrale würde bei 64 Kilobit/s ca. 17 Stunden dauern, bei 2 Megabit/s etwa eine halbe Stunde. Hier stellen sich folgende Auslegungsfragen: Kann man an den zu speichernden Bilddaten noch sparen? Eine Möglichkeit wäre, die Bildfrequenz zu verringern - zur Erfassung von Fahrzeugbewegungen sollten 5 Bilder pro Sekunde ausreichen, was die Datenmenge um einen weiteren Faktor 5 verringern würde. Man könnte auch nur ausgewählte Einzelbilder in hoher Qualität, die restliche Sequenz aber grob speichern. Für welche maximale Dauer der Datenspeicherung will man die lokale Station auslegen? Soll man für den "Notfall" einer längeren Periode von unklaren Ereignissen eine zusätzliche Speichermöglichkeit bereitstellen, etwa das sonst möglichst vermiedene Magnetband, optische Platten oder gar Aufzeichnung auf Film?⁸⁴ Soll man eventuell die Speicherung noch dezentraler zu den Sensoren verlegen, etwa sogar durch einen Videorekorder für jede Fernsehkamera - mit dem entsprechenden

83 Zur Kodierung und Kompression von Audio- und Bilddaten sowie neuen Normen dafür s. z.B.: G. Schlisser et al., Color Video Image Retrieval System, Proceedings, 1988 Carnahan Conference on Security Technology: Electronic Crime Countermeasures, Lexington KY: University of Kentucky, May 10-12, 1988; Amor (Fn. 82); M. Gilge u.a., Codierung von farbigen Bewegtbildszenen mit 64 kb/s - Ein neuer Ansatz zur Verwirklichung eines Bildtelefons im ISDN, Frequenz, 43. Jg., Nr. 3, S. 86-96, Nr. 4, S. 98-108, Nr. 5, S. 126-133, 1989; L. Arnold, Moderne Bildkommunikation - Formen, Komponenten, Bildkodierung, Heidelberg: Hüthig, 1992; O. Yamada, I. Yuyama, Future Broadcasting Technologies: Perspectives and Trends, IEICE Transactions, vol. E76-B, no. 6, pp. 592-598, June 1993; S. Ono, N. Ohta, Super High Definition Image Communications - A Platform for Media Integration, IEICE Transactions, vol. E76-B, no. 6, pp. 599-607, June 1993; K. Schlüter, Datenreduktion - Wie Radio und Telefon transparent werden, Funkschau, Nr. 1, S. 62-65, 1994; Datenreduktion - MPEG-Standard beschlossen, Funkschau, Nr. 1, S. 12-13, 1994. S. auch Datenblätter und Handbücher der Fa. LSI Logic, München, z.B.: JPEG Chipset Technical Manual, Jan. 1993; L64702 JPEG Coprocessor Technical Manual, July 1993; L64111 MPEG Audio Decoder, Sept. 1993.

Ein kommerzielles Bildspeichersystem für Überwachungsanlagen speichert ein Farbbild (ursprünglich ca. 1 Megabyte) mit ca. 20 Kilobyte auf Festplatte, was eine Kompression um den Faktor 50 bedeutet (MultiScop, Fa. Geutebrück, Windhagen).

84 Z.B. könnte man an einem Haupttor zur Notaufzeichnung eine gekapselte und versiegelte Fotokamera mit Film für 250 Aufnahmen und Serienbild-Möglichkeit (oder eine Filmkamera mit Einzelbildschaltung) anbringen. Die Bilder müßten dann jedoch im wörtlichen Sinne "abgeholt" werden, mit den entsprechenden Verzögerungen und Kosten. An einem Tor fallen die zusätzlichen Installationskosten kaum ins Gewicht; an einer Umfriedung - wo für je etwa 50 m eine Reserve-Kamera zu installieren wäre - wäre der Aufwand deutlich zu hoch.

Zuverlässigkeitsproblem?⁸⁵ Ist es möglich, die Übertragungskapazität zur Zentrale vorübergehend drastisch zu erhöhen?

Schließlich muß entschieden werden, wie man den pro Station notwendigen Speicher von bis zu einigen hundert Megabyte ausführen will. Die sich zunächst anbietenden Festplatten erscheinen für den jahrelangen Dauerbetrieb unter ggf. stark wechselnden Temperaturen zu ausfallgefährdet. In einer örtlichen Zentrale innerhalb eines Gebäudes sind Festplatten jedoch denkbar.⁸⁶ Sicherer erscheint die Ausführung als Halbleiterspeicher; Computer-Steckplatinen mit 64 bis 256 Megabyte Speicher sind heute zu Preisen von 100 - 150 DM pro Megabyte erhältlich. Zusätzliche Batteriepufferung wäre vorzusehen. Nicht-flüchtige oder gepufferte Scheckkarten-Speicher gibt es heute bis 20 Megabyte zu 100 - 600 DM pro Megabyte. Halbleiterspeicher ist aber heute etwa fünfzigfach teurer als Festplatten, so daß bei großem Speicherbedarf komplexe Optimierungsüberlegungen nötig sind.⁸⁷

In der internationalen Verifikationszentrale muß Speicherplatz für viele solche Ereignisse aus komprimierten Originaldaten vorgehalten werden. Heute sind Festplatten mit 2 bis 4 Gigabyte Kapazität (zu Preisen von 3.000 bis 10.000 DM) Standard für mittlere Rechenanlagen, und durch Zusammenschaltung läßt sich ein Vielfaches davon erreichen (bei Preisen von 2.000 - 3.000 DM pro Gigabyte). Archivierung ist dann z.B. auf digitalem Audio-Band oder auf Videokassetten möglich; eine solche Kassette (zu ca. 30 DM) kann 1 bis 2 Gigabyte speichern.

Zum Vergleich hier noch einmal die ungefähren Speicherkosten: Bandkassette: 20 DM/Gigabyte, Festplatte: 2.000 DM/GB, Halbleiterspeicher: 100.000 DM/GB.

4.4 Verarbeitung, Klassifizierung

Die automatische Überprüfung von Vertragsbestimmungen setzt voraus, daß aus den von den Sensoren kommenden Rohdaten Aussagen abgeleitet werden, die auf Vertragsrelevanz geprüft werden können. Das beinhaltet ein hohes Maß an Datenverarbeitung und -klassifizierung und bewirkt eine starke Informationsreduktion. Weil Rechenkapazität relativ billig ist und um die Kommunikationsverbindungen zu entlasten, wird man den größten Teil der Verarbeitung dezentral durchführen. Damit werden ähnliche Aufgaben durch viele gleichartige Systeme ausgeführt (Redundanz), was das Gesamtsystem sicherer gegen Ausfälle macht.

An jeder zu überprüfenden Installation ist ein entsprechendes Maß an Rechenkapazität nötig. Hier sind Operationen auszuführen wie z.B.: Berechnung von Signalspektren, Bewertung von Amplitudenverläufen, Extraktion von Objektkonturen aus den Signalen von Lichtschrankenfeldern oder aus Kamerabildern, Berechnungen von geometrischen Größen

85 Ein Analogband-Videorekorder kann ein normales Kamerasignal 4 Stunden lang aufzeichnen. Ein für den Objektschutz speziell gebauter Halbleiterspeicher zum Ersatz einer Bildspeicherplatte konnte dagegen nur 128 Bilder aufnehmen; das reichte für 8 Sekunden Aufnahmezeit, wenn nicht jedes Kamerabild aufgezeichnet wurde, s.: P. L. Terry, A Solid State Video Recorder as a Direct Replacement of a Mechanically Driven Disk Recording Device in a Security System, Proc. 30th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Orlando FL, July 9-12, 1989. Man würde Videorekorder nicht in unklimatisierten Gehäusen nahe bei den Sensoren aufstellen; ihre Verwendung in einer örtlichen Zentrale innerhalb eines beheizten/gekühlten Gebäudes ist jedoch denkbar. Dabei kann man Bildsequenzen verschiedener Kameras mit einem Gerät aufzeichnen, wenn man die einzelnen Bildraten heruntersetzt und die Signale entsprechend umschaltet. Es sollte auch geprüft werden, ob man gleich mit digitalen Magnetbandkassetten-Geräten arbeiten kann.

86 Dabei ist dann zu überlegen, ob die Festplatte länger hält, wenn sie ständig läuft oder wenn sie nur im Alarmfall eingeschaltet wird.

87 Mit steigenden Speichergrößen pro Baustein wird der Preis von Halbleiterspeicher weiter fallen.

und Geschwindigkeiten, Vergleich mit bekannten Mustern. Dabei ist zu entscheiden, ob ein Hauptrechner ausreicht oder ob für bestimmte Sensor(-kombination)en eigene Vorverarbeitungsrechner nötig sind. Eigene Rechner werden besonders dort angebracht sein, wo eine hohe Datenrate anfällt, d.h. vor allem bei bildgebenden Sensoren, aber auch bei Mikrofonen oder Geofonen.

Zur Verminderung von Störungen wird bei analogen Sensoren die Verstärkung gleich in der Nähe des Sensors stattfinden. Da in vielen Fällen die Signalstärke über einen weiten Bereich schwanken kann (bei Mikrofonen und Geofonen z.B. um den Faktor 100.000, also um fünf Zehnerpotenzen), wird man die Verstärkung elektronisch schaltbar auslegen müssen. Dann liegt es nahe, die Analog-Digital-Wandler gleich mit in die sensornahe Verarbeitung einzubeziehen und die Signale nur digital zum übergeordneten Rechner zu übertragen. So kann eine Verstärker-Filter-Wandler-Einheit z.B. ein Mikrofon-Geofon-Paar bedienen. Auch die Verarbeitung der Signale von mehr als zwei in der Nähe stationierten Sensoren in einer Einheit ist möglich - sie muß dann die entsprechende Anzahl schaltbarer Filter-Verstärker und einen mit Multiplexer versehenen Analog-Digital-Wandler enthalten. Die Einheit braucht dann einen eigenen Mikroprozessor, der zumindest die Verstärker und Wandler steuert, die Daten einliest und an den übergeordneten Rechner überträgt. Diese Übertragung kann dann seriell erfolgen; bei Datenraten bis zu 100 Kilobyte/s reicht ein Koaxialkabel (Ethernet), mit Glasfaser ist das Hundertfache erreichbar. Die Leistungsfähigkeit der verwendeten Rechner wird in der Regel im Bereich moderner Personal-Computer liegen; bei größeren Installationen wird ein Zentralrechner in der Klasse Arbeitsstation nötig sein. An Kosten sind für eine Verstärkungs- und Wandlereinheit 1.000 bis 5.000 DM pro Analogkanal anzusetzen, für einen sensornahen Rechner 2.000 bis 5.000 DM. Spezielle Rechner zur Bildverarbeitung sowie größere Zentralrechner sind mit einigen 10.000 bis 100.000 DM zu veranschlagen.

4.5 Kommunikation

Wie in 4.3 ausgeführt, besteht die Übertragung der vertragsrelevanten Verarbeitungsergebnisse einer Installation im Normalfall aus der Übermittlung einer kurzen summarischen Nachricht: die Anzahl der jeweiligen Ereignisse in bestimmten Kategorien in einem Zeitraum von z.B. einigen Stunden. Ist eine solche Summenmeldung 1000 Byte lang, entspricht das einer mittleren Datenrate von weit unter einem Byte pro Sekunde. Mit der entsprechenden zeitlichen Koordination ist es also für eine internationale Zentrale ein Leichtes, hunderte, ja Tausende örtlicher Installationen abzufragen - bei der über normale Telefonleitungen möglichen Datenrate von ca. 1 Kilobyte/s.⁸⁸

Eine höhere Datenrate wäre nötig, würde man stattdessen vorsehen, daß sofort nach jedem örtlichen Ereignis eine Meldung abgesetzt wird. Nimmt man z.B. an, alle 10 Sekunden fände ein Ereignis statt - das ist schneller als auf einem Flugplatz Starts und Landungen stattfinden können und entspricht etwa der höchsten sinnvollen Durchfahrtsrate an einem Tor -, das mit 100 Byte zu melden ist, ergeben sich pro Installation 10 Byte/s. Bei z.B. 1000 Installationen muß die Zentrale dann also schon 10 Kilobyte/s aufnehmen, würde also mehrere Telefonleitungs-ähnliche Verbindungslinien brauchen. Diese Anforderungen sind

88 Damit wäre für die eigentliche Übertragung von jeder Installation nur 1 Sekunde nötig. Je nach Auslegung des Kommunikationsnetzes kann das Anwählen der Stationen deutlich länger dauern, so daß ggf. die Anwählelektronik und die -leitungen mehrfach parallel auszuführen wären. Allerdings wird man aus Sicherheitsgründen ein vom jeweiligen nationalen Telekommunikationsnetz unabhängiges System vorziehen, s. 4.6.

aber - verglichen mit dem heute möglichen - immer noch bescheiden, sind doch über einen digitalen Sprechkreis im Telefonnetz 64 Kilobit/s, d.h. etwa 6 Kilobyte/s, erreichbar.⁸⁹

Ähnliche Anforderungen folgen, wenn man - wie es unumgänglich erscheint - den lokalen Stationen die Fähigkeit gibt, bei Vertragsverletzungen oder unklaren Ereignissen die Zentrale sofort zu informieren. Ein solcher Alarm braucht zunächst ja nur einige Dutzend Bytes zu enthalten.

Die Anforderungen an die Datenrate erhöhen sich jedoch, wie in 4.3 erwähnt, um mehrere Größenordnungen, sobald ein unklares Ereignis auftritt, das lokal nicht klassifiziert werden kann. Wollte man dann z.B. Bildinformationen in Echtzeit übertragen, wären Datenraten - komprimiert - in der Größenordnung von Megabytes/s nötig, die für die Dauer des/der unklaren Ereignisses aufrechtzuerhalten wären. Ein Ausweg ist, diese Daten zunächst lokal zu speichern und dann innerhalb längerer Zeiträume zu übertragen. Um diese Zeiten nicht zu lang werden zu lassen (d.h. auch mehrere unklare Ereignisse - an demselben oder auch an anderen Orten - handhaben zu können), hat man ein Motiv, die potentielle Datenrate erheblich höher auszulegen als für den Normalfall. Wieviele unklare Ereignisse das System im Mittel und vor allem in der Spitze innerhalb welcher Zeit bearbeiten können soll, ist eine komplizierte Entscheidung, insbesondere, weil sie aufgrund unvollständiger Information getroffen werden muß. Eine bessere Abschätzung der Häufigkeit und Art solcher Ereignisse ist möglich, wenn man einige Installationen probeweise über einen längeren Zeitraum betreibt. Es ist auch davon auszugehen, daß jedes auftretende unklare Ereignis sorgfältig analysiert wird und daß die Klassifizierungs-Algorithmen anschließend erweitert werden, so daß die Rate dieser Ereignisse längs einer Lernkurve mit der Zeit sinken wird.

Zur Entlastung einer Datenverarbeitungszentrale ist es auch möglich, regionale Unterzentren einzurichten. Solche Zentren sind innerhalb des Kommunikationsnetzes sowieso nötig. Eine Netzstruktur mit vielen alternativen Wegen der Datenübertragung empfiehlt sich schon aus Gründen der Redundanz und damit Übertragungssicherheit.

Als Kosten für die Kommunikationssysteme kann man folgende Richtwerte benutzen: Erdkabel 30.000 - 60.000 DM pro km, bei Datenraten bis zu hunderten von Megabit/Sekunde (Glasfaser); Richtfunk 2.000 - 10.000 DM pro km, bei Datenraten von einigen Megabit/Sekunde (Mindestkosten für zwei Stationen 50.000 - 150.000 DM); Satellitenfunk: 40.000 - 150.000 DM unabhängig von der Entfernung, bei Datenraten zwischen 64 Kilobit/s und 2 Megabit/s.

4.6 Zuverlässigkeit und Sicherheit

Automatische Systeme zur Verifikation, die innerhalb eines Landes stationiert sind, müssen besonders zuverlässig funktionieren und in besonderer Weise gegen Manipulation geschützt werden.

Gegen Ausfälle von Komponenten und (Teil-)Systemen sind eine Reihe technischer Maßnahmen möglich. Zunächst müssen Bauteile hoher Qualität verwendet werden, und bei der Produktion muß intensiv kontrolliert werden. Weiter sollte, wo möglich, auf bewegliche Teile wie Festplatten oder Magnetband verzichtet werden; bei niedriger Leistungsaufnahme kann auch ein Lüfter weggelassen werden. Gerät und Kabel im Freien sollten blitzgeschützt werden. Zur Erhöhung der Redundanz dienen die schon in 4.2 erwähnte unterbrechungsfreie Strom-

89 S. z.B.: Gierz u.a. (Fn. 79).

versorgung, die Erhöhung der Sensoranzahl über das minimal Nötige hinaus, die netzartige Kommunikationsstruktur, die Übertragung mit zusätzlichen Kontroll-Informationen.⁹⁰

Speziell sollten in jedem Rechner die Versorgungsspannungen und die Temperatur ständig überprüft und protokolliert werden. Eine sogenannte Wachhundschtaltung sollte regelmäßig prüfen, ob das richtige Betriebssystem bzw. Programm noch läuft und es ggf. - mit Protokollierung - neu starten.⁹¹

In bezug auf Einwirkungen von außen ist festzustellen, daß gewisse Schutzmaßnahmen nötig sind gegen kleinere, eventuell auch unbeabsichtigte Störungen. Dazu gehören: das Vergraben von Geofonen und Übertragungskabeln, die Montage von oberirdischen Sensoren und Kommunikations-Antennen auf Masten, die Unterbringung von elektronischen Komponenten in abgeschirmten, stabilen, verschlossenen oder versiegelten Behältern, die Umzäunung von Einrichtungen. Grundsätzlich ist jedoch festzuhalten, daß ein mechanischer Schutz nur unvollständig möglich ist und daß ein entschiedener Akteur - auch unterhalb der staatlichen Ebene - dadurch nicht an der Schädigung gehindert werden kann.

Allerdings wird der betreffende Staat, jedenfalls solange er bemüht ist, die vertraglichen Verpflichtungen einzuhalten (oder doch diesen Eindruck zu erzeugen), interessiert sein, die Verifikationssysteme zu schützen und Schädigungen zu vermeiden. Prinzipiell muß man jedoch davon ausgehen, daß der jeweilige Staat versuchen könnte, die Systeme zu betrügen, wobei ihm sein ganzes technologisches und geheimdienstliches Potential zur Verfügung stünde. Die sonst im zivilen Leben üblichen Sicherheits- und Schutzmaßnahmen reichen daher nicht aus.

Aus diesen Gründen sind die Hauptmittel der Vorsorge die Selbst-Überwachung der Systeme mit der Meldung von Störungen und Ausfällen an die Zentrale sowie die Unabhängigkeit des Kommunikationssystems vom jeweiligen nationale Telekommunikationsnetz (dieses kann evtl. als Reserve benutzt werden)⁹². Manche Sensoren können sich selbst überwachen - ein vergrabenes Geofon kann z.B. das Aufgraben feststellen, zwei Kameras auf Masten können sich gegenseitig "im Auge haben". Das Ausbleiben der "normalen" Sensorsignale (z.B. Umgebungsrauschen, Hintergrundbild) zeigt an, daß der Sensor, seine Datenverarbeitung oder die Leitung gestört sind. Auf den lokalen Leitungen sowie den überörtlichen Verbindungen sollten immer wieder Test-Informationen übertragen werden. Ggf. sollten auch Geber für Testsignale vorgesehen werden, die regelmäßig aktiviert werden, z.B. Blinklampen im Gesichtsfeld von Kameras. In den Türen von Elektronikschränken, in Computergehäusen usw. sollten Kontakte vorgesehen werden, die das Öffnen feststellen. Alle solchen Ereignisse sollten sowohl lokal - unüberschreibbar - protokolliert wie auch sofort an die Zentrale übermittelt werden.

Zum Schutz gegen Eindringen über die Kommunikationsverbindungen sollte das grundlegende Betriebssystem unmodifizierbar in Nur-Lese-Speicher (ROM/EPROM) abgelegt sein,

90 Für die Rechnerauslegung s. z.B.: R. Konakovsky, Sichere Prozeßdatenverarbeitung mit Mikrorechnern, München usw.: Oldenbourg, 1988; R. Lauber, Prozeßautomatisierung, Band 1, Automatisierungsstrukturen, Prozeßrechensysteme, Echtzeit-Programmierung, Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik, Berlin usw.: Springer, 1989 (Kap. 7); W. Görke, Fehlertolerante Rechensysteme, München usw.: Oldenbourg, 1989; A. D. Singh, S. Murugesan (eds.), Fault-Tolerant Systems, Computer (IEEE), vol. 23, no. 7, July 1990; Special Issue on Fault-Tolerant Computing, IEEE Transactions on Computers, vol. 39, no. 4, April 1990.

91 S. z.B.: W. Leidig (Hg.), H. Bäuerle, K. Schöber, Industrie-PC, Heidelberg: Hüthig, 1991.

92 Die hierzu nötige Hardware-Anbindung an das nationale Telekommunikationsnetz macht jedoch Eindringversuche prinzipiell leichter, so daß man versuchen wird, ohne diese Anbindung auszukommen.

zur Modifikation vorgesehene Betriebssystem-Komponenten und Programme, evtl. auch wichtige Daten, in elektrisch lösch- und programmierbarem Speicher ("flash memory"), der auch bei Ausfall der Reservestromversorgungen seine Information beibehält. Zusätzlich zu den rechnerinternen batteriegepufferten Uhren können Empfänger für Zeitsender vorgesehen werden (in Mitteleuropa z.B. für den DCF-77-Sender).

Jede übertragene Information kann verschlüsselt werden (wobei allerdings das Interesse des jeweiligen Staates am "Mithören" der Information abgewogen werden muß). Die Echtheit übertragener Informationen kann durch Schutzcodes bestätigt werden, die nach nur der Zentrale bekanntem Muster wechseln.⁹³ Ähnliche Schutzcodes können für das Abfragen lokaler Systeme erforderlich sein. Zum Schutz gegen Eindringen in das Kommunikationssystem und unbefugtes Abfragen (etwa zum Ermitteln von Schutzcodes) sollten alle Kommunikations-Ereignisse und -Versuche protokolliert, mitgezählt und gemeldet werden. Im Falle, daß Teile der lokalen Auswerteprozeduren von der Zentrale ferngesteuert verändert werden können, sind dafür zusätzliche Codes mit verstärktem Schutz nötig.

Bei der Systementwicklung und -erprobung müssen möglichst vollständige Schädigungs- und Täuschungsszenarien erstellt werden. Die möglichen technischen Gegenmaßnahmen müssen unter Effizienz- und Kostengesichtspunkten beurteilt werden. Die so erreichte optimale Systemauslegung wird man dann - nach den Erfahrungen von Test-Installationen und dem realen Betrieb, unter Einschluß von Übungs-Täuschungsversuchen - immer wieder weiterentwickeln.

4.7 Andere Systemaspekte

Bei der Auslegung des Gesamtsystems wie der einzelnen Teilsysteme ist eine Vielzahl von Entscheidungen zu treffen. Diese sollten an einer Reihe einheitlicher Kriterien ausgerichtet werden (einige sind an verschiedenen Stellen schon erwähnt worden).⁹⁴

Weit oben steht die zuverlässige Erfassung vertragsrelevanter Ereignisse in ausreichend kurzer Zeit. Ereignisse sollten so klar und vollständig wie möglich dokumentiert werden. Die Systeme sollten die möglichen Umgebungseinflüsse überstehen können, ausfallsicher sein und eine lange Lebensdauer haben.

Die Fehlalarmrate soll sehr klein sein, damit nicht zu viele sofortige Inspektionen zur Klärung nötig werden und sich Vertrauen in die Zuverlässigkeit der Systeme entwickelt. Weil man aber auch an einer niedrigen Entdeckungsschwelle interessiert ist, sind evtl. verschiedene Alarmstufen mit zunehmendem Grad an zunächst automatischer "Aufmerksamkeit" und "Nachsehen" sinnvoll. In jedem Fall ist eine ausgedehnte Erprobungs- und Lernphase erforderlich, auch um die "Alltags-Tücken" der automatischen Verifikation kennenzulernen und Maßnahmen dagegen zu treffen.

Zur Anpassung an örtliche Gegebenheiten oder an spätere Entwicklungen ist Flexibilität nötig.

93 S. z.B.: I. Schaumüller-Bichl, Sicherheitsmanagement - Risikobewältigung in informationstechnologischen Systemen, Mannheim usw.: BI Wissenschaftsverlag, 1992, Kap. 5 und 6.

94 Für eine systematische Darstellung von Kriterien bei der Auswahl und Auslegung kooperativer technischer Verifikationsmittel s.: J. Altmann, Criteria for choosing and designing technical means of verification, in: S. Sur (ed.), New Technical Means for the Verification of Arms Control, Geneva: UN Institute for Disarmament Research, in Druck.

Die Kosten sollten begrenzt bleiben. Aus diesen Zielen ergeben sich Forderungen nach Redundanz, Modularität und Adaptivität. Wo möglich, sollten Standardkomponenten verwendet werden; Anpassungen sollten so weit wie möglich durch Software-Änderungen erfolgen - die laufende Anpassung an sich ändernde örtliche Bedingungen (z.B. Umgebungsgeräusch) kann sogar schon in die Programme eingebaut werden.

Der zivile bzw. vertragskonforme Betrieb der überwachten Einrichtungen soll so wenig wie möglich beeinträchtigt oder behindert werden. Sicherheitsvorschriften sind zu berücksichtigen.

Besondere Überlegungen sind nötig, um die Systeme sicher zu machen gegen Täuschungsversuche auf Geheimdienst-Niveau. Das sollte zunächst durch redundante Sensoren verschiedener Arten geschehen (s. 4.6); wo die Geräte-Auslegung nicht reicht, sind Prozeduren und Regeln auszuarbeiten. Als Beispiele möchte ich nennen: Vorschrift, daß Fahrzeuge und entsprechend große Lasten in Kontroll-Punkten nicht abgedeckt sein dürfen; Verbote für Kräne und Hubschrauber in der Nähe von Zäunen, für schwere Fahrzeuge in der Nähe von Kontroll-Linien. Sollte das aus guten Gründen (z.B. wegen eines Bauvorhabens) nicht eingehalten werden können, sind entsprechende Notifikationen und die ständige Anwesenheit von Inspektionspersonal vorzusehen.⁹⁵

Besondere Regeln sind auch nötig zur Festlegung, was genau bei einem unklaren Ereignis geschieht oder wie man z.B. neue Fahrzeugtypen ankündigt und die Erkennungs-Algorithmen entsprechend modifiziert.

95 S. dazu die vorgeschlagenen Regelungen in den Abschnitten IV (5), V (1)e, VII (8), X (7) in: O. Schäfer, J. Altmann, Draft Protocol on Sensor Verification - Proposal for a Legal Framework for the Use of Ground Sensors to Verify Limits on Military Land and Air Vehicles, IFHV-Studien no. 2, Bochum: Brockmeyer, 1993.

5. Überwachung kleiner Bereiche

In diesem Kapitel sollen typische Sensorkombinationen vorgestellt werden, wie sie an einem kleinen konvertierten Bereich benutzt werden könnten. Speziell geht es um Kontrollpunkte (5.1 Tor), eine -Linie (5.2 Zaun) oder um eine kleine zu kontrollierenden Fläche (5.3 umfriedetes Gelände, 5.4 Flugplatz, 5.5 Hafen). 5.6 behandelt eine Kontroll-Linie durch freies Gelände. Es sind also immer Sensoren für kurze und mittlere Reichweiten zu verwenden.

5.1 Tor

Bei umfriedeten Einrichtungen wie Fabriken oder Depots, aber auch vielen Häfen, sind Landfahrzeuge gezwungen, durch ein Tor zu fahren, wenn sie hinaus oder hinein wollen. Die aufwendigsten Kontrollsysteme sind dort nötig, wo viele verschiedene Arten von Fahrzeugen passieren können.

Bei größeren Einrichtungen mit mehreren Toren ist es zur Vereinfachung und Kostensenkung sinnvoll, zwischen Haupttoren und Nebenausfahrten zu unterscheiden. Wenn ein einfaches Kriterium existiert, das vertraglich relevante Fahrzeuge von anderen unterscheidet - etwa die Höhe, Breite, Länge oder Masse -, kann man die Nebenausfahrten mit einem Sensor für diese physikalische Größe versehen und dann alles, was darunter liegt, ohne Proto-

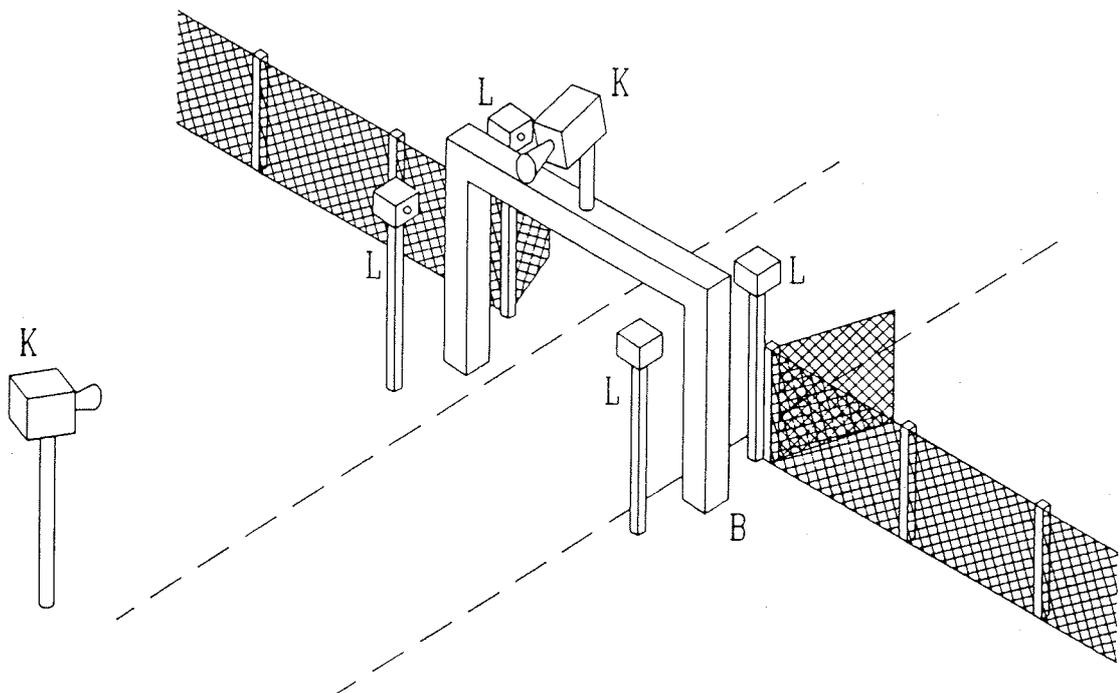


Abb. 5.1 Beispiel für die Gestaltung einer Nebenausfahrt. Fahrzeuge mit geringer Breite und Höhe können die Begrenzung (B) ungehindert und unregistriert durchfahren. Lichtschranken (L) prüfen die Einhaltung der Maximalhöhe unabhängig noch einmal. Zwei Fernsehkameras (K) dienen zur Protokollierung, sollte ein zu hohes/breites Fahrzeug durchzufahren versuchen. Die linke erlaubt eine Überprüfung, ob der Rest der Anordnung vorhanden ist; die rechte Kamera hat die linke im Gesichtsfeld. Die Beleuchtung und eine eventuelle Überdachung sind nicht eingezeichnet.

kollierung oder andere Aktivitäten passieren lassen.⁹⁶ Sollten Fahrzeuge, die die Schwelle überschreiten und somit vorschriftsmäßig das/die Haupttor/e benutzen müssen, dennoch versuchen, die Nebenausfahrt zu durchfahren, wäre ein Alarm mit Protokollierung auszulösen. Im Normalfall ist dort also nichts zu registrieren; eine gewisse Sensor- und Speicherkapazität ist für den Alarmfall vorzuhalten. Die wohl am billigsten zu kontrollierenden Größen sind Breite und Höhe. Im Prinzip reichen hier schon eine Fahrbahn-Einengung und ein höhenbegrenzender Balken, selbst ohne Sensoren. Zur Sicherheit gegen Demontage der Begrenzungen können aber zusätzliche Lichtschranken angebracht werden, ggf. auch Kontakte in den Begrenzungen. Zur Dokumentation im Alarmfall und zur Stichprobenkontrolle darauf, ob die Begrenzungen noch vorhanden sind, können zwei Fernsehkameras die Ausfahrt von beiden Seiten von schräg oben im Gesichtsfeld haben. Abb. 5.1 zeigt, wie eine Nebenausfahrt gestaltet sein könnte.

Die Kosten für die Sensoren und Rechner an einer Nebenausfahrt betragen 30.000 - 50.000 DM, mit zusätzlichem Material und Installation sind 50.000 - 80.000 DM anzusetzen.

Die vollständige Sensor-Ausstattung ist an dem/den Haupttor/en vorzusehen, wo beim Erkennen eines die "Relevanzschwelle" überschreitenden Fahrzeugs die verschiedenen Sensor-Signale aufgenommen und im Rechner so weit verarbeitet werden, daß das Fahrzeug zuverlässig klassifiziert wird.⁹⁷ Dabei können sehr weitgehende Kriterien vorkommen, etwa die Feststellung, ob das Fahrzeug Ketten- oder Radantrieb hat oder ob eine große Last auf der Ladefläche eines Tiefladers abgedeckt ist (was, da gegen die Regeln, einen Alarm auslösen würde).

Abb. 5.2 zeigt eine mögliche Ausstattung für eine Fahrbahn an einem Haupttor.⁹⁸ Die Fahrzeug-Präsenz wird mit Lichtschranken, Induktionsschleifen, einer Waage, einem Magnetsensor, einem Geofon sowie mit Kameras festgestellt. Die Geschwindigkeit ist aus der waagerechten Lichtschrankenreihe und den Induktionsschleifen zugänglich; sie wird für die Längenmessung und Profilbestimmung gebraucht. Das ungefähre Fahrzeugprofil, einschließlich seiner Maximalhöhe, wird mittels der senkrecht angeordneten Lichtschrankenreihen und des von oben strahlenden Radars bzw. Ultraschall-Sensors bestimmt. Fernsehkameras halten die genaue Seitenansicht und Übersichtsbilder von vorn und hinten fest. Die Achslasten und die Gesamtmasse werden mittels einer Waage ermittelt. Ein induktiver Kennzeichenleser ist seitlich angebracht.

In diesem Konzept ist viel Redundanz vorgesehen; das erhöht die Sicherheit gegen Ausfall oder Täuschung erheblich. Die Anwesenheit wird mit sechs verschiedenen Sensorarten mit meist mehrfacher Anzahl festgestellt. Für die Geschwindigkeit werden zwei Sensorarten verwendet (zusätzlich können die Kameras verwendet werden). Das Fahrzeugprofil wird mit drei Sensorarten erfaßt. Die Kameras erlauben die Überprüfung der gesamten Anordnung und haben sich paarweise gegenseitig im Gesichtsfeld. Der theoretische Versuch, ein Fahrzeug unerkant hindurchzubringen, müßte also alle diese Sensoren so täuschen, daß sie

96 Dieses Prinzip von Haupttor und Nebenausfahrten wurde - allerdings mit permanenter Anwesenheit von Personal - im Mittelstreckenvertrag und in START I gewählt, s. Fn. 12, 10 und 25.

97 Es ist auch denkbar, die Haupttore nur für die großen Fahrzeuge vorzusehen und für alle kleineren die Nebenausfahrten vorzuschreiben. Das kann den Rohdaten-Anfall und die Routineverarbeitung am Haupttor deutlich verringern.

98 Verwandte Konzepte werden bei der Verifikation des Mittelstrecken-Vertrags benutzt, s. Fn. 25. Zu Firmenkonzepten für Verifikation im KSE-Zusammenhang s.: Barthel, Harbig, Köhler (Fn. 33) und Schütte (Fn. 33).

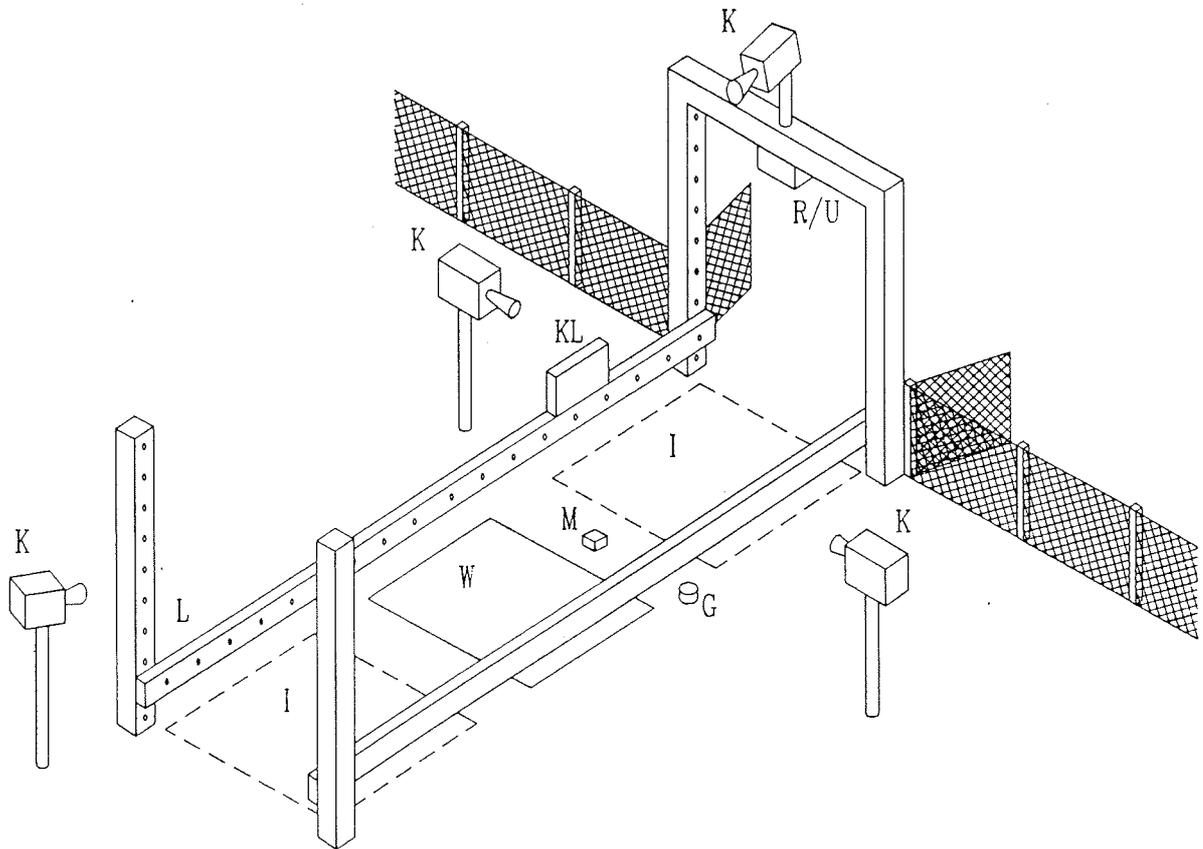


Abb. 5.2 Mögliche Sensorausstattung für eine Fahrbahn an einem Haupttor. Die Präsenz eines Fahrzeugs wird erkannt, seine Geschwindigkeit, sein Höhenprofil, seine Ansichten von den Seiten sowie von vorn und hinten, und seine Masse werden aufgenommen. L: Lichtschranken-Anordnung mit waagerechten und senkrechten Reihen, I: Induktionsschleifen (in der Fahrbahn), M: Magnetsensor (in der Fahrbahn), G: vergrabenes Geofon, R/U: Radar oder Ultraschall-Sensor, K: Fernsehkamera, W: Waage, KL: induktiver Kennzeichenleser (optional). Die Kameras haben die Toranordnung und sich gegenseitig im Gesichtsfeld. Redundanz liegt weiter vor bei der Profilbestimmung mittels zweier senkrechter Lichtschranken-Reihen und zusätzlich eines Radars oder Ultraschallsensors sowie bei der Geschwindigkeitsmessung mit waagerechten Lichtschranken und Induktionsschleifen. Bei Bedarf können noch weitere Eigenschaften mehrfach gemessen werden. Die Beleuchtung und eine eventuelle Überdachung sind nicht eingezeichnet.

ununterbrochen den Zustand des leeren Tors melden. Das scheint mit hoher Sicherheit ausgeschlossen.⁹⁹

Ein so ausgestattetes Haupttor mit einer Fahrbahn (die in beide Richtungen benutzt wird) würde komplett (einschließlich Installation) 250.000 - 400.000 DM kosten.

An einem Eisenbahn-Tor kann man ähnlich wie beim Straßen-Haupttor eine Lichtschranken-Anordnung mit waagerechten und senkrechten Reihen vorsehen, dazu Rad-/Achskontakte, eine Gleiswaage, ein Geofon und vier Fernsehkameras. Es kann entweder gleich mit einem Straßen-Tor integriert werden; andernfalls sollte es so angelegt werden, daß große Straßenfahrzeuge nicht passieren können (z.B. durch ein erhöhtes Gleisbett). Für den Fall, daß geländegängige Fahrzeuge über die Schwellen fahren würden, würden sie

99 Die hier vorgestellte Sensorvielfalt kann reduziert werden, wenn man Kosten sparen muß oder wenn man keine mehrfache Sicherheit gegen Täuschungsversuche braucht.

jedenfalls durch Lichtschranken, Kameras und Geofon erfaßt; das Ausbleiben von Gewicht auf den Schienen kann dann z.B. ein Alarmsignal darstellen.

Als Kosten für ein Eisenbahn-Tor sind (einschließlich Installation) 200.000 - 600.000 DM anzusetzen; der niedrigere Wert gilt, wenn auf eine Gleiswaage verzichtet werden kann.

5.2 Zaun/Mauer

Einrichtungen wie Fabriken oder Lagerstätten sind praktisch immer mittels einer physischen Barriere gegen unbefugtes Eindringen und Verlassen gesichert. Der Betreiber hat ein eigenes Interesse, nicht nur Fahrzeuge, sondern auch Personen nur durch die offiziellen Tore durchzulassen und andere Übertrittsversuche am Zaun oder an der Mauer zu entdecken. Im Verifikationszusammenhang muß jedoch davon ausgegangen werden, daß der Betreiber selbst die Barriere überwinden könnte und ggf. die eigenen Überwachungssysteme kurzzeitig abschalten würde, um der kontrollierten Erfassung am Tor zu entgehen. Daher ist auch an der Barriere ein vom Betreiber unabhängiges Überwachungssystem nötig, das jedoch mit der Barriere zusammenwirkt.

Große Landfahrzeuge könnten die Barriere (z.B. bei Nacht) passieren, indem die Barriere kurzzeitig geöffnet (ein Zaunabschnitt niedergelegt, ein Notausgang aufgeschlossen) wird oder indem sie durch einen Kran - u.U. auch durch einen Hubschrauber -¹⁰⁰ darübergehoben werden. Eine Öffnung kann festgestellt werden, indem man die Notausgänge - evtl. auch den ganzen Zaun - versiegelt und die Siegel in gewissen Abständen überprüft. Das Siegel könnte auch durch ein (z.B. optisches Faser-)Kabel gebildet werden, durch das ständig Pulse geleitet werden; bei Ausbleiben der Pulse würde die Zentrale alarmiert.¹⁰¹ Mit einem piezoelektrischen Drucksensorkabel könnten sogar Versuche, den Zaun zu übersteigen, anhand der erzeugten Vibration erfaßt werden.

Man kann aber auch die Barriere selbst unberührt lassen und Sensoren für Fahrzeuge installieren. Geeignet ist eine Kette von Mikrofonen, Geofonen und Fernsehkameras mit Scheinwerfern (Abb. 5.3).¹⁰² Die Sensoren würden in Abständen von etwa 100 m so aufgestellt, daß jeder Abschnitt von mindestens zwei benachbarten Sensoren derselben Art überwacht wird (d.h. kein Objekt ist weiter als 50 m vom nächsten Sensor entfernt).¹⁰³ Dabei muß eine Blendung von Kameras durch Scheinwerfer benachbarter Kameras vermieden werden, evtl. dadurch, daß alle Kameras nur in eine Richtung sehen und alle 50 m stehen. Eine solche Kontroll-Linie würde auch das Herüberheben durch einen Kran/ein Kranfahrzeug mit erfassen, da entweder der Kranaufbau oder das Heranfahren sowie der Betrieb des Krans bemerkt würden. Auch Hubschrauber würden zuverlässig erfaßt, da sie sowohl starken Lärm erzeugen wie auch entsprechende Bodenvibration hervorrufen.

100 Das geht nur bei einer Masse bis zu maximal 10 Mg, so daß Kampfpanzer und schwere Lkw dafür nicht in Frage kommen.

101 Dafür ist im Prinzip das für die Sicherungsmaßnahmen der IAEO entwickelte VACOSS-Siegel geeignet, dessen Glasfaser-Schleife verlängert werden müßte, s.: B. Richter u.a., The Design and Quality Assurance of the VACOSS Series Production Model, pp. 666-670, Proc. 29th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, 27-29 June 1988 (Hersteller: Dornier, Friedrichshafen; Aquila, Albuquerque NM, USA). Hersteller/Lieferanten von Glasfaser-Zaunsensorkabeln z.B.: Datacet, Willich; Pieper, Schwerte.

102 Zu verwandten Firmenkonzepten für mögliche KSE-Verifikation s.: Barthel, Harbig, Köhler (Fn. 33) und Schütte (Fn. 33).

103 Bei solchen Abständen sind Lichtschranken nicht mehr unter allen Wetterbedingungen zuverlässig. Ein anderes Argument gegen Lichtschranken längs Zäunen ist, daß sie schon durch fallende Blätter unterbrochen werden können. Schließlich liefern sie nicht, wie die Kameras, zweidimensionale Bilder der Szene.

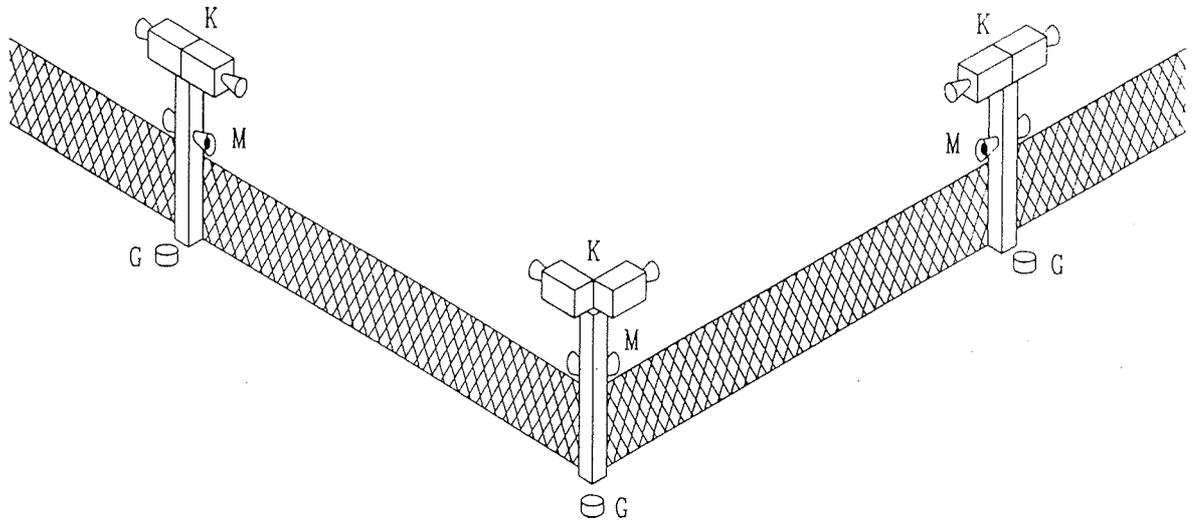


Abb. 5.3 Sensorlinie längs eines Zauns. Geräusch und Vibrationen, hervorgerufen durch laufende Motoren und Bewegungen schwerer Fahrzeuge, werden von Mikrofonen (M), evtl. mit Reflektoren für Richtwirkung, und Geofonen (G) erfaßt. Fernsehkameras (K) mit Scheinwerfern erlauben optische Überwachung sowie eine Bilddokumentation von unklaren und anderen Alarm-Ereignissen. Die Sensorabstände und -richtungen sind so gewählt, daß jeder Abschnitt von mindestens zwei Sensoren jeder Art überwacht wird.

Die Kapazität des zentralen örtlichen Speichers und der Kommunikationsverbindung braucht nicht für die Signale aller Sensoren längs der gesamten Umfriedung ausgelegt zu werden, da ein Alarm normalerweise nur an einer Stelle ausgelöst würde und somit nur die nächsten zwei bis vier Sensorpositionen signifikante Informationen liefern können. (Bei massiven Verletzungen an vielen Stellen reicht die genaue Dokumentation an einer Stelle und die rudimentäre Speicherung der anderen Ereignisse aus, da eine sofortige Inspektion und eine ausführliche Untersuchung vor Ort folgen würden.) Auch die Scheinwerfer müssen nachts nur im Alarmfall und nur an der betroffenen Stelle eingeschaltet werden.

Prinzipiell genügen Mikrofone und Geofone zur Überwachung auf Fahrzeug-Annäherung, jedenfalls bei weitläufigen Anlagen. Die zusätzliche Aufstellung von Fernsehkameras kann man mit ihrem erheblich höherem Informationsgehalt rechtfertigen, der vor allem für die Dokumentation und spätere Klärung von unklaren Ereignissen und Vertragsverletzungen von hohem Nutzen ist. Andererseits bedingen sie einen erheblich erhöhten Rechen-, Speicher- und Kommunikationsaufwand, so daß man aus Kostengründen gerne darauf verzichten würde, insbesondere dann, wenn man nur eine sehr kleine Zahl unklarer Ereignisse erwartet. Wahrscheinlich muß man die Erfahrungen einer Erprobungsphase an typischen Einrichtungen auswerten, um über die Einbeziehung von Kameras zu entscheiden.

Für die Funktion einer solchen Sensorlinie ist es erforderlich, schwere Fahrzeuge und Kräne sowie evtl. Hubschrauber in bestimmtem Abstand von der Barriere zu verbieten (bzw. Notifikation und Anwesenheit von Inspektoren zu verlangen, sollte diese Regel einmal ausnahmsweise nicht eingehalten werden können). Das sollte bei großen und weitläufigen Anlagen kein Problem sein; bei enger Bebauung und kurzen Abständen zwischen Gebäuden, Straßen und der Barriere müßte man wohl auf die Geofone, vielleicht auch auf die Mikrofone verzichten. Das Überwachungssystem sollte dann auf jeden Fall Kameras und zusätzlich die erwähnten Zaun-Drucksensorkabel und/oder Siegelkabel enthalten.

An Kosten sind zwischen 250.000 und 400.000 DM pro Kilometer Umfriedung anzusetzen (einschließlich Installation). Kann auf Kameras zur Dokumentation verzichtet werden, reduziert sich das auf etwa die Hälfte. Für ein zusätzliches Drucksensor-Kabel sind etwa 100.000 DM pro km nötig, für ein Siegelkabel 10.000 - 20.000 DM pro km.

5.3 Umfriedetes Gelände

Ein durch eine Barriere umfriedetes Gelände mit Toren (eine konvertierte Fabrik, ein ehemaliges Militärdepot o.ä.) kann durch die Kombination der in 5.1 vorgestellten Torkontrollen mit den in 5.2 diskutierten Zaun-/Mauerkontrollen überwacht werden. Zweckmäßigerweise werden dann beide Untersysteme durch eine gemeinsame zentrale Verarbeitungseinheit überwacht und gesteuert, die auch die Datenspeicherung und die Kommunikation mit der Verifikationszentrale übernimmt.

Für ein Gelände von 1 km * 1 km (4 km Zaunlänge) mit einem Haupttor und zwei Nebenausfahrten plus Zentrale (Rechner, kleines Gebäude, Notstromversorgung, Satelliten-Kommunikationseinheit usw., zu insgesamt 200.000 - 500.000 DM) ergeben sich somit Kosten im Bereich 2 bis 2,5 Mio. DM; kann man an der Umfriedung ohne Kameras auskommen, sind es 1 bis 1,5 Mio. DM.

5.4 Flugplatz

Bewegungen von Flugzeugen mit Tragflächen und mit Drehflügeln (Hubschrauber) auf Flugplätzen können gut akustisch-seismisch erfaßt werden;¹⁰⁴ zur erhöhten Sicherheit und besseren Dokumentation kann zusätzlich optische Erfassung mit Fernsehkameras verwendet werden. Es ist auch möglich, Kurzstrecken-Radargeräte aufzustellen, aber diese scheinen nicht unbedingt erforderlich.

Besonders einfach gestaltet sich die Überwachung auf einem vollständig stillgelegten Flugplatz. Dann reicht prinzipiell ein Mikrofon oder eine Mikrofon-Anordnung, um Starts oder Landungen von Düsenflugzeugen oder Hubschraubern festzustellen - zur Redundanz würde man jedoch eher zwei aufstellen, dazu eventuell drei Geofone längs der Startbahn. Die Schall- und seismischen Signale dieser Quellen sind so stark und von natürlichem Geräusch so verschieden, daß damit schon eine zuverlässige Dokumentation illegalen Flugbetriebs erreichbar wäre. Ein solches Überwachungssystem würde (einschließlich kleiner Zentrale mit Satelliten-Kommunikation) 150.000 bis 200.000 DM kosten.

Soll jedoch der Flugplatz zivil weiterbetrieben werden, muß erheblich mehr Sensorik zur Erfassung und Klassifizierung aufgestellt werden. Flugzeuge mit Tragflächen sind zum Start und zur Landung auf Bahnen angewiesen, wo sie auf die Abhebegeschwindigkeit beschleunigen bzw. von der Landegeschwindigkeit abbremsen können. Aus Sicherheitsgründen ist in der Regel zu jeder Zeit nur ein Flugzeug auf der Bahn (Militärflugzeuge machen manchmal auch Doppelstarts). Die Start- und Landebahnen sind somit die Engstelle, auf die sich die Sensoren konzentrieren können. Wenn Notlandebahnen vorhanden sind oder Starts bzw. Landungen auf Zufahrtswegen befürchtet werden müssen, kann man hier ebenfalls Sensoren installieren (diese Bahnen und Wege können aber auch anders überwacht werden, s.u.).

104 Eine Literaturstudie ist: B. Rost, Automatic Sensor Networks for Verifying Disarmament of Aircraft, Verification - Research Reports, no. 2, Bochum: Brockmeyer, 1991; s. auch die dort angegebene Literatur. Für Fluglärm im allgemeinen s. z.B.: Nelson (Fn. 36). Für experimentelle Ergebnisse s.: J. Altmann et al., Seismic and Acoustic Signals from Landing and Taking-Off Military Jet Aircraft - Results of the 1991 Measurements at Bechyne, CSFR, Verification - Research Reports, no. 5, Bochum: Brockmeyer, in preparation.

Die Bewegung längs einer Bahn läßt sich mit einer Kette aus Geofonen und/oder Mikrofonen messen, die in Abständen von etwa 100 m aufgestellt sind.¹⁰⁵ Dabei kann man Starts und Landungen an den Verläufen der Geschwindigkeit unterscheiden. Die Signalformen lassen gewisse Rückschlüsse auf den Flugzeugtyp zu. Auch Sonderformen - niedriger Überflug, Aufsetzen und gleich wieder Starten, Verkehr von Schneeräumfahrzeugen - lassen sich an den Signalen und den Bewegungsverläufen erkennen. Die akustischen und/oder seismischen Sensoren haben den Vorteil, daß sie neben der Bahn aufgestellt werden können und nicht - wie etwa Induktionsschleifen - Eingriffe in die Bahnoberfläche erfordern. Prinzipiell könnte man auch Lichtschranken aufbauen, aber wegen des langen Lichtwegs (Bahnbreite ca. 60 m, dazu Sicherheitsabstände auf beiden Seiten) erreicht bei starkem Regen oder Nebel der Strahl eventuell nicht mehr zuverlässig den Detektor.

Kameras zur genauen Registrierung und Dokumentation sollten mindestens die äußere Form und Größe erfassen, nach Möglichkeit aber auch das (Buchstaben- oder Zahlen-) Kennzeichen des Flugzeugs auflösen. Prinzipiell könnte man Kameras an drei Positionen - abgesetzt neben der Startbahn - so aufstellen, daß sie die Bahn von der Seite beobachten. Da sie aber nachts Scheinwerferlicht brauchen, das die Piloten blenden könnte, wird man Kameras eher an den Zu- und Abfahrten zu den Start- und Landebahnen (sowie möglichen Aushilfsbahnen) installieren. Die Beleuchtung ist allerdings auch hier ein Problem (Vermeidung der Blendung der gegenüberstehenden Kamera, ohne hohe Masten zu verwenden). Wenn man nicht auf Kameras verzichten kann, sind eventuell Restlicht- oder Infrarot-Kameras mit schwacher Beleuchtung längs der Startbahn die bessere Lösung; allerdings ist hier die Auflösung der Flugzeugkennzeichen evtl. nicht mehr gewährleistet.

Zusätzlich zu den längs der Bahnen angeordneten Sensoren kann man - etwas abgesetzt - zwei oder mehr dreidimensionale Mikrofon-Anordnungen aufstellen. Jede solche Anordnung aus mindestens vier Mikrofonen kann die räumliche Richtung zu einer starken Schallquelle messen, so daß mit zwei an verschiedenen Stellen aufgestellten der jeweilige Ort in drei Dimensionen bestimmt werden kann. Über die Zeit wird also die Bahn der Quelle vollständig vermessen. Diese Anordnungen ergeben zunächst eine unabhängige redundante Bestimmung der Flugzeugbewegungen auf den Bahnen; die zusätzliche Höhenmessung ergibt weitere Informationen über Abheben bzw. Landen, die mit den Bahnsensor-Signalen auf Konsistenz geprüft werden können. Weiterhin sind mit ihrer Hilfe auch eventuelle Starts und Landungen auf Notbahnen und Rollwegen erfassbar.¹⁰⁶ Auch niedrige Überflüge quer zu den Bahnen lassen sich feststellen, und die Klassifizierung von lauten Störereignissen wie Donner wird erleichtert. Abb. 5.4 zeigt eine mögliche Sensorausstattung eines aktiven Flugplatzes.

Die Signalverarbeitung würde mittels der Geofonkette und der Mikrofon-Anordnungen Flugzeugbewegungen erkennen und als Starts oder Landungen einordnen. Anhand der Signalformen und ggf. Kamerabilder kann die Flugzeugart bestimmt werden und mit den Mustern der bekannten erlaubten Typen verglichen werden. Unbekannte Signale oder solche

105 Aus Sicherheitsgründen dürften die Mikrofone nicht höher als die Lampen am Bahnrand montiert werden; eventuell kann man sie mit letzteren integrieren. Geofone werden vergraben und sind somit problemlos.

106 Dabei müssen ggf. mehrere Quellen getrennt werden, wenn etwa während eines Starts auf der Hauptbahn andere Flugzeuge auf dem Rollweg unterwegs sind. Dabei kann die Position der Mikrofon-Anordnungen eine wichtige Rolle spielen. Für die optimalen Positionen und die Anzahl der Anordnungen ist noch angewandte Forschung nötig.

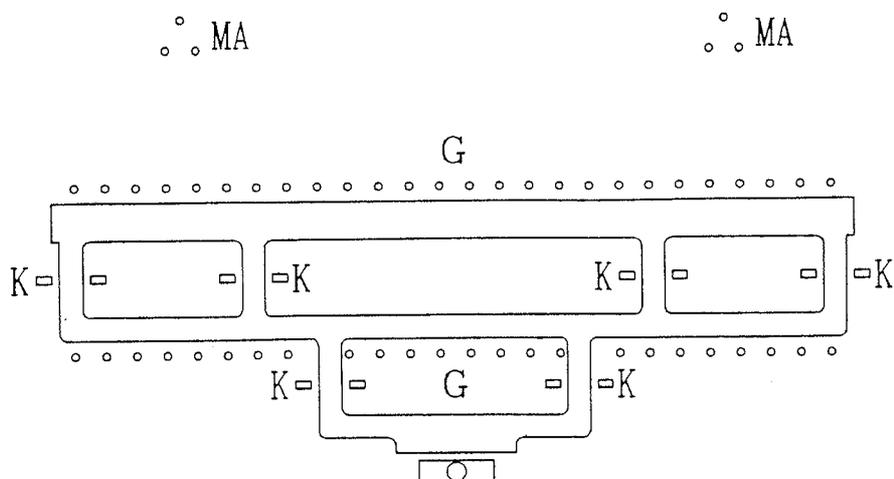


Abb. 5.4 Mögliche Sensorausstattung eines in Betrieb befindlichen Flugplatzes. Längs der normalen Start- und Landebahn sowie der prinzipiell für Starts und Landungen geeigneten Zufahrtswege sind Geofone (G) und/oder Mikrofone aufgebaut. An zwei Stellen befinden sich dreidimensionale Mikrofon-Anordnungen (MA), die eine Schallquelle orten und ihre Bahn vermessen können. Paare von Fernsehkameras (K) könnten sich an den Zufahrten zu den Start- und Landebahnen bzw. zu den Rollwegen befinden. Dort ist geeignete Beleuchtung vorzusehen: Besser wären Kameras auf beiden Seiten der Startbahn, aber die Beleuchtung könnte die Piloten blenden; andererseits könnten Restlichtkameras die Flugzeugkennzeichen evtl. nicht erfassen.

verbotener militärischer Flugzeuge würden gespeichert, und ein Alarm sowie die Daten würden an die Zentrale gesendet.

Für die Installierung eines solchen Überwachungssystems (einschließlich der örtlichen Zentrale mit Satelliten-Kommunikation) sind - je nach Flugplatzgröße - zwischen 0,6 und 1,5 Mio. DM anzusetzen; kann auf Kameras verzichtet werden, sind es etwa ein Viertel weniger.

Alle Flugzeugbewegungen auf dem Flugfeld lassen sich auch mittels kurzreichweitigen Radars erfassen und messen. Solche Systeme sind für zivile Flugplätze gerade in Entwicklung.¹⁰⁷ Millimeterwellenradars mit einem Winkelbereich von 30 oder 60° und ca. 3 km Reichweite werden an einigen Positionen des Platzes aufgestellt; erkannte Reflexe werden an einen zentralen Rechner übergeben, der daraus Bahnen ermittelt und ein Gesamtbild der bewegten Objekte auf dem Flugplatz erstellt. Ein solches System kann etwa 1 Million DM kosten. Die dreidimensionale Ortung und die Auflösung mehrerer Objekte können hier einfacher lösbar sein als bei passiven Sensoren. Allerdings ist die Erkennung von Flugzeugtypen wahrscheinlich schwieriger, so daß man dafür und zur Dokumentation wohl nicht ohne Kameras auskommen kann. Die Gesamtkosten für beide Varianten liegen im selben Bereich, so daß für eine Entscheidung genauere technische und Kostenanalysen, unter Ein-schluß von Testinstallationen, nötig sind.

Im Gegensatz zu Flugzeugen mit starren Flügeln können Hubschrauber überall auf- und absteigen, so daß sie keine Bahn benötigen und viele gleichzeitig starten oder landen können. Die zuverlässige Überwachung einer in Betrieb befindlichen Hubschrauber-Basis ist daher schwieriger und sollte gesondert untersucht werden.

107 Bei der Fa. DASA/TST, Ulm.

Für passiven Nachweis würde man zunächst zwei oder mehr dreidimensionale Mikrofon-Anordnungen aufstellen, die die ganze Fläche erfassen können. Dabei existiert allerdings das Problem der Trennung mehrerer gleichzeitig vorhandener Einzelschallquellen. Als Beitrag zur Lösung - sowie zur zusätzlichen Redundanz - kann man die befestigten Landeplätze mit zusätzlichen lokalen Mikrofonen/Geofonen versehen. Inwieweit hier auch Kameras aufgestellt werden sollten - eine Basis kann über 50 Hubschrauber-Stellplätze haben - ist v.a. unter Kostengesichtspunkten zu entscheiden. Sollten die Hubschrauber vom selben Typ sein wie die bisherigen militärischen (evtl. gar von militärischen konvertiert worden sein), kann akustisch-seismischer Nachweis die Unterscheidung nicht leisten, und Kameras sind nötig zur Feststellung, daß externe Waffenhalterungen nicht vorhanden sind o.ä.

Mittels einiger Millimeterwellen-Radars sollte die Bewegungsortung leichter möglich sein. Auch hier ist aber das Problem zu lösen, daß viele Hubschrauber gleichzeitig fliegen können. Die Typ-Unterscheidung kann schwieriger sein als bei passivem Nachweis, so daß Kameras noch nötiger sind.

Allerdings gibt es nur sehr wenige nicht-militärische Bereiche, wo Hubschrauber in Staffeln stationiert sind (z.B. innere Sicherheitskräfte), so daß man militärische Hubschrauber-Basen eher völlig stilllegen als zu zivilen konvertieren wird.

5.5 Hafen

Prinzipiell kann man die in einen Hafen ein- und auslaufenden Schiffe mit Sonar und Kameras erfassen und identifizieren; das ist aber außerhalb der gegenwärtigen Untersuchung. Was die Ladung angeht, ist die Sensor-Überwachung auf Land- und Luftfahrzeuge praktisch ausgeschlossen, da sich die Fahrzeuge ja unter Deck befinden können.

Die Transportwege an Land können jedoch überwacht werden; dabei bieten sich die Straßen- und Gleiseinfahrten in das Hafengelände an. Hier können die in 5.1 diskutierten Torkontrollen verwendet werden. Ist eine Hafenumfriedung vorhanden, sind die in 5.2 behandelten Kontrollsysteme einzusetzen. Sollte es keine Umfriedung geben, könnte man die in 5.6 zu diskutierenden Systeme für eine Linie im freien Gelände verwenden; das ginge allerdings nur dann, wenn in der Nähe kein weiterer Fahrzeugverkehr stattfände.

Als Hauptfrage stellt sich der Kosten- und Kontrollaufwand, wenn ein Land viele Häfen hat und bei diesen starker Warenverkehr stattfindet. Es müßten ja alle großen Fahrzeuge durch die Tore geschleust und automatisch erfaßt und kontrolliert werden. Um Umgehungsversuche zu erfassen, müßte man zusätzlich auch alle kleinen Häfen abdecken, die normalerweise keine großen Fahrzeuge verladen, in denen sie aber mittels provisorischer Auffahrten auf kleinere Schiffe fahren könnten. Für einen beispielhaften großen Hafen mit 20 Ein- und Ausfahrt-Fahrbahnen und 20 km Umfriedung würden Kosten in der Gegend von 10 Mio. DM anfallen, in einem Land mit fünf solchen Häfen und einigen hundert kleinen wären um 200 Mio. DM anzusetzen. Das ist schon in der Nähe der sonst in Gesamt-Europa für Sensor-Verifikation aufzuwendenden Kosten (s. Kap. 7), und auch die Stärke und Verschiedenartigkeit des Hafenverkehrs sprechen eher gegen den Versuch, hier eine automatische Überprüfung zu installieren. Die Kontrolle auf größere Waffen wird sich wohl auf die Orte beschränken, wo sie konzentriert vorkommen würden: die Produktionsstätten und Depots.

5.6 Kontroll-Linie im freien Gelände

Im Zusammenhang der Überprüfung von Konversionsvereinbarungen werden zu kontrollierende Linien in der Regel Grundstücksgrenzen sein, die umfriedet sind. In Ausnahmefällen

kann die Umfriedung aber fehlen. Der Vollständigkeit halber werden solche Kontroll-Linien im freien Gelände hier erwähnt.¹⁰⁸

An den die Linie kreuzenden Straßen bzw. Gleisen mit Schwerverkehr müssen Torkontrollen (s. 5.1) eingerichtet werden. Der Rest der Linie kann mittels Mikrofonen und/oder Geofonen überwacht werden, die etwa alle 100 m aufgestellt sind. Ein örtlicher Vorverarbeitungsrechner könnte für z.B. 20 Sensorpaare, also 2 km Linie aufgestellt werden. Mit anteiligen Kosten für eine regionale Zentrale für je 100 km würde 1 km Linie um 100.000 DM kosten (einschließlich Installation).

Mit dieser Ausstattung könnte zuverlässig überprüft werden, daß sich keine schweren Fahrzeuge der Kontroll-Linie nähern bzw. sie überqueren. Im Alarmfall wären allerdings nur die akustischen und seismischen Signale dokumentiert. Muß man mit illegalen Durchfahrten rechnen und will man sie dann auch als Bilder dokumentieren, ist für je 50 m eine Fernsehkamera mit Scheinwerfer vorzusehen. Mit dem erhöhten Verarbeitungs- und Übertragungsaufwand ergeben sich dann - einschließlich Installation - Kosten von 250.000 DM pro Kilometer Kontroll-Linie.

Der Vollständigkeit halber soll erwähnt werden, daß akustisch-seismische Kontroll-Linien auch geeignet sind, Flugzeuge (einschließlich Hubschrauber) zu erfassen, wenn sie nicht zu hoch fliegen. Sollte das beabsichtigt sein, sind zweckmäßigerweise in regelmäßigen Abständen (z.B. 2 km) dreidimensionale Mikrofon-Anordnungen zur Ortung und Bahnerfassung vorzusehen.

108 Deklarierte lange Linien im freien Gelände ohne Barriere sind dagegen üblich bei Reduzierungszonen von Abrüstungsverträgen und bei den Begrenzungen der Gebiete, die von friedenserhaltenden Truppen der UN kontrolliert werden.

6. Überwachung großer Gebiete

Während in Kapitel 5 Punkt- und Linien-Kontrollen diskutiert wurden, sollen jetzt Möglichkeiten untersucht werden, Vor-Ort-Sensoren für die volle flächenhafte Kontrolle größerer konvertierter Gebiete einzusetzen. In 6.1 geht es um Übungs- und Schießplätze sowie Schußwaffen-Testgelände, 6.2 behandelt Tieffluggebiete, und in 6.3 werden Testgebiet für Flugkörper und ballistische Raketen diskutiert.

Dabei gehe ich von dem Szenario aus, daß die Fläche vollständig umgewidmet wird. Die militärischen Aktivitäten werden gestoppt, vergleichbare zivile Aktivitäten finden entweder nicht statt oder sind einfach von den militärischen zu unterscheiden. Z.B. gibt es auf einem bisherigen Artillerie-Testgelände keine Explosionen mehr; in einem ehemaligen Tieffluggebiet fliegen in niedriger Höhe nur noch langsame Sportflugzeuge usw.

6.1 Übungsplatz, Schießplatz, Schußwaffen-Testgelände

Um zu überprüfen, daß ein konvertiertes Übungsgelände nicht mehr militärisch genutzt wird, könnte man prinzipiell die hinein- und herausfahrenden Fahrzeuge erfassen, wie in 5.1 - 5.3 beschrieben. Das würde jedoch die aufwendige Errichtung von Kontroll-Punkten und -Linien bedeuten. Außerdem könnte die zivile Nutzung ebenfalls mit schweren Fahrzeugen (evtl. auch mit Kettenantrieb, etwa bei Planiertrauben) erfolgen, so daß die Unterscheidungsprobleme wachsen würden. Daher ist es einfacher, als Kriterium nicht die Fahrzeuge zu nehmen, sondern das Schießen. Damit läßt sich dann auch ein reines Testgelände für Artillerie oder andere Schußwaffen einschließen.

Schüsse sind als kurze, laute Schallereignisse mit Mikrofonen oder Geofonen gut zu erfassen und zu erkennen. Als Richtwert für die Reichweite können bei Gewehr-schüssen einige hundert Meter, bei Artillerie viele Kilometer benutzt werden (bei letzterer erzeugen in der Regel der Überschallknall des Geschosses sowie die Aufschlag-Explosion in bis zu 30 km Abstand weitere Signale).¹⁰⁹ (Bei Übungsmunition sind je nach Art geringere Reichweiten anzusetzen.) Bei der Definition der Kriterien ist zu überlegen, ob Gewehr- oder Artillerie-feuer erfaßt werden soll; danach ergibt sich die Zahl der für flächenhafte Abdeckung notwendigen Sensoren. Im ersten Fall wären es ein bis einige Sensor/en pro km²; eventuell sind Ausnahmeregelungen für die Jagd nötig. Wegen des höheren Aufwands, weil Gewehre als kleine Waffen nicht so bald in Abrüstungs- und Konversionsvereinbarungen eingehen dürften und weil es viele Standortübungsplätze gibt, wo auf kleinem Raum mit Gewehrfeuer geübt wird, wird man jedoch die Option der Überwachung auf Gewehr-schüsse eher nicht wählen.

Soll nur Artillerie nachgewiesen werden, kann man mit einem Sensor pro ca. 100 km² auskommen, was den Aufwand erheblich vermindert. Das heißt, der gegenseitige Abstand ist ca. 10 km, und kein Ort ist weiter als etwa 5 km von den je nächsten Sensoren entfernt, so daß jeder Knall von mehreren Stationen aufgenommen wird. Für typische Truppenübungsplätze in Deutschland (Wildflecken: 75 km², Baumholder: 113 km², Bergen: 285 km², insgesamt gibt es 19 Plätze mit zusammen 1.500 km²)¹¹⁰ wären also je ein bis drei Sensorstandorte (für Redundanz: mindestens zwei) anzusetzen, während in großflächigen Ländern (z.B. White Sands Missile Range in den USA: etwa 10.000 km²) dutzende bis

109 Bei Raketen-Artillerie ist der Abschluß evtl. weniger weit nachweisbar, was durch die längere Dauer des Brenngeräuschs und den dabei zurückgelegten Flugweg z.T. kompensiert werden kann.

110 A. Mechtersheimer, P. Barth (Hg.), Militarisierungsatlas der Bundesrepublik - Streitkräfte, Waffen und Standorte, 3. Aufl., Darmstadt: Luchterhand, 1988, S. 169.

hunderte Sensororte nötig wären, wollte man die volle Fläche abdecken. Bei der konkreten Festlegung der Standorte gehen verschiedene Gesichtspunkte ein: Die Orte sollten auf Anhöhen liegen; bei möglichen Abschattungen in tieferen Tälern ist zu überlegen, ob zusätzliche Sensoren aufgestellt werden sollen oder ob die theoretisch mögliche Umgehung zu wenig relevant wäre. Die Sensordichte wird in der Regel nicht für jede meteorologische Sondersituation mit schlechter Schallausbreitung am Boden ausgelegt werden müssen, da der jeweilige Staat für eine Umgehung immer erst auf diese seltenen Fälle warten müßte.

Auch Armeen verwenden akustische Systeme zur Artillerie-Ortung, die Bundeswehr z.B. das System Schallmeßanlage 085, das auf mehreren Lkw montiert ist.¹¹¹ Die hier vorhandenen Kenntnisse und Rechner-Algorithmen können in die Sensor-Verifikation einfließen, die Systeme selbst sind aber nicht für den großflächigen langdauernden Einsatz optimiert. Die Forderungen nach Mobilität und Einsatz im Krieg erhöhen Anforderungen und Kosten, und die Systeme sind auf die Bedienung und laufende Wartung durch Personal ausgelegt. Für kooperative automatische Überprüfung wird man daher eher neue spezifische akustisch-seismische Systeme entwickeln, als fertige militärische zu kaufen.

Bei den für Artillerie-Nachweis hinreichenden Sensorabständen der Größenordnung 10 km sind für jeden Ort eigene Systeme für Verarbeitung, Speicherung und Kommunikation erforderlich. Bei der Höhe der dadurch entstehenden Kosten bietet es sich dann an, an jeder Stelle nicht nur ein Mikrofon/Geofon vorzusehen, sondern gleich eine drei- bzw. zweidimensionale Anordnung aus mindestens vier Mikrofonen und/oder mindestens drei Geofonen aufzustellen. Das würde erstens durch Redundanz eine sicherere Funktion gewährleisten, aber vor allem erlauben, schon lokal die Richtung von Knallsignalen zu orten. In der Regel würde jedes Ereignis von mehreren benachbarten Orten erfaßt; zur genauen Ortsfeststellung stehen dann nicht nur die Schalllaufzeiten, sondern zusätzlich die jeweiligen Richtungen zur Verfügung. (Verwendet man beide, akustische und seismische Sensoren, gibt es weitere Informationen durch die mit höherer Geschwindigkeit laufenden direkten seismischen Wellen.)¹¹²

Weil hier im Normalfall das Nullsignal auftritt, keine Bilder aufgenommen werden und jedes mögliche Ereignis mit nur wenigen Daten dargestellt werden kann, wird die je örtliche Verarbeitungs-, Speicher- und Kommunikationseinheit einfacher ausfallen, und der Strombedarf kann autonom durch eine kleine Solaranlage gedeckt werden.

Aus Kostengründen wird man nur einen Sensor-Standort mit Fernverbindung (und evtl. etwas mehr Rechen- und Speicherkapazität) ausstatten und die anderen Sensororte mit Richtfunk ankoppeln. Die Antenne von ca. 0,6 m Durchmesser kann mit den Mikrofonen und Solarzellen auf demselben Mast montiert werden; der Leistungsverbrauch kann mit 50 W gering ausfallen. Bei einer theoretisch möglichen Datenrate von 2 Megabit/Sekunde kostet eine solche Verbindung ca. 50.000 DM.

Die Kosten für einen Sensorort betragen etwa 80.000 DM, für einen mitteleuropäischen Übungs- und Schießplatz sind 150.000 - 300.000 DM anzusetzen. Für einen großen Platz (10.000 km² Fläche) sind knapp 10 Mio. DM nötig.

111 S. z.B.: W. Müller (Fn. 69).

112 A. Güdesen, G. Becker, J. Klemp, Luft- und Bodenschallsensoren in der Wehrtechnik, in: Jahrbuch der Wehrtechnik, Folge 19, Koblenz: Bernard & Graefe, 1990; J. M. Sabatier, R. Raspet, Investigation of possibility of damage from the acoustically coupled seismic waveform from blast and artillery, J. Acoustical Society of America, vol. 84, no. 4, pp. 1478-1482, Oct. 1988.

Statt der akustisch/seismischen Sensoren kann man auch Radargeräte verwenden, die die Granaten im Flug erfassen. Bei vielen Armeen gibt es Radars für Mörser und andere Artillerie mit Reichweiten von 10 bis 30 km.¹¹³ Radar bietet den Vorteil, daß schon eine Station (fast) die gesamte Bahn einer Granate in drei Dimensionen bestimmen kann. Eine Mehrfachüberdeckung ist nicht erforderlich. Kann ein Radar gut 30 km Radius, also ca. 3.500 km² überwachen, können die Stationen demnach mit 60 km Abstand postiert werden. Folglich ist ein Standort für einen mitteleuropäischen Übungs- und Schießplatz mehr als ausreichend.

Für den Überprüfungszweck haben herkömmliche Radars aber verschiedene Nachteile: Sie müssen durch Personen bedient werden, und der Energieverbrauch und die Kosten sind hoch. Insbesondere die militärischen Artillerie-Ortungsrads sind, da für den Einsatz im Krieg ausgelegt, für die langandauernde Überwachung nicht optimal. Daher gibt es ein Motiv, auf die passiven Sensoren zurückzugreifen. Es wäre aber auch denkbar, für die Dauer-Überwachung vollautomatische Radarstationen zu entwickeln. Setzt man für eine Station Kosten von 2 Mio. DM an, ist dies der für einen kleinen Platz nötige Betrag.¹¹⁴ Hier wäre also akustische Überwachung mit 0,15 - 0,3 Mio. DM erheblich billiger. Bei größeren Flächen kann eine solche Radar-Überwachung jedoch günstiger werden: Für 10.000 km² Fläche (drei Radars) können 6 Mio. DM reichen, während für akustische Überwachung etwa 10 Mio. nötig sind. Für Radars wären an jedem der wenigen Standorte einige Kilowatt Leistung aufzubringen, was hunderte von Quadratmetern Solarzelle erfordern würde, wenn kein Netzanschluß zur Verfügung steht.

Die Abwägung zwischen passivem (akustisch-seismischem) und aktivem (Radar-)Nachweis muß viele Faktoren berücksichtigen: die Größe der zu überwachenden Fläche, die Kosten der Radarstationen, die Energieversorgung, die automatische Auswertung usw. Hier sind noch genauere Untersuchungen nötig.

6.2 Tieffluggebiet

Daß in einem ehemaligen hierfür vorgesehenen Gebiet keine Tiefflüge mehr stattfinden, kann mittels Radars oder mit akustischen/seismischen Sensoren überprüft werden. Die Reichweite eines Radars für Tiefflieger ist vor allem durch seinen Horizont und ggf. zusätzlich durch die Topographie (Abschattung durch Erhebungen und Täler) begrenzt; typisch sind 10 bis 30 km.¹¹⁵ Das von der Bundeswehr gelegentlich zur Feststellung von Verstößen gegen Tiefflug-Beschränkungen eingesetzte Skyguard-Radar erreicht z.B. 20 km.¹¹⁶ Die bis Mitte der achtziger Jahre deklarierten Tiefstfluggebiete (bis herunter zu 75

113 S. Fn. 69.

114 Die Stationskosten von 2 Mio. DM ergeben sich aus einer vorsichtigen Schätzung unter Berücksichtigung folgender Informationen: Ein Flughafen-Anflugradar mit 10-20 km Reichweite kostet einige Mio. DM, ein ziviles Luftraum-Überwachungsradar mit 300-400 km kostet 10 Mio. DM. Ein Artillerie-Feuerleitradar liegt bei 3 Mio. DM, das militärische Tieffliegerüberwachungsradar Skyguard bei 10 Mio. DM. Für die Routine-Überwachung von Schießplätzen und Testgeländen, auf denen im Normalfall keine Ereignisse stattfinden, sollte ein Radar mit mechanisch dreh- oder schwenkbarer Antenne ausreichen. Schnelle flexible Strahlschwenkung durch phasengesteuerte Antennen, elektronische Gegen-Gegenmaßnahmen, Mobilität, die Fähigkeit zur Verarbeitung vieler Bahnen und andere kostentreibende Merkmale sind im hier betrachteten Zusammenhang nicht nötig. Inwieweit Serienproduktion die Kosten weiter senken kann, läßt sich gegenwärtig kaum abschätzen.

115 S. auch: G. Palm, Entwicklungstendenzen bei Tieffliegerüberwachungsradar, Wehrtechnik, Nr. 7, S. 74-77, Juli 1979. Durch die Horizont-Begrenzung ist die Reichweite auch bei Flugzeugen mit verringertem Radarquerschnitt nicht wesentlich niedriger.

116 Das Skyguard-System wird normalerweise für die Luftabwehr-Feuerleitung benutzt. Die mittlere Leistung des Suchradars ist 200 W. Ein Videosystem ist integriert. Die Kosten sind ca. 10 Mio. DM. S.:

m Flughöhe) in der Bundesrepublik waren einige 1000 km² groß.¹¹⁷ In großflächigen Ländern sind sie bis zu hundertfach größer (z.B. Goose Bay in Kanada). Aber auch in Mitteleuropa kann prinzipiell der größte Teil des Territoriums für Tiefflüge (evtl. bis zur Höhe 300 m) genutzt werden. Setzt man gut 30 km Reichweite an, kann ein Radar etwa 3.500 km² überdecken.¹¹⁸ Für die Abdeckung einer kleinen Tiefflugzone sind also ein bis zwei, eines großen Gebiets bzw. Landes viele hundert Systeme anzusetzen. Die Radars sind auf Anhöhen zu installieren; für lange Täler sind ggf. zusätzliche Stationen vorzusehen. Die vollständige dreidimensionale Information über die Flugbahn wird schon von einer Station geliefert, daher ist Mehrfacherfassung nicht nötig und ein Stationsabstand von 60 km reicht aus. Bei einem Strahlöffnungswinkel von z.B. 1° hat die Höheninformation eine Ungenauigkeit von 350 m bei 20 km Abstand. Verfahren für den vollautomatischen Betrieb der Radarstationen, einschließlich der Bahnbestimmung, müssen ggf. noch entwickelt werden.

Bei Stationskosten um (grob geschätzt) zwei Millionen DM bilden die Kosten für Verarbeitung, Speicherung und Übertragung den kleineren Teil.¹¹⁹ Wären nur wenige kleine abgegrenzte Tieffluggebiete zu überwachen, wären die Kosten von jeweils einigen Mio. DM möglicherweise tragbar. Die für große Gebiete bzw. Länder nötigen hunderte von Millionen lassen hier die flächenhafte Radar-Überwachung aber als zu aufwendig erscheinen.

Tief fliegende Flugzeuge können auch mit akustischen/seismischen Sensoren passiv erfaßt werden; dabei bildet der starke Lärm eine gute Erkennungsmöglichkeit. Als Reichweite sind einige km anzusetzen; mit gut 3 km wird die je überwachte Fläche etwa 35 km² (d.h., die Dichte der Stationen ist hundertfach höher als bei Radar). In hügeligem Gelände sind für lange Täler evtl. zusätzliche Stationen nötig. Mehr-Sensor-Anordnungen können die Richtung zum Flugzeug und ihren zeitlichen Verlauf liefern. Die genaue Bahnfeststellung erfordert, daß das Flugzeug von mehreren Stationen (gleichzeitig oder evtl. kurz hintereinander) erfaßt wird. Wegen der Bewegung ist eine gleichzeitige Mehrfacherfassung jedoch nicht nötig, ein Sensorabstand von 6 km reicht aus. Wegen des kürzeren Abstands zum Objekt kann die Höhe in vielen Fällen genauer bestimmt werden. Eine Winkelungenauigkeit von 1° bedeutet z.B. 35 m Höhenunsicherheit in 2 km Entfernung. Wie in 6.1 ist auch hier Autonomie der Stationen möglich und sinnvoll. Mit Kosten von 80.000 DM pro Station ergeben sich für ein kleines Tieffluggebiet insgesamt über 10 Mio. DM, ein großes ist mit 0,5 bis 1 Mrd. DM anzusetzen. Das liegt noch über den für Radar abgeschätzten Kosten, so daß akustische Flächenüberwachung auf Tiefflieger höchstens für kleine Gebiete in Frage kommt.

6.3 Testgebiet für Flugkörper und ballistische Raketen

Flugkörper und ballistische Raketen mit mittleren bis langen Reichweiten werden in Testgebieten erprobt, die entsprechend groß sein müssen (Ausdehnung in einer Richtung 100 - 500

Jane's Weapons Systems 1985-86, pp. 278 f., London: Jane's, 1985; A. Polaschek, Beruhigungsspielle in oliv, Frankfurter Rundschau, 23. Juni 1988; A. Polaschek, Mit Radarfalle für Tiefflieger sollen künftig Verstöße von Luftwaffenpiloten festgehalten werden, Frankfurter Rundschau, 22. März 1990.

117 Mechtersheimer/Barth (Fn. 110), S. 196-201.

118 Verbleibende "Zwickel" zwischen den etwa kreisförmigen Überwachungsflächen wären nicht so problematisch, da die Flugzeuge erhebliche Strecken zurücklegen müßten, um auf die Tiefflughöhe zu sinken bzw. von ihr wieder auf die Mindesthöhe zu steigen.

Ein bestehendes Luftüberwachungssystem kann nicht einfach mitbenutzt werden, da für diese Radars - bei Reichweiten von 200 bis 400 km - Tiefflieger oft unter dem Horizont liegen.

119 S. Fn. 114.

km).¹²⁰ Daher gibt es sie nur in großflächigen Ländern. In der Regel werden die Gebiete auch für andere militärische Zwecke genutzt (Manöver, Flugzeugerprobung, Artillerieschießen usw.).

Flugkörper unterscheiden sich von Flugzeugen vor allem durch ihre geringere Größe und geringere Schallerzeugung. Die Einhaltung eines Verbots von Flugzeug-stationierten Flugkörpern kurzer und mittlerer Reichweite kann man durch die Überwachung der Trägerflugzeuge feststellen, wobei die in 6.2 angegebenen Sensor-Ausstattungen verwendet werden könnten. Will man jedoch zuverlässig überprüfen, daß auf einem bisherigen Testgelände keinerlei Flugkörper-Aktivität mehr stattfindet, also auch keine Langstrecken-Flugkörper von außen einfliegen oder keine bodengestützten gestartet werden, muß die Überwachung verschärft werden.

Aktiver Nachweis und Bahnortung von Flugkörpern wie auch von ballistischen Raketen sind mit Radar möglich. Die physikalisch mögliche Reichweite des Radars für Flugkörper von einigen Meter Größe (die z.B. für ballistische Raketen im Flug durch die hohe Atmosphäre/durch den Weltraum erreicht wird) wird bei tieffliegenden Flugkörpern - genau wie bei Flugzeugen, s. 6.2 - durch den Horizont (und die Topographie) auf 10 - 30 km begrenzt. Mit 30 km Reichweite und ohne Mehrfachüberdeckung sind für ein Testgelände von 10.000 km² Fläche 3 Stationen nötig. Bei Stationskosten von 2 Mio. DM fallen für ein Testgelände insgesamt also einige Millionen DM an.¹²¹

Für den passiven (akustisch/seismischen) Nachweis muß man zwischen ballistischen Raketen und Flugkörpern unterscheiden: Die Brenngase ballistischer Raketen erzeugen in der Startphase (etwa eine Minute lang) lauten Schall, der einige Kilometer weit nachweisbar sein sollte. In großer Höhe entsteht überhaupt kein Schall. Der beim Wiedereintritt im Zielgebiet (etwa eine halbe Minute) lang entstehende Überschall-Lärm sollte ebenfalls noch in einigen Kilometern erfaßt werden können, ähnliches gilt für die Explosion einer mitgeführten Ladung. Nimmt man einen Sensorabstand von 5 km an, mit dem jedes Ereignis von mehreren Stationen erfaßt wird, braucht man also vier Stationen für je 100 km². Die Überwachung eines großen Testgeländes auf ballistische Raketen erfordert also viele hundert akustisch-seismische Sensorstationen mit Gesamtkosten von mehreren 10 Mio. DM.

Auf der anderen Seite sind Marschflugkörper mit Unterschallgeschwindigkeit sehr leise, die Entdeckungsreichweite kann wenige hundert m betragen.¹²² Für tieffliegende Marschflugkörper ist also ein sehr dichtes Netz von z.B. einer Station auf je 500 m nötig. Für hochfliegende Marschflugkörper (typische Reisehöhen vor Erreichen des feindlichen Territoriums zur Treibstoffersparnis und Reichweitenverlängerung sind einige km) kann akustische Erfassung u.U. gar nicht mehr garantiert werden. Allerdings wird der Hauptteil der Fluger-

120 Flugkörper werden durch Düsen - mit oder ohne Ansaugen von Luft - angetrieben. Sie bewegen sich durch die Luft und nutzen deren Auftrieb (z.B. Boden-Luft-, Luft-Luft- oder Luft-Boden-Raketen, Marschflugkörper). Ballistische Raketen führen den Sauerstoff zur Verbrennung im Treibstoff mit. Sie fliegen teilweise außerhalb der (dichten) Atmosphäre auf einer durch die Schwerkraft bedingten elliptischen Kurve.

121 S. Fn. 114.

122 Daten zur Schallemission von Flugkörpern sind nicht leicht zugänglich. Eine Abschätzung könnte von dem typischen Schub der Turbinen von Kampfflugzeugen ausgehen, der um 100 Kilonewton liegt (F-16: 129 kN, F-117A: 2*48 kN, F-22: 2*155 kN, Mantelstromtriebwerke z.T. mit Nachbrenner, s. M. Lambert (ed.), Jane's All the World's Aircraft 1991-92, London: Jane's, 1991). Ein Langstrecken-Marschflugkörper mit Mantelstromtriebwerk liegt dagegen bei 2,7 Kilonewton, s.: K. Tsipis, Cruise Missiles, Scientific American, vol. 236, no. 2, pp. 20-29, Febr. 1977; Marschflugkörper fliegen meist unterhalb der Schallgeschwindigkeit. Kurzstrecken-Flugkörper werden in der Regel mit Einkreis- oder Raketentriebwerken angetrieben und sind lauter.

probung dem Tief- und Zielanflug gelten. Mit obiger Stationsdichte von 400 Stationen auf 100 km² wären für ein Testgelände von 10.000 km² einige Mrd. DM zu rechnen. Selbst wenn man noch Kosteneinsparungen durch einfachere Ausführung und Serienproduktion annehmen würde, sind die Kosten für akustische Überwachung weitaus zu hoch. Daher ist hier dem Radar eindeutig der Vorzug zu geben.

7. Ausblick, Empfehlungen

Diese Studie hat gezeigt, daß vor Ort stationierte automatische Sensorsysteme prinzipiell geeignet sind zu überprüfen, ob Konversionsvereinbarungen in Bezug auf Land- und Luftfahrzeuge sowie Schieß-, Tiefflug- und Testgelände eingehalten werden. Die benötigten Sensorarten stehen zur Verfügung. Die Überprüfungssysteme können so ausgelegt werden, daß sie mit hoher Zuverlässigkeit funktionieren, Objekte und Ereignisse klassifizieren, dokumentieren und ggf. melden sowie gegen Umgehungsversuche geschützt sind.

Die konvertierten Einrichtungen werden durch die Überprüfung nur gering oder gar nicht belastet. Bei einem umfriedeten Gelände stehen die Geräte nur an der Außengrenze, Fahrzeuge müssen je nach Größe bestimmte Ausfahrten benutzen. Auf einem Flugplatz können - nach einer kurzen Installationsphase - Flugzeuge starten und landen wie vorher. Was die Energieversorgung betrifft, so ist sie in einer Reihe von Fällen autonom (etwa durch Solarzellen) möglich.

Bei großflächiger Überwachung können die Kosten erheblich werden. Hier sind intensive Optimierungsüberlegungen nötig, damit man zwischen passivem (akustisch-seismischem) und aktivem (Radar-)Nachweis entscheiden kann. Bei sehr großen Flächen können die Kosten sogar so weit steigen, daß die Überwachung zu aufwendig würde.

Anders ist es bei der Überwachung kleiner Bereiche. Auch hier sind die erforderlichen Kosten nicht vernachlässigbar, liegen jedoch pro Installation in der Größenordnung eines einzelnen überwachten Fahrzeugs (Fabrik-Überwachung: 1 - 2,5 Mio. DM gegenüber Lkw: 0,5 - 1 Mio. DM, Panzer: 2 - 4 Mio. DM), bei Flugzeugen ist das Verhältnis noch zehnfach günstiger (Flugplatz-Überwachung: um 1 Mio. DM gegenüber Kampfflugzeug: 20 - 40 Mio. DM). Auch bei der vorsichtigen Abschätzung der Summe über ein Land bzw. einen multinationalen Reduzierungsraum zeigt sich ein ähnliches Bild. Dazu könnte man z.B. vom KSE-Vertrag ausgehen; danach dürfen die beiden Staatengruppen je maximal 3.500 Kampfpanzer, 2.700 gepanzerte Kampffahrzeuge und 3.000 Artilleriewaffen in gesicherten Lagerstätten haben. Nimmt man an, die Depots enthielten im Mittel je 200 dieser insgesamt 18.400 vertraglich begrenzten Waffen, wären also 92 Lager zu überwachen. Die Installationskosten für 100 Depots belaufen sich auf 100 - 150 Mio. DM.¹²³ Die jährlichen Abschreibungs- und Betriebskosten kann man großzügig mit 10% der Installationskosten ansetzen, während einer z.B. fünfjährigen Bauzeit wären 20% pro Jahr aufzubringen. Das ergäbe eine jährliche Belastung in Gesamt-Europa von 20 - 30 Mio. DM, nach fünf Jahren 10 - 15 Mio. DM.

Die Kosten für zusätzlich vereinbarte Konversionsverpflichtungen hängen natürlich vom angenommenen Umfang ab. Im gesamten KSZE-Gebiet (einschließlich Kanada, USA, Gebiete jenseits des Urals) könnten z.B. der Überwachung unterliegen: 30 ehemalige Fabriken für gepanzerte Fahrzeuge, 300 stillgelegte und 100 zivil weiterbetriebene ehemalige Militärflugplätze, 100.000 km² an Übungsplätzen, Tieffluggebieten und Testgeländen.¹²⁴

123 Dabei ist zugrundegelegt, daß Nebenausfahrten unnötig sind und ein Depot im Mittel 0,5 * 0,5 km² mißt, s. 5.3.

124 Diese Zahlen sind eine willkürliche Schätzung auf der Basis folgender partieller Information: Jane's nennt in allen KSZE-Ländern insgesamt etwa 50 Hersteller(werke) für Panzer und gepanzerte Fahrzeuge: C. F. Foss (ed.), Jane's Armour and Artillery 1987-88, London: Jane's, 1987. In der alten Bundesrepublik gab es 40 aktive und 28 passive bzw. Hubschrauber-Militärflugplätze; die Gesamtfläche der Truppenübungsplätze war 1.500 km², der Tiefstfluggebiete etwa 20.000 km²; Mechttersheimer, Barth (Fn. 110), S. 169-171, 200. Genauere Abschätzungen könnten die entsprechenden Gesamtzahlen für die KSZE-Staaten zugrundelegen und von politisch gewünschten Anteilen zu konvertierender Einrichtungen

Die Installationskosten dafür wären in der Gegend von 400 Mio. DM, die jährlichen Kosten 80 bzw. 40 Mio. DM nach fünf Jahren.

Sinnvollerweise würde die Sensorverifikation von Konversionsvereinbarungen mit der anderen Abrüstungsverpflichtungen an noch aktiven Fabriken für Militärgerät, militärischen Depots, Flugplätzen usw. integriert.

Es zeichnet sich ab, daß mit Installationskosten im Bereich von unter einer bis zu wenigen Milliarden zuverlässig überprüft werden kann, daß Rüstung im Wert von Hunderten von Milliarden nicht vorhanden ist bzw. nicht produziert wird. Die Kosten für die Sensorsysteme liegen somit weit unter den durch sie ermöglichten Einsparungen bei den Rüstungsausgaben.

Den Personalaufwand abzuschätzen, ist schwieriger. In den bisher schon existierenden nationalen Verifikationseinheiten der KSZE-Staaten sind europaweit einige tausend Personen beschäftigt,¹²⁵ deren Anzahl mit der Implementierung des Offene-Himmel-Vertrags¹²⁶ und der Chemiewaffen-Konvention sicher noch steigen wird.¹²⁷ Durch die nationale Verantwortlichkeit (außer bei der Chemiewaffen-Konvention) wird hier manches mehrfach gemacht. Sensor-Verifikation wird jedoch sinnvoll nur von einem internationalen Inspektorat durchgeführt, wie es bei der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) in Wien existiert oder jetzt für die Chemiewaffen-Konvention in Den Haag aufgebaut wird. Dort sind zwischen 250 und 400 Personen vorgesehen.¹²⁸ Die IAEO hat etwa 200 Inspektor(inn)en und überwacht weltweit ca. 1.000 Installationen.¹²⁹

Das für Sensorverifikation nötige Personal hängt ab von der Anzahl von Routine-Besuchen (für Wartung und Erneuerung von örtlichen Überwachungs- und Kommunikationssystemen), von Inspektionen für unvorhergesehene Reparaturen, von Verdachtsinspektionen aufgrund von Alarmen. Für eine vorsichtige Abschätzung kann man fragen, wieviel Personal für 100 überwachte Installationen (einschließlich regionaler Datenverarbeitungszentren) erforderlich ist. Setzt man an, daß jede Einrichtung routinemäßig alle zwei Jahre von einem Vier-Personen-Team (einschl. je eines/r Fahrers/in und Helfers/in) besucht wird, daß jedes Team im Mittel einen Ort pro Woche besucht und 40 Arbeitswochen im Jahr zur Verfügung stehen, sind dafür rechnerisch 5 Personen nötig.

Bezüglich der Alarminspektionen kann man postulieren, daß diese im Mittel für jede Einrichtung einmal pro Jahr stattfinden (erheblich höhere Raten würden wohl nicht toleriert und würden das Konzept der automatischen Überprüfung in Frage stellen). Geht man hier von sechs Personen im Team aus, die jeweils zwei Wochen bleiben, um dem Fall auf den

bzw. Flächen ausgehen. Da aber diese Anteile von den zu erwartenden Kosten abhängen und eine Vielzahl weiterer ökonomischer und politischer Argumente in die Festlegung der zu überwachenden Konversionsobjekte eingehen wird, sind echte Kostenschätzungen erst im Verlauf des entsprechenden politischen Prozesses möglich.

125 Z.B. wurden für das deutsche Zentrum für Verifikationsaufgaben der Bundeswehr in Geilenkirchen 400 Personen vorgesehen; die entsprechenden Organisationen in Frankreich, Großbritannien und Italien sollten 150, 125 bzw. 140 Personen umfassen, s.: E. Dees, Organization and Cost of Conventional Arms Control Verification in Europe, in: Altmann, van der Graaf, Lewis, Markl (Fn. 18).

126 Treaty on Open Skies, 19 March 1992.

127 Da die Inspektionen der Chemiewaffen-Konvention durch die internationale Organisation durchgeführt werden, wird zusätzliches nationales Personal hier nur für die Begleitteams gebraucht.

128 Gee (Fn. 30).

129 Against the Spread of Nuclear Weapons: IAEA Safeguards in the 1990s, Vienna: IAEA, 1993, p. 22; Annual Report for 1992, Vienna: IAEA, 1993, p. 149.

Grund zu gehen, braucht man 30 Personen. Insgesamt ergibt sich also für je hundert überwachte Einrichtungen ein Bedarf von 35 Personen.

Dazu kommt das Personal, das in der Verifikationszentrale im Dauerbetrieb die Rechner, Kommunikations- und Dokumentationseinrichtungen betreibt, sowie diejenigen, die unklare Ereignisse analysieren, ggf. Programme modifizieren usw. (ein Teil dieser Aufgaben wird aber auch als Auftrag an Firmen vergeben werden). Für beides kann man 30 bis 50 Personen ansetzen. Dazu kommt Leitungs- und Verwaltungspersonal.

Geht man von 1000 überwachten Einrichtungen aus, sind also etwa 500 Personen nötig. Diese grobe Abschätzung zeigt, daß internationale Sensorverifikation von Abrüstungs- und Konversionsverpflichtungen in den KSZE-Ländern nicht mehr Personal braucht, als heute in den größeren Staaten einzeln für die nationale Verifikation zur Verfügung steht. Dabei würde nicht wie bei der bisherigen Inspektionsregelung des KSE-Vertrags stichprobenartig und kurzzeitig, sondern überall und rund um die Uhr kontrolliert.

Ob die Investitions- und Betriebskosten sowie der Personalaufwand gerechtfertigt sind, ist eine politische Frage und muß auf dieser Ebene entschieden werden.

Die Aussagen dieser Studie basieren auf Überlegungen und Abschätzungen. Eine politische Entscheidung über die Einführung von Verifikation mit Vor-Ort-Sensoren (und von Konversionsverpflichtungen überhaupt) in Abrüstungsverhandlungen braucht jedoch verlässliche Informationen über die realen Eigenschaften solcher Systeme:

- die Zuverlässigkeit im Dauerbetrieb;
- die Zuverlässigkeit bei der Entdeckung von Umgehungsversuchen;
- die Rate falscher Alarme;
- die Belastung überprüfter Einrichtungen;
- die Kosten;
- den Personalbedarf.

Diese Informationen können durch Probe-Installationen gewonnen werden. Dazu sollten die Staaten - einzeln oder gleich international - Entwicklungsaufträge für Systeme vergeben, diese dann an aktiven und stillgelegten Einrichtungen aufbauen und Erfahrungen - auch über die "Alltags-Tücken" - sammeln. Dabei sollten auch gezielt Versuche unternommen werden, die Sensoren zu täuschen und falsche Informationen in die Kommunikationskanäle einzukoppeln. Aufgrund dieser Erfahrungen können erstens die Sensorkombinationen und die Aufstellungsarten verbessert sowie zweitens die verwendeten Auswerte- und Übertragungsprogramme optimiert werden.

Die Abschätzungen dieser Studie zeigen, daß die für ein solches Entwicklungs- und Erprobungsprogramm nötigen Ausgaben gerechtfertigt sind. Das gilt umsomehr, als mit denselben Systemen auch andere Abrüstungsverpflichtungen - die noch aktive militärische Einrichtungen betreffen - überprüft werden können. Mit einem Entwicklungsprogramm von z.B. 10 Mio. DM pro Jahr könnte die Bundesrepublik in wenigen Jahren einen großen Erfahrungs- und Informationsvorrat aufbauen. Würde man andere (nicht nur NATO-)Länder von vornherein einbeziehen, wäre wahrscheinlich weniger Verhandlungszeit bis zur Einigung über solche Verifikationsverfahren nötig.

Diese Studie mußte sich auf Land- und Luftfahrzeuge sowie Übungs- und Testgelände beschränken. Weitere Arbeiten sollten sich den hier nicht behandelten Bereichen Nuklearwaffen und -materialien, Chemiewaffen, Biologische Waffen zuwenden.

Auch im hier behandelten Bereich konnten nur die prinzipiellen Möglichkeiten aufgezeigt werden. Konkrete Gestaltungsfragen blieben offen, wie z.B. die Auslegung des lokalen Datenspeichers, die beste Position von Kameras auf Flugplätzen, die Auswahl zwischen akustisch-seismischer und Radar-Überwachung - dies muß den Entwicklungsprogrammen überlassen bleiben.

Grundlegendere Fragen sollten in weiteren Untersuchungen bearbeitet werden und vor allem die Überwachung von Hubschrauber-Basen sowie die Kontrolle von Schiffen betreffen. In einigen Bereichen ist angewandte Forschung (weiterhin) nötig, vor allem bei Fragen der Signalverarbeitung und Mustererkennung. Schließlich sollten Text-Entwürfe für vertragliche Konversionsvereinbarungen und für die zugehörigen Sensor-Verifikations-Protokolle erstellt werden.

Literaturhinweise

Bibliographien über Verifikation:

D. Scrivener, M. Sheehan, *Bibliography of Arms Control Verification*, Aldershot: Dartmouth, 1990.

Canada, *Bibliography on Arms Control Verification: 1962-1991*, Ottawa: External Affairs and International Trade Canada, 1991 (plus Update, 1992, Second Update, 1993)

Konversion:

U. Albrecht, *Rüstungskonversionsforschung - eine Literaturstudie mit Forschungsempfehlungen*, Baden-Baden: Nomos, 1979.

A. Brunn, L. Baehr, H. J. Karpe (eds), *Conversion - Opportunities for Development and Environment*, Berlin etc.: Springer, 1992.

Verifikation allgemein, z.T. mit technischen Aspekten sowie Forschung und Entwicklung:

W. C. Potter (ed.), *Verification and Arms Control*, Lexington: Heath, 1985.

A. S. Krass, *Verification: How Much Is Enough?*, Stockholm/Lexington MA: SIPRI/Heath, 1985.

R. A. Scribner, T. J. Ralston, W. D. Metz, *The Verification Challenge - Problems and Promise of Strategic Nuclear Arms Control Verification*, Boston etc.: Birkhäuser, 1985.

K. Tsipis, D. Hafemeister, P. Janeway (eds.), *Arms Control Verification - The Technologies That Make It Possible*, Washington etc.: Pergamon-Brassey's, 1986.

J. Altmann, J. Rotblat (eds.), *Verification of Arms Reductions - Nuclear, Conventional and Chemical*, Berlin etc.: Springer, 1989.

J. B. Poole (ed.), *Verification Report 1991 - Yearbook on Arms Control and Environmental Agreements*, London/New York: VERTIC/Apex, 1991.

F. Calogero, M. L. Goldberger, S. P. Kapitza (eds.), *Verification - Monitoring Disarmament*, Boulder CO: Westview, 1991.

J. Altmann, H. van der Graaf, P. Lewis, P. Markl (eds.), *Verification at Vienna - Monitoring Reductions of Conventional Armed Forces*, New York etc.: Gordon & Breach, 1992.

J. B. Poole, R. Guthrie (eds.), *Verification Report 1992 - Yearbook on Arms Control and Environmental Agreements*, London/New York: VERTIC/Apex, 1992.

J. B. Poole, R. Guthrie (eds.), *Verification 1993 - Peacekeeping, Arms Control and the Environment*, London/Oxford etc.: VERTIC/Brassey's, 1993.

J. Altmann, T. Stock, J.-P. Stroot (eds.), *Verification After the Cold War - Broadening the Process*, Amsterdam: VU Press, 1994.

Sensoren allgemein:

W. Göpel, J. Hesse, J. N. Zemel (eds.), *Sensors - A Comprehensive Survey* (8 Bände), Weinheim: Verlag Chemie, 1989 - 1993:

vol. 1: T. Grandke, W. Ko (eds), *Fundamental and General Aspects*, 1989;

vol. 2: W. Göpel, T. A. Jones, I. Lundström, T. Seiyama (eds.), *Chemical and Biochemi-*

cal Sensors, Part I, 1991;

vol. 3: W. Göpel, T. A. Jones, M. Kleitz, I. Lundström (eds.), Chemical and Biochemical Sensors, Part II, 1992;

vol. 4: T. Ricolfi, J. Scholz (eds.), Thermal Sensors, 1991;

vol. 5: R. Boll, K. Orenshott (eds.), Magnetic Sensors, 1989;

vol. 6: E. Wagner, R. Dandliker, K. Spensee (eds.), Optical Sensors, 1992;

vol. 7: H. H. Bau, N. F. de Rooij, B. Kloeck (eds.), Mechanical Sensors, 1993.

S. Middelhoek, S. A. Audet, Silicon Sensors, London etc.: Academic Press, 1989

F. Oehme, Chemische Sensoren - Funktion, Bauformen, Anwendungen, Wiesbaden: Vieweg, 1991

Vor-Ort-Sensoren in der Verifikation:

I. Oelrich, V. Utgoff, Confidence Building with Unmanned Sensors in Central Europe, in: B. M. Blechman (ed.), Technology and the Limitation of International Conflict, Lanham MD: University Press of America, 1989.

J. Altmann, B. Gonsior, Nahsensoren für die kooperative Verifikation der Abrüstung konventioneller Waffen, Sicherheit und Frieden, Jg. 7, Nr. 2, S. 77-82, 1989.

R. Alfier et al., Ground Vibration and Acoustic Waves Produced by Land Vehicles of the Warsaw Treaty Organization - Results of the Measurements at Doksy, CSFR, Verification - Research Reports, no. 1, Bochum: Brockmeyer, 1991.

B. Rost, Automatic Sensor Networks for Verifying Disarmament of Aircraft, Verification - Research Reports, no. 2, Bochum: Brockmeyer, 1991

Eine Reihe von Artikeln findet sich in: Altmann, van der Graaf, Lewis, Markl (1992, s.o. unter Verifikation allgemein):

J. H. Farrar, Application and Considerations for Utilizing Technologies in Monitoring Storage, Perimeters and Exit-Entry Points;

B. Rost, Aircraft Monitoring by Automatic Sensor Networks;

J. Klinger, J. Malek, Seismic Methods for Verification;

J. Altmann, W. Kaiser, Soil Vibration by Military Trucks and Tanks - First Experimental Results;

W. W. Baus, V. Journé, Magnetic Detection to Verify Movement of Heavy Military Land Vehicles;

A. Güdesen, Detection of Vehicle Movements with Sensors;

W. C. Borawitz, R. J. van de Scheur, Transmission and Analysis of Unmanned Ground Sensor Data for the Verification of Arms Control Reductions.

J. Altmann et al., Ground Vibration, Acoustic Waves and Magnetic Disturbance Produced by Land Vehicles of the North-Atlantic Treaty Organization - Results of the 1989 Measurements at Baumholder, FRG, Verification - Research Reports, no. 3, Bochum: Brockmeyer, 1993.

R. Alfier et al., Seismic, Acoustic and Magnetic Signals caused by Single Military Vehicles and Vehicle Groups - Results of the second Experiment at Baumholder, FRG, December 1990, Verification - Research Reports, no. 4, Bochum: Brockmeyer, in preparation.

J. Altmann et al., Seismic and Acoustic Signals from Landing and Taking-Off Military Jet Aircraft - Results of the 1991 Measurements at Bechyne, CSFR, Verification - Research Reports, no. 5, Bochum: Brockmeyer, in preparation.

Objektschutz:

Hier gibt es nicht viel an wissenschaftlichen Büchern. Einfache technische Beschreibungen enthält: C. Schnabolk, Physical Security: Practices and Technology, Boston etc.: Butterworths, 1983.

An Konferenzbänden sind vor allem die Proceedings der Annual Meetings des Institute of Nuclear Materials Management sowie die Carnahan Conferences on Security Technology zu erwähnen.

Als wissenschaftliche Zeitschrift ist Security Journal zu nennen.

Informationen über Produkte und Trends findet man in vielen Anzeigen- und Werbezeitschriften, z.B.: International Security Review; Security; Security Management; Sicherheitsreport, Wirtschaftsschutz & Sicherheitstechnik.